



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EROS HENRIQUE DE SOUZA LIMA

**PATOLOGIAS EM DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO: estudo de caso
de uma ferrovia brasileira**

Recife

2022

EROS HENRIQUE DE SOUZA LIMA

**PATOLOGIAS EM DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO: estudo de caso
de uma ferrovia brasileira**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em engenharia civil.

Área de concentração: Construção civil.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

L732p Lima, Eros Henrique de Souza.
 Patologias em dormentes de concreto protendido: estudo de caso de uma
 ferrovia brasileira / Eros Henrique de Souza Lima. – 2022.
 148 f.: il., fig., quad.

 Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.
 Inclui referências e apêndice.

 1. Engenharia civil. 2. Dormentes de concreto protendido. 3. Patologias do
 concreto. 4. Ferrovia. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (Orientador). II.
 Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-437

EROS HENRIQUE DE SOUZA LIMA

**PATOLOGIAS EM DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO: estudo de caso
de uma ferrovia brasileira**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração Construção civil.

Aprovada em 12/08/2022.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Dr. Selmo Chapira Kuperman (Examinador externo)
Desek Ltda

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal do Ceará

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo do comportamento dos dormentes ferroviários de concreto protendido. No Brasil, o dormente de concreto protendido é o principal tipo de dormente utilizado nos sistemas de transporte de passageiros (metrô) e vem sendo cada vez mais utilizado nas ferrovias de carga, principalmente com os recentes programas de incentivo ao transporte sobre trilhos do governo federal. Apesar dos claros benefícios da utilização desse tipo de dormente na ferrovia, ainda há desafios a serem superados para garantir que o dormente atenda de maneira plena aos critérios de desempenhos esperados, principalmente com relação à durabilidade. Por serem expostos às intempéries ambientais e submetidos a cargas cíclicas de grande intensidade, o dormente se torna um elemento de concreto susceptível a sofrer patologias dos mais variados tipos e origens. Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica detalhada sobre a influência dos materiais no desempenho do dormente e sobre as principais patologias que afligem os dormentes. As patologias dos dormentes podem ser divididas entre aquelas com a causa relacionada a fatores internos, como as falhas ocorridas na produção dos dormentes e decorrentes de processos deletérios no concreto (como a reação álcali agregado e a formação de etringita tardia), e as causadas por fatores externos, como a deterioração da superfície do concreto, as fissuras decorrentes das altas cargas de impacto da ferrovia e fatores ambientais como o congelamento e degelo do concreto. Em geral, as causas das falhas dos dormentes estão associadas ao uso de materiais inadequados na produção dos dormentes, falhas na execução da cura e protensão do concreto, má manutenção da ferrovia e más condições do material rodante. A presente pesquisa investigou também a ocorrência de manifestações patológicas em dormentes de uma ferrovia brasileira por meio de um estudo de caso. Os dormentes foram inspecionados visualmente e ensaiados por meio do ensaio de carbonatação, análise química e análise petrográfica a fim de identificar a patologia responsável pela degradação dos dormentes. Baseado nos resultados dos ensaios, aparência, condições de exposição e comparação com outros trabalhos, chegou-se à conclusão de que os dormentes foram afetados pela formação de etringita tardia.

Palavras-chave: dormentes de concreto protendido; patologias do concreto; ferrovia.

ABSTRACT

This work aims to contribute to the study of the behavior of prestressed concrete railway sleepers. In Brazil, the prestressed concrete sleeper is the main type of sleeper used in passenger transport systems (metro) and has been increasingly used in freight railways, especially with the recent programs to encourage rail transport by the federal government. However, there are challenges in ensuring that the prestressed concrete sleepers meet expected performance standards, as many concrete sleepers fail prematurely and need to be replaced every year. Such failures have already been responsible for large-scale railway accidents which have caused financial losses and endangered the safety of rail transport users. Since the sleepers are exposed to environmental weather and subjected to cyclical loads of great intensity, they become a concrete element susceptible to pathologies of the most varied types and origins. This paper proposes to review the current literature on the main material used in the sleeper's production and deterioration mechanisms of prestressed concrete sleepers, discuss their causes and consequences, and suggest the main corrective and preventive measures that can be taken to minimize each problem. For ease of understanding, the failures have been separated into two groups: intrinsic failures, such as failures due to internal concrete deficiencies, and extrinsic failures, such as those associated with the high impact loads of railways and freeze-thaw cycles. In general, the causes of sleeper failures are related to the use of inappropriate materials in the production of sleepers, failures in the execution of the curing and prestressing of the concrete, poor maintenance of the railway and bad conditions of the rolling stock. The present research also investigated the occurrence of pathological manifestations in sleepers of a Brazilian railroad through a case study. The sleepers were visually inspected and tested through carbonation testing, chemical analysis, petrographic analysis and scanning electron microscopy of the concrete in order to identify the pathology responsible for the sleepers' degradation. At the end of the analysis, it was concluded that the sleepers are affected by the attack of delayed ettringite formation.

Keywords: prestressed concrete sleeper; pathologies in concrete; railroad.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da Via Permanente.....	21
Figura 2 – Partes de um trilho de rolamento	22
Figura 3 – Ocorrência de flambagem lateral em trilhos	23
Figura 4 – Exemplo lastro colmatado.....	24
Figura 5 – Principais elementos da superestrutura	26
Figura 6 – Disposição do dormente na via permanente.....	27
Figura 7 – Dormentes de madeira	27
Figura 8 – Dormente de madeira degradado	28
Figura 9 – Dormentes de aço.....	29
Figura 10 – Dormentes de polímero	30
Figura 11 – Dormente de concreto protendido.....	31
Figura 12 – Dormente do tipo “bi-bloco”.....	32
Figura 13 – Forças atuantes na ferrovia.....	34
Figura 14 – Movimento de “lacet”	36
Figura 15 – Diagrama de momento fletor típico durante passagem do trem	37
Figura 16 – Dormente alemão modelo B 55 e B70, respectivamente	42
Figura 17 – Dormente de concreto protendido modelo E da AAR	42
Figura 18 – Sistema de produção long line	45
Figura 19 – Sistema Single Mould	46
Figura 20 – Placas de ancoragem de protensão.....	46
Figura 21 – Diferença da distribuição dos agregados ao longo da seção do dormente.....	49
Figura 22 – Principais tipos de falhas que ocorrem nos dormentes de concreto protendido ...	65
Figura 23 – Exemplo de dormentes fissurados pouco tempo após fabricação.....	66
Figura 24 – Efeito da liberação da protensão em concretos com diferentes resistências.....	67
Figura 25 – Fissura longitudinal decorrente de má execução do sistema de fixação do dormente	68
Figura 26 – Fissuras superficiais em dormente de concreto protendido	69
Figura 27 – Dormente afetado por RAA em ferrovia norte-americana.....	71
Figura 28 – Dormente com fissuração decorrente de DEF	74
Figura 29 – Dormente com fissuração longitudinal decorrente de DEF	76
Figura 30 – Deterioração da região do apoio dos trilhos (RSD)	78
Figura 31 – Desgaste superficial do concreto (RSD) com formato triangular	80

Figura 32 – Fissuras na região de apoio dos trilhos no dormente de concreto.....	82
Figura 33 – Dormentes fissurados no meio do vão	84
Figura 34 – Dormente rompido em sua seção central	85
Figura 35 – Efeito da abrasão do concreto em um dormente de concreto.....	87
Figura 36 – Desgaste superficial do dormente de concreto e lastro contaminado	88
Figura 37 – Projeto geométrico dos dormentes	95
Figura 38 – Mapa geológico da Região Leste do estado de Pernambuco com localização da pedreira de Jaboatão circulado em vermelho	98
Figura 39 – Fissura longitudinal na face lateral do dormente	99
Figura 40 – Fissuras longitudinais na face superior do dormente	100
Figura 41 – Fissura tipo “mapa” na extremidade dos dormentes	100
Figura 42 – Dormentes apresentando ruptura da extremidade e ferragem exposta.....	101
Figura 43 – Fissuras nos dormentes estocados.....	102
Figura 44 – Fissuras nos dormentes estocados.....	102
Figura 45 – Fissuras tipo “mapa” na extremidade dos dormentes do estoque	103
Figura 46 – Fissuras tipo “mapa” na extremidade dos dormentes do estoque	103
Figura 47 – Presença de material esbranquiçado nos poros e próximo aos agregados graúdos da amostra 01.....	107
Figura 48 – Vista ampliada dos poros contendo material esbranquiçado na amostra 01	108
Figura 49 – Presença de inúmeros poros com material esbranquiçado na amostra 02	108
Figura 50 – Presença de poros e manchas esbranquiçadas na amostra 03	108
Figura 51 – Cortes realizados na amostra 03 (sem impregnação) e fissura identificada (foto à direita).....	109
Figura 52 – Detalhe da fissura que passa pelo agregado graúdo indicada na foto 47	109
Figura 53 – Cortes impregnados das amostras 01 e 03	109
Figura 54 – Poros esbranquiçados, bordas de reação e manchas de corrosão nas amostras 04 e 05.....	110
Figura 55 – Chapas de ancoragem de protensão com sinais de corrosão.....	110
Figura 56 – Análise dos fios de protensão do dormente de concreto protendido.....	111
Figura 57 – Vista ampliada dos fios de protensão CP-160 (RB) dos dormentes estudados...	111
Figura 58 – Verificação do diâmetro do fio de protensão	112
Figura 59 – Ensaio de carbonatação na extremidade do dormente nº 01	112
Figura 60 – Ensaio de carbonatação na extremidade do dormente nº 02	113
Figura 61 – Ensaio de carbonatação na extremidade do dormente nº 03	113

Figura 62 – Ensaio de carbonatação na lateral do dormente nº 01.....	114
Figura 63 – Ensaio de carbonatação na lateral do dormente nº 04.....	114
Figura 64 – Minerais presentes no agregado graúdo – Bt = biotita, Pl= plagioclásio, Ep= epidoto, Qtz = quartzo, Opc = minerais opacos	117
Figura 65 – Detalhe aumentado da Mirmequita (M).....	117
Figura 66 – Processo de sericitização presente no agregado graúdo.....	117
Figura 67 – Presença de Recristalização por subgrão e Pertita “em chama” no agregado graúdo	118
Figura 68 – Presença de quartzo recristalizado	118
Figura 69 – Grãos de quartzo característicos do agregado miúdo.....	119
Figura 70 – Microfissuras identificadas na borda do agregado graúdo.....	120
Figura 71 – Fissuração nas bordas do agregado graúdo e na pasta de cimento do concreto..	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais ferrovias brasileiras.....	20
Quadro 2 – Vantagens e Desvantagens dos principais tipos de dormentes.....	33
Quadro 3 – Carga por eixo para diferentes tipos de veículos ferroviários	35
Quadro 4 – Utilização do dormente de concreto protendido em alguns países.....	43
Quadro 5 – Comparação entre as principais normas ferroviárias.....	48
Quadro 6 – Tipo dos agregados utilizados em trabalhos experimentais de dormentes de concreto	52
Quadro 7 – Trabalhos publicados sobre RAA em dormentes de concreto.....	73
Quadro 8 – Trabalhos publicados sobre DEF em dormentes de concreto.....	78
Quadro 9 – Resultados da análise de reconstituição de traço.....	115
Quadro 10 – Resultados da análise de enxofre presente no concreto.....	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Geral	15
1.2.2	Específicos	15
1.3	ESCOPO DO TRABALHO	16
2	DORMENTES FERROVIÁRIOS	17
2.1	HISTÓRIA DA FERROVIA.....	17
2.2	FERROVIA NO BRASIL	18
2.3	ELEMENTOS DA FERROVIA.....	21
2.3.1	Trilhos.....	22
2.3.2	Lastro.....	23
2.3.3	Sublastro.....	25
2.3.4	Fixação e acessórios	25
2.4	DORMENTES.....	26
2.4.1	Dormentes de Madeira.....	27
2.4.2	Dormentes de Aço.....	29
2.4.3	Dormentes de Polímero	30
2.4.4	Dormentes de Concreto.....	31
2.5	AÇÕES ATUANTES NA FERROVIA	34
2.5.1	Esforços verticais	34
2.5.2	Esforços Longitudinais.....	35
2.5.3	Esforços Transversais	35
2.5.4	Ações dinâmicas.....	36
2.6	DIMENSIONAMENTO DOS DORMENTES	37
2.7	RESUMO	39
3	DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO.....	41
3.1	HISTÓRICO.....	41
3.2	SISTEMA DE PRODUÇÃO.....	44
3.2.1	Dormentes pré-tensionados	44
3.2.1.1	Sistema “Long Line”	44
3.2.1.2	Sistema “Short Line”	45

3.2.1.3	Sistema “Single Mould”	46
3.2.2	Dormentes pós-tensionados	47
3.3	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	47
3.3.1	Concreto	47
3.3.2	Cimento	50
3.3.3	Agregados	51
3.3.4	Aditivos	55
3.3.5	Adições Minerais	56
3.3.5.1	Adições pozolânicas	56
3.3.5.2	Adições não pozolânicas	58
3.3.6	Adições de Fibra	58
3.3.7	Aço	60
3.4	RESUMO	61
4	PATOLOGIAS NOS DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO	64
4.1	PATOLOGIAS DE CAUSAS INTRÍNSECAS	65
4.1.1	Fissuras em razão do processo construtivo do dormente	65
4.1.2	Reação álcali agregado	68
4.1.3	Formação de etringita tardia	73
4.2	PATOLOGIAS DE CAUSAS EXTRÍNSECAS	78
4.2.1	Deterioração da região de apoio dos trilhos (RSD)	78
4.2.2	Fissuras verticais na região de apoio dos trilhos	81
4.2.3	Fissuras verticais no meio do vão do dormente	84
4.2.4	Desgaste Superficial do corpo do dormente	86
4.2.5	Danos decorrentes de ciclos de Congelamento/Degelo	89
4.3	RESUMO	91
5	ESTUDO DE CASO	93
5.1	HISTÓRICO DE FABRICAÇÃO DOS DORMENTES	93
5.1.1	Características técnicas e geométricas	93
5.1.2	Materiais e produção dos dormentes	96
5.1.2.1	GI – Sem informações registradas	97
5.1.2.2	GII – Com informações registradas	97
5.2	DESCRIÇÃO DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA	98
5.3	INVESTIGAÇÃO DOS DORMENTES DEGRADADOS	103
5.3.1	Análise visual	103

5.3.2	Ensaio de Carbonatação	104
5.3.3	Reconstituição de traço e análise de enxofre.....	105
5.3.4	Microscopia ótica de luz transmitida - Análise Petrográfica	106
6	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	107
6.1	ANÁLISE VISUAL	107
6.2	ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	112
6.3	RECONSTITUIÇÃO DE TRAÇO E ANÁLISE DE ENXOFRE	115
6.4	MICROSCOPIA ÓTICA DE LUZ TRANSMITIDA – ANÁLISE ETROGRÁFICA	116
7	CONCLUSÃO.....	121
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A – TRABALHOS EXPERIMENTAIS ACERCA DE DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO	147

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos séculos, o modal ferroviário tem se mostrado cada vez mais importante para o desenvolvimento econômico e de melhoria da qualidade de vida da sociedade. Em todo o mundo, a engenharia ferroviária tem tido um papel de suma importância no fortalecimento do transporte de bens e pessoas e no desenvolvimento de novas tecnologias. As ferrovias transportam cargas, que em sua maioria são matéria-prima para aparatos básicos da sobrevivência humana, e representam uma opção viável para o fortalecimento da mobilidade urbana das grandes cidades. Tudo isso de maneira mais sustentável do que o transporte rodoviário, visto que a emissão de dióxido de carbono (kgCO_2/km) por ferrovias é cerca de 40% inferior ao emitido pelo transporte rodoviário (SILVA et al., 2020a).

Dessa forma, para que o transporte ferroviário ocorra de maneira segura e confiável, é fundamental que os seus componentes sejam bem dimensionados e apresentem condições de suportar os variados tipos de cargas ferroviárias e condições ambientais (TAHERINEZHAD et al., 2013). Dentre esses componentes, os dormentes são aqueles que possuem a função de dar suporte ao trilho (mantendo a geometria da via) e repassar os esforços recebidos pelo trilho para a infraestrutura ferroviária. No passado, o dormente de madeira era o tipo de dormente mais utilizado, com o passar do tempo, porém as crescentes exigências de carga e durabilidade juntamente com a escassez de madeiras de boa qualidade, fizeram com que o dormente de concreto surgisse como opção mais vantajosa para a ferrovia (MANALO et al., 2010).

Nesse sentido, os primeiros dormentes de concreto foram produzidos com a utilização do concreto armado, contudo a experiência em campo mostrou que esses dormentes não eram resistentes o suficiente para suportar todos os esforços estáticos e dinâmicos de uma ferrovia (BASTOS, 1999; HWANG et al., 2011). Com o amadurecimento da tecnologia do concreto protendido após a Segunda Guerra Mundial, foi possível confeccionar dormentes de concreto mais resistentes (BASTOS, 1999). E dentre as principais vantagens dos dormentes de concreto protendido estão a sua elevada resistência mecânica, estabilidade e durabilidade (TAHERINEZHAD et al., 2013).

À vista disso, apesar dos claros benefícios da utilização dos dormentes de concreto protendido na ferrovia, ainda há desafios a serem superados para garantir que o dormente atenda de maneira plena aos critérios de desempenhos esperados, principalmente com relação à durabilidade (YU et al., 2015; ZAKERI; REZVANI, 2012; ZEMAN et al., 2009). Por serem instalados ao ar livre (em contato direto com brita ou solo), expostos às intempéries

ambientais e submetidos a cargas cíclicas de grande intensidade, o dormente se torna um elemento de concreto susceptível a sofrer patologias dos mais variados tipos e origens. São vários os relatos ao redor do mundo da ocorrência de manifestações patológicas nos dormentes, que geralmente estão atreladas a grandes prejuízos financeiros para as operadoras ferroviárias (LOVETT et al., 2015).

1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil, o dormente de concreto protendido é o principal tipo de dormente utilizado nos sistemas de transporte de passageiros (metrô) e vem sendo cada vez mais utilizados nas ferrovias de carga. Existe, hoje, a expectativa de um aumento de dormentes de concreto em razão do novo programa de Autorizações Ferroviárias (Pro Trilhos) do governo federal, que concede autorização para que o setor privado possa construir e operar ferrovias, ramais, pátios e terminais ferroviários através da lei federal nº 14.273/2021. Até julho de 2022, o Ministério da Infraestrutura já havia recebido 76 requerimentos para construção e operação de ferrovias, perfazendo 19 mil quilômetros de novas ferrovias privadas, que utilizarão aproximadamente 32 milhões de dormentes.

Logo, é fundamental que os dormentes sejam produzidos de acordo com as melhores práticas adotadas em países com tradição ferroviária mais consolidada a fim de evitar prejuízos e garantir a segurança da operação ferroviária. Apesar da quantidade de pesquisas relacionadas aos dormentes de concreto protendido ser extensiva ao redor do mundo, poucos são os trabalhos que abordam esse tema no Brasil.

Nessa direção, um estudo realizado com operadores ferroviários norte-americanos (país com a maior malha ferroviária do mundo) constatou que a maioria dos operadores ferroviários já precisou substituir quantidades significativas de dormentes de concreto protendido devido à ocorrência de falhas prematuras (ZAREMBSKI, 2010). Além disso, dados do Federal Railroad Administration dos Estados Unidos sobre acidentes ferroviários ocorridos entre 2004 e 2013, mostram que nesse período ocorreram pelo menos 25 acidentes ferroviários de grandes proporções cujas causas estavam relacionadas a falhas de dormentes de concreto e/ou suas fixações (BASTOS, 2016). Segundo Lovett (2015), o custo médio de cada acidente ferroviário causado por problemas de via permanente é de cerca de 365 mil dólares.

Diante disso, este trabalho se propõe a fazer uma revisão do estado da arte da literatura dos principais materiais e técnicas utilizados na fabricação dos dormentes de concreto

protendido e dos principais mecanismos de deterioração que acometem esse tipo de dormente. Um estudo de caso de uma ferrovia brasileira é apresentado, como forma de enriquecer a pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

Nas seções posteriores estão descritos os objetivos gerais e específicos desenvolvidos deste trabalho.

1.2.1 Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral contribuir para o entendimento do comportamento dos dormentes de concreto protendido por meio de uma revisão bibliográfica dos materiais utilizados na produção dos dormentes e das principais patologias que os atingem, bem como investigar as manifestações patológicas apresentadas por dormentes de concreto protendido de uma ferrovia brasileira por meio de um estudo de caso.

1.2.2 Específicos

- a) Estudar detalhadamente os dormentes de concreto protendido, seu histórico, métodos de produção e os principais materiais utilizados;
- b) Estudar detalhadamente as principais manifestações patológicas que ocorrem nesse tipo de dormente, indicando as principais causas associadas às falhas e meios de corrigir e prevenir a ocorrências dessas falhas;
- c) Investigar por meio da realização de testes e ensaios (carbonatação, análise química do cimento, análise através de microscopia eletrônica de varredura, análise petrográfica) as amostras dos dormentes estudados no estudo de caso deste trabalho;
- d) A partir dos resultados obtidos nos itens anteriores, e com o aprofundamento do conhecimento dos mecanismos envolvidos nas patologias dos dormentes de concreto protendido, identificar a patologia responsável pela degradação dos dormentes estudados.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução com a justificativa da pesquisa, relatando a importância do estudo dos dormentes de concreto protendido, além dos objetivos gerais e específicos.

No Capítulo 2, é abordada a visão geral da história da ferrovia no Brasil e no mundo, bem como uma apresentação dos principais conceitos ferroviários e tipos de dormentes.

No Capítulo 3, é tratado o estado da arte sobre os dormentes de concreto protendido. Aborda-se o histórico da evolução desse tipo de dormente, os principais sistemas de produção dos dormentes e uma apresentação detalhada dos principais materiais utilizados na produção dos dormentes de concreto protendido.

No Capítulo 4, é apresentado o estado da arte sobre as principais patologias que acometem os dormentes de concreto protendido, com descrição dos mecanismos de degradação e dos métodos corretivos e preventivos para solucionar cada problema.

No Capítulo 5, são feitas considerações quanto ao estudo de caso de patologia em dormentes de uma ferrovia brasileira, bem como sobre toda a metodologia utilizada na investigação.

No Capítulo 6, são apresentadas as análises e os resultados encontrados e discussões importantes sobre o estudo.

No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 DORMENTES FERROVIÁRIOS

Neste capítulo serão apresentadas a história da ferrovia no Brasil e no mundo, bem como os principais conceitos ferroviários e tipos de dormentes.

2.1 HISTÓRIA DA FERROVIA

A ferrovia, da forma como é conhecida hoje, apareceu no início do século XIX nas minas de carvão britânicas. Essa forma de transporte tem como principal característica o movimento da roda sendo guiado pelos trilhos por meio do contato metal-metal. Porém, há registros de movimentação de carruagens guiadas por ranhuras feitas em rochas desde a época dos romanos, que se utilizavam desses guias como forma de acelerar a movimentação das carruagens e facilitar o transporte de materiais para as grandes construções da época (TEIXEIRA, 2016). No caso das minas de carvão europeias, inicialmente foram utilizados trilhos de madeira (século XVI) para reduzir o atrito na movimentação dos vagões carregados por carvão e movimentados por meio de tração animal (PROFILLIDIS, 2014).

Dessa maneira, o desenvolvimento das estradas de ferro propriamente ditas foi influenciada pela primeira Revolução Industrial (iniciada no século XVIII) com criação da energia a vapor e a extensa exploração de minas de carvão e ferro (TEIXEIRA, 2016). A partir dessa época, os trilhos de madeira foram substituídos por trilhos de ferro e há o aparecimento da primeira locomotiva a vapor, cuja criação está associada ao nome do engenheiro inglês Richard Trevithick. Em 1804, em uma mina do País de Gales, ele conseguiu fazer uma locomotiva de quatro rodas deslizar sobre trilhos de ferro fundido, puxando cinco vagões carregados de carvão à velocidade de 8km/h. Seu feito motivou os engenheiros a estudar a possibilidade de vias férreas e veículos capazes de percorrê-las (NABAIS, 2014).

As primeiras locomotivas não tiveram o sucesso esperado, as máquinas mostraram-se incapazes de subir pequenas rampas em razão da falta de aderência. Nessas situações, as rodas das locomotivas patinavam sobre os trilhos, sem conseguir mover o trem. Não se conhecia ainda a proporção adequada entre o peso da locomotiva e a carga a ser transportada. Foi o inglês George Stephenson, antigo operário e engenheiro de minas, que aperfeiçoou o projeto da locomotiva a vapor, projetando uma locomotiva mais complexa e com aderência em todas as rodas. Ele também foi responsável pela construção da primeira ferrovia pública com tração a vapor, a Stockton and Darlington Railway, fundada em 1825 e com 40 quilômetros de

extensão (DUFFY, 1981). As primeiras linhas ferroviárias começaram a operar na maioria dos países europeus por volta de 1830 e as redes ferroviárias atingiram densidade máxima no início do século XX. (ALENCAR, 2004).

Nessa perspectiva, de acordo com Borges (2011), as ferrovias resolveram um problema crucial da humanidade no século XIX: a falta de meios de transporte e a necessidade de comunicação rápida e eficiente. Por meio delas foi possível explorar comercialmente e desenvolver áreas distantes até então inexploradas, tendo tido um importante papel no estímulo à política, economia, desenvolvimento físico e social no século XIX. A adoção da tração elétrica, no início do século XX, permitiu um maior desenvolvimento das ferrovias, enquanto que a aplicação da sinalização e do controle automático dos trens na década de 1950 facilitou a operação e aumentou a capacidade de carga das ferrovias. (ESVELD, 2001).

Nesse contexto, a partir do avanço da tecnologia e concorrência de outros meios de transporte, as ferrovias tiveram que se modernizar no que diz respeito à velocidade, redução de custos e melhoria dos serviços oferecidos. Mais recentemente também, em paralelo com as ferrovias convencionais (com base no contato metal-metal), houve o surgimento de projetos com técnicas que, embora utilizem o transporte de veículos guiados (como ferrovias), evitam o contato entre o veículo em movimento e a infraestrutura de rolamentos. Esse é o sistema de levitação magnética, conhecido como maglev, que atinge velocidades superiores a 600km/h. (PROFILLIDIS, 2014).

2.2 FERROVIA NO BRASIL

Em meados do século XIX, o Brasil era um país predominantemente exportador, com grandes regiões produtoras de bens como café, açúcar, algodão e cacau. Porém, o alto custo de transporte no interior do Brasil e a má qualidade das estradas configuravam um desafio no processo de escoamento da produção para os portos. Assim, era natural, portanto, que os grandes fazendeiros da época, pressionassem o governo para conseguir um meio de transporte mais moderno que garantisse aos produtores uma posição mais competitiva no mercado externo. A estrada de ferro, como um meio de transporte mais rápido e seguro, era uma alternativa eficiente que atendia às demandas de modernização do País. (NABAIS, 2014).

Desse modo, de forma atender a essas demandas, algumas leis foram criadas a partir de 1830 a fim de facilitar o processo de implantação de ferrovias no Brasil, até que, em 30 de abril de 1854, a primeira ferrovia do Brasil foi inaugurada por Irineu Evangelista de Souza (o

Barão de Mauá). O trecho saía da Baía de Guanabara, na cidade do Rio de Janeiro, e seguia em direção à cidade de Petrópolis (RJ), tinha 14,5 km de extensão. Além dessa ferrovia, Mauá também investiu na construção de outros empreendimentos ferroviários, como a Estrada de Ferro D. Pedro II, e depois a Estrada de Ferro Central do Brasil. (BRITO, 2002).

Ademais, a segunda ferrovia a ser inaugurada no País (e primeira do Nordeste), em 1858, foi a Recife to São Francisco Railway, que ligava Recife à cidade do Cabo, em Pernambuco, realizando a comunicação entre uma área produtora de açúcar com o principal porto de escoamento da produção para os principais mercados consumidores do País e do exterior (ALBUQUERQUE; CARDOSO, 2016). Desde então, o Brasil viveu uma expansão ferroviária, que durou até meados do século XX. Nesse período, as ferrovias desempenharam papel decisivo no escoamento de produtos agrícolas brasileiros – sobretudo o café – do interior para os portos, articulando-se com a navegação de longo curso.

Nessa época, os investimentos e a operação ferroviária eram privados e independentes entre si, sendo as ferrovias implantadas com bitolas (distância entre os trilhos) diferentes, não interligando os sistemas ferroviários regionais (QUEIROZ, 1999). As primeiras estradas de ferro localizadas no país estavam organizadas de maneira dispersa e isolada atendendo a economia regional e sem intenções de integração do mercado interno. De acordo com Fishlow (1971 apud SIQUEIRA, 2002), essas características contrastam com a experiência das ferrovias americanas, que já na primeira metade do século XIX, apresentavam considerável grau de conectividade das linhas férreas e uma grande densidade de tráfego em todas as direções, norte-sul e leste-oeste.

A Primeira Guerra Mundial, a crise de 1929 (e com ela a crise do setor agroexportador) e o início da expansão rodoviária, fizeram com que a rede ferroviária, de modo geral, estagnasse. De acordo com Paula (2014), até a década de 1920, o aparelho de Estado incentivou e criou um ambiente favorável para o desenvolvimento das ferrovias. Dessa época em diante, porém, essa tendência se inverteu e o Estado lentamente foi deixando de investir em melhoria dos sistemas ferroviários, ao mesmo tempo que intensificava o incentivo ao transporte rodoviário. As ferrovias passaram a ser consideradas ineficientes e deficitárias. Em razão disso, o governo lançou um programa de erradicação dos ramais antieconômicos, fortalecido a partir da década de 1960. Ainda de acordo com Paula (2014), a existência de uma ditadura militar, na época, dificultou a organização de protestos populares e sindicais contra essas erradicações.

Assim, o Brasil, que na década de 1950 possuía 36.000 km de ferrovia, atualmente possui uma malha ferroviária de 29.165 km, extensão 10 vezes menor que a atual malha

ferroviária dos Estados Unidos, por exemplo. O governo federal, nos últimos anos, vem trabalhando de forma a aumentar a participação do modal ferroviário na matriz de transportes do Brasil, que atualmente é de apenas 15% (DE CASTRO ALVES; DA SILVA RAMOS; SILVA, 2020). A meta do governo atual é dobrar esse valor até o ano de 2030 e com isso buscar reduzir o custo do transporte de carga no Brasil e melhorar a eficiência logística do agronegócio, que hoje depende basicamente do modal rodoviário. Para isso, o governo federal aposta na participação da iniciativa privada por meio do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI).

O Quadro 1 resume a extensão, área de abrangência e tipo de bitola das principais ferrovias brasileiras. Observa-se que ainda hoje existem diferenças de bitola entre as principais ferrovias do País, o que dificulta uma integração entre elas. A bitola métrica (1000mm) e a larga (1600mm) são as mais utilizadas no Brasil.

Quadro 1 – Principais ferrovias brasileiras

Ferrovia	Extensão (km)	Área de atuação	Bitola predominante (mm)
Ferrovia Centro-Atlântica SA (FCA)	7856,8	MG, SE, GO, ES, DF, RJ, BA, SP	1000
Rumo Malha Sul S.A.	7223,4	RS, SC, PR, SP	1000
Rumo Malha Paulista S.A.	2119,2	SP, MG	1600
Rumo Malha Oeste S.A.	1973,1	SP, MS	1000
Ferrovia Transnordestina Logística (FTL)	1237	MA, PI, CE	1000
Rumo Malha Central S.A.	855,8	TO, GO	1600
Ferrovia Norte-Sul S.A. (FNSTN)	744,5	MA, TO	1600
Rumo Malha Norte S.A.	735,3	MT, MS	1600
Estrada de Ferro Paraná Oeste	248,1	PR	1000
Ferrovia Tereza Cristina	161,6	SC	1000

Fonte: Adaptado de ANTT (2021).

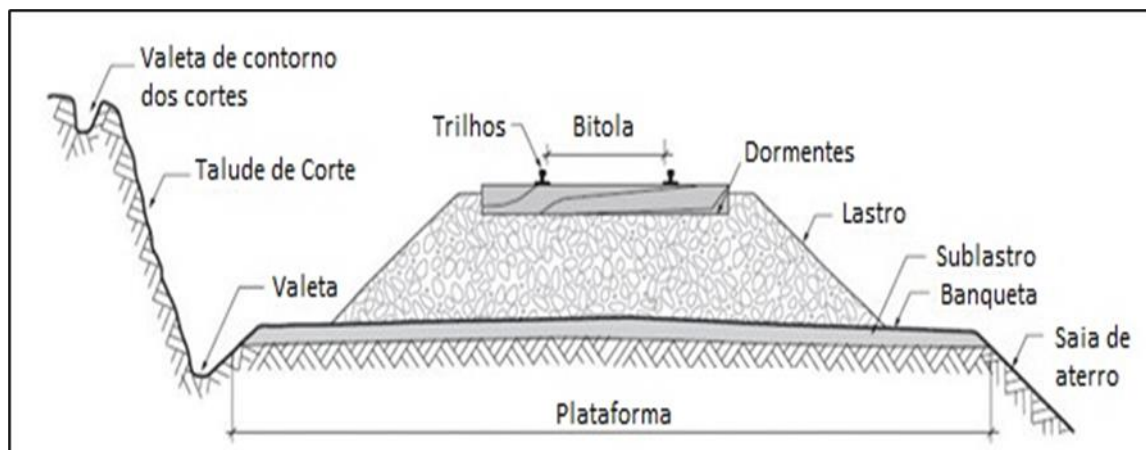
No Brasil, não houve uma política de que estabelecesse a integração das diversas ferrovias como algo primordial. De fato, as próprias empresas ferroviárias consideravam particulares suas áreas de operação, onde qualquer tentativa de aproximação de um concorrente era vista como ameaça que tinha que ser contida a qualquer custo, mesmo que isso implicasse na construção de ramais antieconômicos (MOREIRA; MARQUES; OLIVEIRA, 2020). Os reflexos disso são enfrentados até os dias atuais, o que acarreta entraves e restrições nas operações ferroviárias, impactando na eficiência desse modal, gerando custos ao integrar ferrovias de bitola métrica e larga. Um exemplo disso é o novo

projeto da ferrovia Transnordestina (que ligará o porto de Suape ao porto de Pecém no Ceará e ao município de Eliseu Martins no Piauí) que foi concebido com bitola mista, ou seja, utiliza duas bitolas (1000mm e 1600mm) para poder haver a integração desse modal. Essa decisão deverá elevar os custos de construção da ferrovia significativamente visto que será necessário utilizar aproximadamente 50% a mais na quantidade de trilhos (um dos itens mais caros das obras ferroviárias) e utilizar dormentes especiais adaptados para a utilização das duas bitolas.

2.3 ELEMENTOS DA FERROVIA

A ferrovia é usualmente composta pelo conjunto dos sistemas fixos (via permanente, construções, sistema elétrico e de sinalização) e seu material rodante (trens e veículos de manutenção). A via permanente é a denominação utilizada para o conjunto de elementos e camadas que possibilitam a passagem do trem. Durante séculos, desde o início das ferrovias, seu desenho básico tem se mantido muito semelhante, evoluindo apenas em seus componentes, de acordo com o avanço das tecnologias de materiais. A via permanente está dividida em dois subgrupos: a infraestrutura e a superestrutura (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura da Via Permanente



Fonte: Adaptado de Nabais (2014).

De acordo com Brina (1988), a infraestrutura é constituída pela terraplenagem e todas as obras abaixo do greide de terraplenagem, o que inclui os taludes de corte e aterro, sistema de drenagem, obras de contenção e obras de arte especial. Já a superestrutura ferroviária é composta pelos elementos que se encontram acima da plataforma de terraplenagem e recebem os impactos diretos da carga do trem, estando sujeitos à ação de desgaste por causa da passagem do material rodante e das intempéries. Fazem parte da superestrutura os trilhos, dormentes, lastro, sublastro e acessórios de fixação. Historicamente, os elementos da

superestrutura tiveram maiores estudos em comparação àqueles que compõe a infraestrutura. (FORTUNATO, 2005).

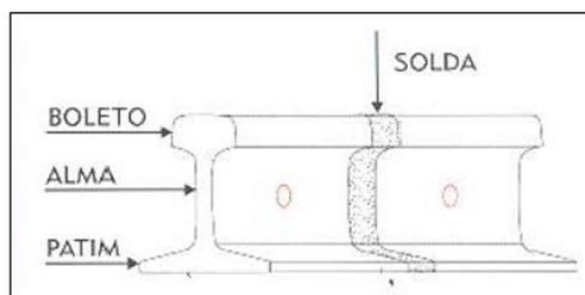
Neste item será enfatizado o estudo dos trilhos, lastro, sublastro e acessórios. Os dormentes serão abordados no item seguinte.

2.3.1 Trilhos

O trilho é o componente da superestrutura da via permanente que constitui a superfície de rolamento para todos os veículos ferroviários, servindo-lhes, ao mesmo tempo, de apoio e guia. É o elemento que detém o maior custo entre todos os elementos da via e funciona como uma viga contínua, transferindo as solicitações das rodas para os dormentes. Para exercer suas funções, é necessário que o trilho tenha dureza, tenacidade, elasticidade e alta resistência à flexão, características essas que tornaram o aço o material mais vantajoso para a fabricação dos trilhos. (BRINA, 1988; ESVELD, 2001).

Nesse sentido, a forma e composição dos trilhos vêm sofrendo uma evolução permanente desde os primórdios das estradas de ferro até os dias atuais, principalmente em razão da necessidade de resistir às pesadas cargas por eixo dos trens modernos aliado ao grande desenvolvimento da tecnologia do aço. O trilho mais utilizado atualmente, tanto em ferrovias de carga quanto de passageiros, é chamado de trilho Vignole, e é usualmente dividido em três partes conforme Figura 2.

Figura 2 – Partes de um trilho de rolamento



Fonte: Vale (2009).

A norma brasileira (NBR 7590:2012) classifica os tipos de aço para trilho em: aço carbono (resistência mínima), aço-liga (média resistência) e aço tratado (alta resistência). Os parâmetros adotados como critério de classificação são a composição química e as propriedades mecânicas finais do trilho, basicamente de dureza, limites de escoamento e de resistência à tração (FARIA et al., 2016). Segundo Olivares et al. (2011), os aços mais

resistentes para trilhos são fabricados com concentração em peso de carbono (C) entre 0,7% e 0,9%, teor de manganês (Mn) variando de 0,8% a 1,3% e com os teores de fósforo e enxofre controlados, respectivamente, entre 0,005-0,007% e abaixo de 0,003% para evitar problemas relacionados à fragilização dos aços. Adições de outros elementos como Si, Cr, Ni, Mo, Nb e V também são desejáveis para melhorar as características mecânicas do aço.

Os principais limitantes da vida útil dos trilhos são: o desgaste, decorrente do contato metal-metal entre a roda e o trilho, e a fadiga causada pelo carregamento cíclico ao qual o trilho está submetido durante a passagem das rodas dos trens. Além das solicitações provenientes dos trens, os trilhos estão sujeitos também às tensões provocadas pela variação da temperatura. Essas tensões decorrem da dilatação (ou contração) do trilho com a variação da temperatura e seu impedimento de se movimentar ao longo da via. Em casos críticos de aumento de temperatura na via, os trilhos podem chegar a flambar (Figura 3), colocando em risco a segurança do tráfego. (KLINCEVICIUS, 2011).

Figura 3 – Ocorrência de flambagem lateral em trilhos



Fonte: <https://wonderfulengineering.com/speeding-train-tipping-scary/>.

2.3.2 Lastro

O lastro ferroviário é a camada de material granular utilizada abaixo da grade ferroviária (conjunto de trilhos e dormentes) a fim de prover suporte à passagem dos trens e distribuir as cargas para o sublastro. Na maioria das ferrovias, o material utilizado é a pedra britada, considerado como o melhor tipo de material para lastro pois, segundo Brina (1988), possui alta resistência mecânica, é inalterável aos agentes atmosféricos, permeável e permite um perfeito nivelamento do lastro e consequente estabilidade da via.

Nesse contexto, dentro do propósito de promover a estabilidade da via, o lastro tem como suas principais funções: distribuir uniformemente a carga da via transmitida pelo tráfego, diminuindo a pressão sobre o subleito; “ancorar” a via para conter o movimento lateral, vertical e longitudinal exagerados; e propiciar a drenagem por meio dos vazios, não deixando a água acumular em torno dos trilhos e dormentes. (SELIG; WATERS, 1994).

Nessa perspectiva, Stopatto (1987) esclarece que o conceito de qualidade de uma ferrovia não pode ser separado da qualidade do lastro e da adequação de sua espessura. Um dos fatores determinantes para a boa qualidade do lastro é a definição de sua granulometria, a maioria das normas ferroviárias estabelece faixas granulométricas compostas por grãos de diâmetro entre 12,5mm e 63mm. A adoção das faixas especificadas em norma e a correta manutenção do lastro pela indústria ferroviária reduz a deformação da via permanente e a degradação do lastro ferroviário. (VIZCARRA, 2015).

Ademais, um problema comum relacionado ao lastro é o fenômeno conhecido como “lastro colmatado” (Figura 4), que ocorre pela combinação da degradação do lastro decorrente do tráfego de trens associada à contaminação do mesmo por material fino. Esse material pode ser proveniente de queda de material transportado pelos vagões ou bombeamento de material fino do subleito, e levam ao preenchimento dos vazios do lastro, alterando as suas propriedades mecânicas e sua característica drenante.

Logo, quando o grau de degradação da camada de lastro na via permanente é muito elevado, as solicitações impostas pelo material rodante alteram a resposta elástica do lastro, fazendo com que trilhos, fixações e dormentes tenham que suportar valores mais elevados de tensões, acarretando desgaste precoce daqueles componentes e comprometendo a trafegabilidade e segurança da ferrovia (COSTA, 2016).

Figura 4 – Exemplo lastro colmatado



Fonte: O Autor (2022).

Uma opção viável para o reaproveitamento de lastro degradado é utilizá-lo para outros fins, pesquisas recentes mostraram que esse material pode ser utilizado de maneira eficaz e econômica para base de pavimento rodoviário. (SILVA, 2015a).

2.3.3 Sublastro

O sublastro é a camada entre o lastro e o subleito que pode ser composta por materiais granulares, tendo como principais funções aumentar a capacidade de suporte da plataforma, evitar penetração de lastro na plataforma e aumentar a resistência do leito a erosão e a penetração de água. Em geral, é constituído por um material mais barato e fácil de ser encontrado, tendo especificações normativas mais brandas do que as do lastro (NABAI, 2014).

Diante disso, mais recentemente, vem sendo estudado e aplicado com sucesso o uso de concreto asfáltico em substituição ao solo granular na construção do sublastro. Dentre as diversas vantagens dessa técnica, destacam-se a impermeabilização do subleito, aumentando a vida útil da fundação com a melhor preservação de suas características de projeto, a inexistência do fenômeno de bombeamento de finos do sublastro para o lastro, além da possibilidade do melhor controle tecnológico dos materiais utilizados, uma vez que na prática os ensaios em misturas asfálticas são mais completos do que os ensaios em materiais granulares para sublastro. (RANGEL; ARAGÃO; MOTTA, 2015).

2.3.4 Fixação e acessórios

O sistema de fixação tem como principal finalidade manter o trilho em uma posição fixa, garantindo que a bitola permaneça constante. Além disso, as fixações também têm a função de resistir aos esforços verticais, transversais e longitudinais ocasionados pelo tráfego de trens e à mudança de temperatura do trilho.

Em geral, as fixações são divididas em rígidas e elásticas. As rígidas são mais simples e ineficientes, sendo compostas por pregos e parafusos de linha. Já as elásticas são mais modernas e capazes de absorver impactos e vibrações sem perder a pressão de fixação. (SELIG; WATERS, 1994; STEFFLER, 2013).

Particularmente, no caso de dormentes de concreto, o conjunto de fixação e acessórios (Figura 5) é composto pelas fixações elásticas, isolantes e por palmilhas “pads”. As palmilhas

são posicionadas entre o trilho e o dormente e têm a finalidade de proporcionar amortecimento de vibrações induzidas pelas rodas e reduzir o atrito no contato trilho/dormente, além de proporcionar isolamento elétrico para o sinal dos circuitos da via.

Figura 5 – Principais elementos da superestrutura



Fonte: Adaptado de <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pandrol-on-concrete.jpg>.

À vista disso, uma falha nas fixações dos trilhos pode ocasionar acidentes de grandes proporções, principalmente em regiões de curva onde os esforços laterais sobre os trilhos são maiores. Consequentemente, as inspeções de via são de grande importância a fim de verificar a situação das fixações em campo. Historicamente, esse tipo de inspeção é feita de maneira manual, com os inspetores percorrendo todo o trecho ferroviário a pé. Em ferrovias mais modernas, porém, já se utilizam veículos especiais com implementos que conseguem verificar a situação da fixação por meio de técnicas de machine learning visual (CHANDRAN et al., 2021).

2.4 DORMENTES

Dormentes (sleepers em inglês britânico e tie em inglês americano) são os componentes da via permanente posicionados entre os trilhos e o lastro de brita (Figura 6), e possuem as seguintes funções:

- a) receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos ferroviários;
- b) servir de suporte firme para os trilhos, permitindo sua fixação;

- c) preservar o devido distanciamento entre os trilhos (bitola) e inclinação deles;
- d) promover estabilidade lateral e longitudinal para via permanente. (BRINA, 1988; PROFILLIDIS, 2014).

Ademais, existem vários tipos de dormentes e cada um deles possui características diferentes quanto à durabilidade, ao custo, ao desempenho e à resistência mecânica. No passado, o dormente de madeira de lei era o tipo mais utilizado para aplicação em ferrovias. Porém, o desenvolvimento da tecnologia e o crescimento exponencial dos mercados em todo o mundo fez aumentar as exigências com relação ao desempenho do dormente. Buscou-se, então, dormentes com maior capacidade de carga, menos prejudiciais ao meio ambiente e mais economicamente viáveis. Assim, intensificaram-se as pesquisas por materiais alternativos que fossem incorporados ao uso da madeira de lei, tais como os dormentes de aço, concreto e polímero. (STEFFLER, 2013).

Figura 6 – Disposição do dormente na via permanente



Fonte: <http://railsystem.net/track-structure/>

2.4.1 Dormentes de Madeira

Figura 7 – Dormentes de madeira



Fonte: <https://theconstructor.org/transportation/railway-sleeper-types-functions-benefits/20019/>.

Os dormentes de madeira (Figura 7) têm uma longa história de participação efetiva e desempenho confiável no ambiente ferroviário e são bem-sucedidos até os dias de hoje. Tecnicamente, a resistência mecânica das fibras da madeira faz com que esse tipo de

dormente apresente alta resistência à flexão e à fadiga, tendo sido o principal dormente utilizado até meados do século XX, mesmo tendo limitações quanto à sua durabilidade (BONNETT, 2005; ZAREMBSKI, 1993). A vida útil dos dormentes de madeira pode variar desde meses até 35 anos, a depender de inúmeros fatores, tais como: o formato do dormente, tipo e classe da madeira, o seu uso mecânico, formação de fendas, ação biológica e ação química (PASSOS, 2006 apud RFFSA, 1979/1980).

Figura 8 – Dormente de madeira degradado



Fonte: O Autor (2022).

As principais vantagens do dormente de madeira, quando comparado aos demais tipos de dormentes, são a sua resiliência ao descarrilamento, seu baixo peso, boa manutenibilidade, baixa condutibilidade elétrica e sua boa interação com o lastro ferroviário (STEFFLER, 2013). Já as principais desvantagens do uso desse tipo de dormente são a sua suscetibilidade à degradação biológica (Figura 8) e a dificuldade que a indústria ferroviária enfrenta em razão do declínio da disponibilidade de madeira de qualidade para dormentes. Existe, hoje, uma pressão para utilização de madeira de espécies de reflorestamento, nem sempre tão resistentes, como por exemplo o Eucalipto. (QIAO; DAVALOS; ZIPFEL, 1998).

Nessa perspectiva, além de pesquisas de novos materiais para substituir os dormentes de madeira, muito tem se estudado para encontrar formas de prolongar a sua durabilidade. Uma das formas que apresentou melhor resultado foi a utilização de tecido de fibra de vidro para reforçar os dormentes. Esse tecido pode ser utilizado encobrindo o dormente de madeira

todo ou como reforço entre as lamelas de madeira no caso de dormentes de madeira lamelada colada. Em ambos os casos houve aumento da resistência, capacidade de carga e durabilidade do dormente de madeira (ICIMOTO, 2018).

2.4.2 Dormentes de Aço

Figura 9 – Dormentes de aço



Fonte: <https://observatoriometroferro.ufsc.br/tag/vale/>

O dormente de aço (Figura 9) consiste em uma chapa laminada de 8 a 14mm de espessura, em forma de U invertido, curvada em suas extremidades a fim de formar garras que se afundam no lastro e se opõem ao deslocamento transversal da via (BRINA, 1988). Esse tipo de dormente pesa em torno de 70kg, sendo mais leve que o dormente de madeira o que o torna mais fácil de ser manuseado e estocado. Possui uma vida útil média de 50 anos (HODGSON, 1983 apud PROFILLIDIS, 2014).

Destarte, os dormentes de aço apresentam ainda como vantagens uma excelente resistência mecânica e uma boa estabilidade com o lastro, necessitando de menos manutenção que outros tipos de dormentes (BRINA, 1988). Outra vantagem desse tipo de dormente é a possibilidade de ele ser totalmente reciclado após o fim da sua vida útil.

Em campo, a principal preocupação com o dormente é a sua baixa resistência à oxidação e ataques químicos, visto que o aço é altamente sujeito a essa ação (COPE; ELLIS, 2001). Além disso, o seu alto custo de aquisição - seu preço normalmente está ligado aos valores da commodity do minério de ferro - e o fato de possuir alta condutibilidade elétrica também contam como pontos negativos para esse tipo de dormente. (STEFFLER, 2013).

Dessa forma, os dormentes de aço são pouco utilizados ao redor do mundo quando comparados com os dormentes de madeira e concreto. Seu uso tem sido mais indicado para

ramais ferroviários secundários, onde a densidade de tráfego e a velocidade operacional são menores (SONG et al., 2019). Na Austrália, que é um dos países que mais desenvolve tecnologias e estudo sobre esse tipo de dormente, os dormentes de aço representam apenas 13% de todos os dormentes instalados no país (MANALO et al., 2010).

2.4.3 Dormentes de Polímero

Figura 10 – Dormentes de polímero



Fonte: <http://vtwctr.org/explore/structural-composite-plastic-material/>.

Os dormentes produzidos com material polimérico (Figura 10) vêm ganhando cada vez mais espaço nas ferrovias. Um dos fatores que torna esse dormente uma alternativa técnica de sucesso é o fato de ser uma peça prismática idêntica ao dormente de madeira e suas propriedades de manuseio serem praticamente iguais. (STEFFLER, 2013).

Com relação à resistência mecânica desse tipo de dormente, os primeiros estudos mostraram que os dormentes de polímero reforçados com enxertos de fibras podem apresentar uma melhora considerável nas suas propriedades físicas e mecânicas (MANALO et al., 2010). No Japão, dormentes de polietileno acrescidos de fibra de vidro foram projetados para obter propriedades mecânicas superiores às da madeira e com uma vida útil estimada em 60 anos (MIURA et al., 1998). Também foram realizados estudos com a produção de dormentes com a utilização de plásticos reciclados, onde estes se mostraram com resistências equivalentes às dos dormentes de madeira (HOGGER, 2000).

Além do mais, estudos mais recentes apontam como as principais vantagens dos dormentes de polímero a sua elevada vida útil, sua baixa condutibilidade elétrica e o seu viés sustentável, uma vez que pode ser produzido por meio de plástico reciclável (FERRO; HARKNESS; LE PEN, 2020). No que tange às desvantagens, pode-se dizer que o custo muito

elevado da tecnologia de dormentes compósitos é uma das principais razões para sua absorção lenta ao mercado (FERDOUS; MANALO, 2014). Outro fator que faz com que o dormente de polímero tenha uma aceitação limitada é a inexistência de um histórico de desempenho de longo prazo, já que se trata de uma tecnologia relativamente recente.

2.4.4 Dormentes de Concreto

Figura 11 – Dormente de concreto protendido



Fonte: <http://www.railway-fasteners.com/concrete-sleeper.html>.

Os dormentes de concreto (Figura 11) passaram a ser utilizados com mais frequência por causa da escassez de madeiras de boa qualidade e aos inconvenientes apresentados pelos dormentes de aço (BRINA, 1988). Os primeiros dormentes de concreto eram feitos de concreto armado e possuíam a mesma forma dos dormentes de madeira, constituídos de um bloco de concreto com seção constante. Em contrapartida, seu desempenho em campo não foi satisfatório, pois os choques e vibrações produzidas pelas cargas dinâmicas dos trens causavam fissuras que davam origem, frequentemente, a verdadeiras rupturas, em razão da sua limitada resistência à tração (HWANG et al., 2011).

Nesse sentido, com o advento do concreto protendido e a evolução da tecnologia do concreto, foi possível produzir peças que atingissem níveis de resistência mais altos e com uma maior durabilidade. Soma-se a isso, a utilização de projetos de dormentes com seções otimizadas e mais econômicas para um maior aproveitamento do material.

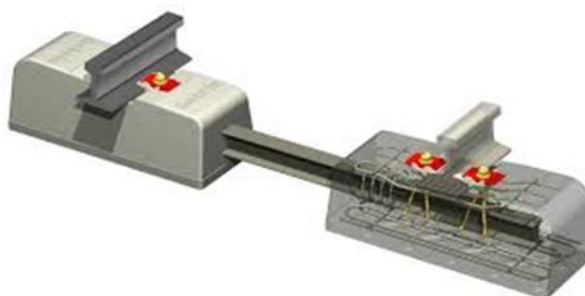
Assim, os dormentes de concreto são classificados, quanto à sua forma em dois tipos:

- a) **Dormente bibloco** - dormente composto por dois blocos de concreto interligados por um perfil metálico (Figura 12).

De forma geral, os dormentes biblocos apresentam bons resultados em ferrovias de até 25 toneladas por eixo, não sendo indicados para ferrovias de grande volume de tráfego (heavy haul). Isso ocorre pelo fato de esse tipo de dormente possuir menor área de contato com a brita, sendo então, mais sujeito a sofrer desnivelamentos (CHANDRA, 2007).

Além disso, esse tipo de dormente já foi muito utilizado em ferrovias no passado, tendo sido ultrapassado, no entanto, pela opção do monobloco, que corresponde por mais 80% dos dormentes de concreto produzidos atualmente (FIB, 2006).

Figura 12 – Dormente do tipo “bi-bloco”



Fonte: DNIT (2016).

- b) **Dormente Monobloco** - dormente composto por uma viga monolítica de concreto. E em decorrência das experiências negativas com o concreto armado, atualmente ele é fabricado apenas com concreto protendido (TAHERINEZHAD et al., 2013). Os dormentes monoblocos de concreto protendido são a escolha mais utilizada pela maioria das novas ferrovias de tráfego pesado. A norma brasileira que especifica os requisitos para o projeto e a fabricação dos dormentes de concreto é a NBR 11709:2015.

Diante disso, as principais vantagens da utilização dos dormentes de concreto protendido são sua elevada resistência mecânica, possuindo elevado desempenho sob condições de tráfego severas; o dormente de concreto também possui uma boa estabilidade, com resistência à movimentação longitudinal e transversal, e uma durabilidade estimada em 50 anos. (MANALO et al., 2010; TAHERINEZHAD et al., 2013).

Com relação à questão ambiental, de acordo Crawford (2009), as emissões de gases do efeito estufa relacionadas ao ciclo de vida do dormente de concreto protendido é até seis vezes menor que os emitidos no ciclo de vida do dormente de madeira (extração, serraria, transporte e outros).

Em contrapartida, entre as desvantagens do dormente de concreto em relação aos dormentes de madeira está o seu peso e custo elevado. Os dormentes de madeira pesam em média 100 kg, enquanto os dormentes de concreto 300 kg. Essa diferença faz com que o

manuseio, a instalação e a reposição se tornem mais difíceis e onerosas. O custo inicial de aquisição do dormente de concreto é cerca de duas vezes maior que o da madeira (MANALO et al., 2010).

O Quadro 2 resume as principais vantagens e desvantagens de cada um dos tipos existentes de dormentes ferroviários. Observa-se que apesar de o dormente de madeira apresentar muitas qualidades, suas desvantagens dificultam sua utilização em novos projetos ferroviários, principalmente no que tange à baixa disponibilidade de madeira de qualidade.

De modo geral, ao redor do mundo há um crescente interesse na utilização de dormentes de concreto protendido. A experiência tem indicado que a aplicação de dormentes de concreto resulta em vias de qualidade estrutural superior, de melhor estabilidade e desempenho e reduzida manutenção.

O número total de dormentes no mundo é em torno de 3 bilhões, dos quais mais de 400 milhões são dormentes de concreto, um número que cresce a cada ano, uma vez que os dormentes de madeira vêm sendo substituídos cada vez mais pelos de concreto (NABAIS, 2014).

Quadro 2 – Vantagens e Desvantagens dos principais tipos de dormentes

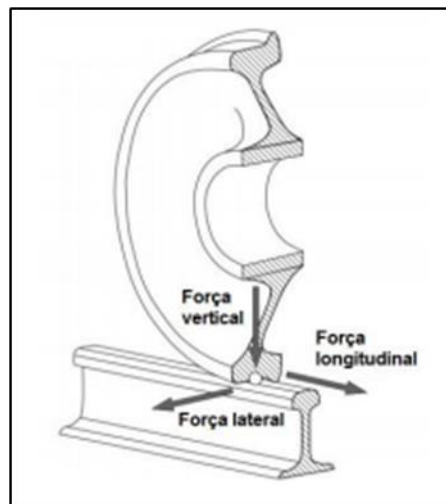
Tipo de Dormente	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Madeira	-Alta Resistência a fadiga -Resiliência ao descarrilamento -Baixo peso -Boa Manutenibilidade -Baixa condutibilidade elétrica -Boa interação com o lastro	-Suscetibilidade a degradação biológica -Baixa disponibilidade de madeiras de qualidade -Baixa resistência ao fogo
Aço	-Elevada vida útil -Excelente resistência mecânica -Boa estabilidade com o lastro -Reciclável após via útil	-Suscetibilidade a oxidação e outros ataques químicos. -Alto custo de aquisição -Alta condutibilidade elétrica
Polímero	-Elevada vida útil -Propriedades mecânicas superiores aos dormentes de madeira -Baixa condutibilidade -Ecologicamente sustentável	- Alto custo de aquisição -Baixa resistência ao fogo - Ausência de histórico de desempenho para longo prazo.
Concreto	- Elevada resistência mecânica -Boa estabilidade -Alta durabilidade	-Peso elevado -Manutenção mais onerosa - Baixa resistência ao descarrilhamento

Fonte: O Autor (2022).

2.5 AÇÕES ATUANTES NA FERROVIA

A compreensão da origem e magnitude das forças aplicadas à via permanente constitui-se passo fundamental para o correto dimensionamento e análise da estrutura ferroviária. Forças verticais, laterais e longitudinais (Figura 13) atuam de forma simultânea e são distribuídas irregularmente ao longo da ferrovia, tornando-se uma tarefa difícil quantificá-las. As solicitações provenientes da complexa combinação de cargas estáticas e dinâmicas são repassadas à infraestrutura por meio da interface dormente-lastro, previamente tendo percorrido o sistema de interação roda-trilho-dormente da superestrutura (INDRARATNA et al., 2011).

Figura 13 – Forças atuantes na ferrovia



Fonte: Alves (2018).

Na perspectiva de Brina (1988), Nabais (2014) e Steffler (2013), as forças exercidas na via durante a condução de um veículo ferroviário podem ser classificadas, dependendo da direção, da seguinte forma:

2.5.1 Esforços verticais

- a) **Carga estática** - é a carga originada pelo peso dos veículos e máquinas especiais que trafegam na linha férrea. O Quadro 3 exemplifica a carga por eixo de alguns tipos de veículos ferroviários;

Quadro 3 – Carga por eixo para diferentes tipos de veículos ferroviários

Tipo de veículo	vazio	carregado
VLT (Veículo leve sobre trilhos)	50-80 kN	70-100 kN
Vagão de passageiro	100-150 kN	120-170kN
Locomotiva	215 kN	-
Vagão de carga	120 kN	225 kN
Vagão <i>Heavy Haul</i>	120 kN	250-350 kN

Fonte: adaptado de Esveld (2001).

- b) **Força centrífuga vertical** - força oriunda dos movimentos de rotação seja em curvas verticais ou horizontais;
- c) **Irregularidades na via** - de maneira geral, qualquer defeito na linha férrea gera uma sobrecarga na distribuição de cargas verticais.

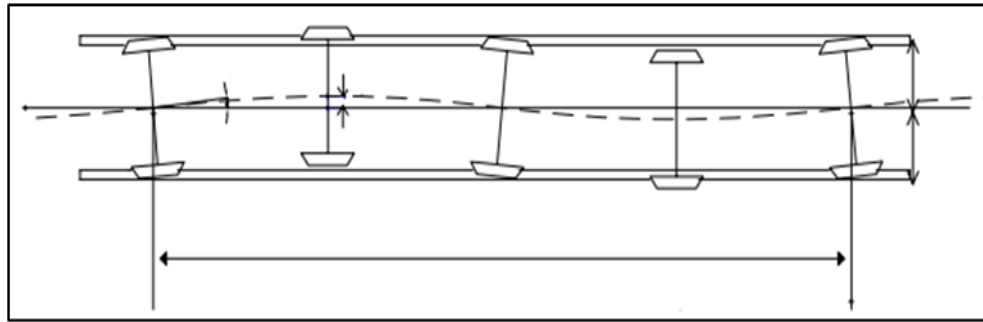
2.5.2 Esforços Longitudinais

- a) Dilatação/Retração - o aumento ou diminuição da temperatura dos trilhos pode gerar tensões de compressão e tração nos trilhos;
- b) Aceleração/Frenagem - a aceleração e frenagem dos trens produz nos trilhos uma força de atrito, longitudinal e no sentido do movimento;
- c) Caminhamento da via - denominação utilizada para o fenômeno no qual o trilho se desloca longitudinalmente da sua posição inicial ou quando o trilho e o dormente se afastam da sua posição em relação ao lastro (STEFFLER, 2013).

2.5.3 Esforços Transversais

- a) Força Centrífuga - nas curvas, a força centrífuga, não compensada pela superelevação do trilho externo, produz um esforço transversal no referido trilho;
- b) Vento - como o material rodante oferece uma superfície exposta considerável, o vento pode criar um esforço no sentido transversal à linha;
- c) Movimento de “lacet” - é um movimento causado pelo próprio jogo da via ou por alguma irregularidade do alinhamento ou do material rodante e que faz com que as rodas se choquem, alternadamente, com os trilhos no sentido de provocarem alargamento da bitola (Figura 14). (BARBOSA; COSTA NETO, 1997).

Figura 14 – Movimento de “lacet”



Fonte: Barbosa e Costa Neto (1997).

2.5.4 Ações dinâmicas

Em uma situação ideal, em que os elementos da superestrutura ferroviária e material rodante estão livres de defeito, o contato de metal com metal da roda ao trilho é suave, de forma que a influência do tempo nas forças atuantes nos trilhos pode ser considerada como insignificante. Em tais condições, uma análise estática dos vários efeitos é adequada (PROFILLIDIS, 2014).

Tanto na roda quanto no trilho, porém, ocorrem defeitos e discontinuidades que causam cargas dinâmicas adicionais à roda e ao sistema ferroviário. Essas cargas dinâmicas adicionais causam vibrações nas estruturas, que podem não só danificá-las como também provocar fadiga em seus materiais e afetar a utilidade destas no que se refere ao conforto de seus usuários e ao funcionamento de equipamentos suportados por elas (KAEWUNRUEN et al., 2019). As ações dinâmicas são incorporadas aos projetos ferroviários por meio da utilização de um coeficiente de majoração das cargas estáticas, conhecido como coeficiente dinâmico.

Dyk et al. (2017) analisaram as fórmulas de cálculo de coeficiente dinâmico desenvolvidas por diferentes pesquisadores e normas de diferentes países, comparando os resultados obtidos entre eles. Foi observado que, em geral, cada norma apresenta uma fórmula de cálculo própria para obtenção do coeficiente dinâmico, sendo o principal parâmetro para essa definição a velocidade. Algumas normas levam em conta ainda fatores como situação de manutenção da via permanente ou diâmetro da roda do trem para calcular o coeficiente dinâmico. Para baixas velocidades (<80km/h), a maioria das normas e pesquisas convergem para valores de coeficiente dinâmico próximos a 1.3 para o coeficiente dinâmico, já para altas velocidades as normas apresentam valores divergentes, com o coeficiente de majoração variando de 1.5 a 3.5. (DYK et al., 2017).

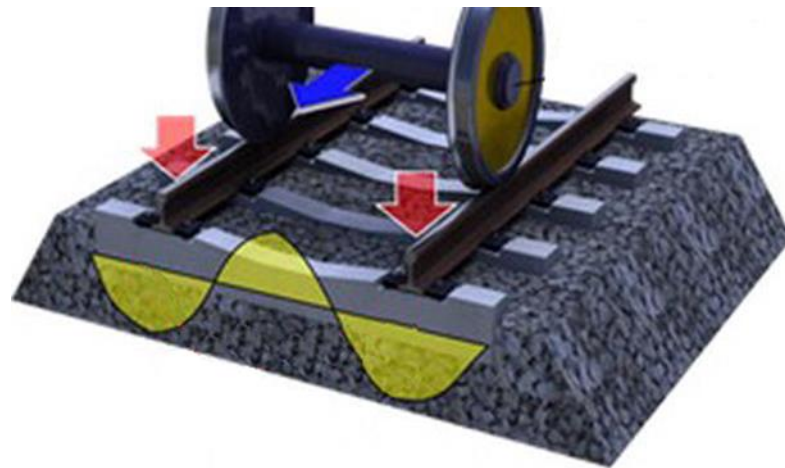
Watanabe et al. (2020) realizaram medições de carga em dormentes de concreto protendido em um trecho ferroviário que estava há dois anos sem qualquer tipo de manutenção a fim de verificar o efeito das irregularidades da via na majoração das cargas estáticas e comparar com o coeficiente dinâmico estabelecido pelas normas japonesas (em geral, coeficiente dinâmico de 2.0). Concluíram que, apesar de o desgaste nos trilhos e comprometimento do apoio dos dormentes de concreto amplificarem significativamente as cargas medidas, um coeficiente dinâmico igual 2.0 é aceitável para ferrovias com velocidade de até 80km/h.

Paras as ferrovias brasileiras, cujas velocidades máximas geralmente não ultrapassam os 100 km/h, a norma brasileira sobre dormentes de concreto, NBR11709:2015, orienta a se considerar um incremento dinâmico de projeto que varia de 1.5 a 4.0, a depender da velocidade e da tonelagem bruta do trem.

2.6 DIMENSIONAMENTO DOS DORMENTES

O projeto estrutural dos dormentes de concreto consiste basicamente no dimensionamento à flexão de suas seções transversais principais, uma vez que, devido ao tipo de carregamento e do apoio elástico distribuído sobre o lastro, os demais esforços solicitantes resultam em tensões pouco significativas frente àquelas geradas pelos momentos fletores (Figura 15). Nesse caso, são consideradas como “seções transversais principais” as seções da região de apoio dos trilhos e do centro do dormente (ABNT, 2015; EDWARDS et al., 2020; TAHERINEZHAD et al., 2013).

Figura 15 – Diagrama de momento fletor típico durante passagem do trem



Fonte: adaptado de Matsuoka e Watanabe (2019).

Para fins de dimensionamento estrutural, o dormente é considerado como uma viga sobre uma base elástica (lastro, sublastro) que recebe a carga proveniente do material rodante. Em geral, a primeira etapa para o dimensionamento é a definição da carga de projeto que será aplicada ao dormente, que é a carga estática do material rodante multiplicada por fatores amplificadores de carga, como o coeficiente dinâmico abordado no item 2.5.4, e fatores de atenuação de carga como o fator de distribuição de carga. Esse último é um fator utilizado para se levar em consideração o fato de que a carga proveniente do material rodante é distribuída, por intermédio dos trilhos, sobre vários dormentes e a intensidade de carga que cada dormente recebe depende basicamente do espaçamento entre os dormentes, das propriedades do lastro, do sistema de fixação dos trilhos e da rigidez dos trilhos (AREMA, 2014).

Em seguida, é calculado o momento fletor de projeto. A maior parte das normas sobre dimensionamento de dormentes apresentam métodos bem definidos para a obtenção desse momento fletor, sendo calculado primeiramente o momento positivo no apoio do trilho e então definidos os secundários (momento positivo e negativo no centro do dormente e momento negativo no apoio do trilho).

Assim, na norma americana (AREMA, 2014), por exemplo, o valor do momento de projeto é obtido por meio da utilização de um ábaco e depende apenas do espaçamento entre os dormentes, velocidade de tráfego e tonelagem bruta anual. Já a norma brasileira NBR 11709:2015 e a australiana (AS 1085.14) apresentam um método de cálculo bem definido, com fórmulas para obtenção do momento de projeto. Existem ainda normas que não definem uma maneira de cálculo específico para a obtenção do momento de projeto, como a norma europeia EN 13230-1 deixando a cargo do comprador essa especificação, que pode ser obtido por meio de testes dinâmicos experimentais em campo ou cálculo teórico.

De maneira geral, a atual metodologia de cálculo e análise estrutural de dormentes ferroviários vem sendo criticada como inadequada para projeto e avaliação das reais condições a que o dormente está submetido por se tratar de um método de abordagem simplificada e baseado em muitas premissas, principalmente com relação a consideração dos efeitos dinâmicos (LEONG; MURRAY, 2008; SADEGHI, 2008). Os atuais métodos de dimensionamento de dormentes são de fácil compreensão, entretanto possuem uma precisão questionável e muitos trabalhos mostram que ainda há potencial para que os métodos de dimensionamento de dormentes de concreto protendido sejam significativamente melhorados por meio, principalmente de pesquisas experimentais (SADEGHI, 2008, 2010; TAHERINEZHAD et al., 2013; WOLF, 2015; YOU; LI; KAEWUNRUEN, 2018).

2.7 RESUMO

Há registros da utilização de guias para facilitar o transporte de cargas e pessoas desde a época do Império Romano (século V). Porém, a ferrovia, como conhecida hoje, com utilização de trilhos e locomotivas, só começou a se desenvolver após a Primeira Revolução Industrial. As ferrovias resolveram um problema crucial da humanidade no século XIX: a falta de meios de transporte e a necessidade de comunicação rápida e eficiente, tendo tido um importante papel no estímulo à política, economia desenvolvimento físico e social no século XIX.

No Brasil, as primeiras ferrovias (inauguradas no século XIX) desempenharam papel decisivo no escoamento de produtos agrícolas brasileiros – sobretudo o café – do interior para os portos. O país chegou a possuir 36.00 km de trilhos em operação, porém com a crise do setor agroexportador, a expansão do setor rodoviário e a falta de políticas de estímulo à ferrovia, o setor ferroviário entrou em crise que se estendeu até o início do século XXI. O governo federal, nos últimos anos, vem trabalhando de forma a aumentar a participação do modal ferroviário na matriz de transportes do Brasil, que atualmente é de apenas 15%.

Assim, a ferrovia é usualmente composta pelo conjunto dos sistemas fixos (via permanente, construções, sistema elétrico e de sinalização) e seu material rodante (trens e veículos de manutenção). O desenho básico dos principais componentes da ferrovia (trilhos, dormentes, fixações, lastro e outros) tem se mantido muito semelhante ao longo dos anos, evoluindo apenas em seus componentes, de acordo com o avanço das tecnologias de materiais.

Os dormentes são os componentes da via permanente posicionados entre os trilhos e o lastro de brita, e têm como principal função servir de suporte firme para os trilhos, recebendo e transmitindo para o lastro os esforços produzidos pelos veículos ferroviários. Além disso, ele garante o correto distanciamento entre os trilhos (bitola) e garante a estabilidade lateral e longitudinal da Via Permanente.

Existem vários tipos de dormentes (madeira, polímero, aço e concreto) e cada um deles possui características diferentes quanto à durabilidade, ao custo, ao desempenho e à resistência mecânica. No passado, o dormente de madeira de lei era o tipo mais utilizado para aplicação em ferrovias. Porém, o desenvolvimento da tecnologia e o crescimento exponencial dos mercados em todo o mundo fez aumentar as exigências com relação ao desempenho do dormente. Cada vez mais, tem-se optado pela utilização dos dormentes de concreto protendido, em razão, principalmente da sua elevada resistência mecânica e durabilidade.

Nesse sentido, a compreensão da origem e magnitude das forças aplicadas à via permanente constitui-se passo fundamental para o correto dimensionamento dos dormentes. Eles estão submetidos a forças verticais, laterais e longitudinais que atuam de forma simultânea e são distribuídas irregularmente ao longo da ferrovia. Para fins de dimensionamento estrutural, o dormente é considerado como uma viga sobre uma base elástica (lastro, sublastro) que recebe a carga proveniente do material rodante. De maneira geral, a atual metodologia de cálculo e análise estrutural de dormentes ferroviários vem sendo criticada como inadequada para projeto, por não considerar as reais condições a que o dormente está submetido.

3 DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO

Neste capítulo será apresentado o estado da arte sobre os dormentes de concreto protendido, com foco no histórico da evolução desse tipo de dormente, os principais sistemas de produção dos dormentes e uma apresentação detalhada dos principais materiais utilizados na produção dos dormentes de concreto protendido.

3.1 HISTÓRICO

Desde o final do século XIX, já se buscavam alternativas para substituir os dormentes de madeira, com o objetivo principal de se encontrar um dormente com maior resistência mecânica e durabilidade. O primeiro projeto de dormente de concreto armado data de 1884 e pertence ao francês Monier, alguns anos depois, vários países da Europa e o Estados Unidos começaram a utilizar em caráter experimental dormentes de concreto. (BASTOS, 1999).

De um modo geral, os primeiros testes realizados com dormentes de concreto armado conduziram a resultados de desempenho estrutural insatisfatórios, de forma que as vantagens de durabilidade e desempenho obtidos não compensaram a utilização de dormentes de concreto quando comparados com os de madeira. (FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON (FIB), 1987; TAHERINEZHAD et al., 2013).

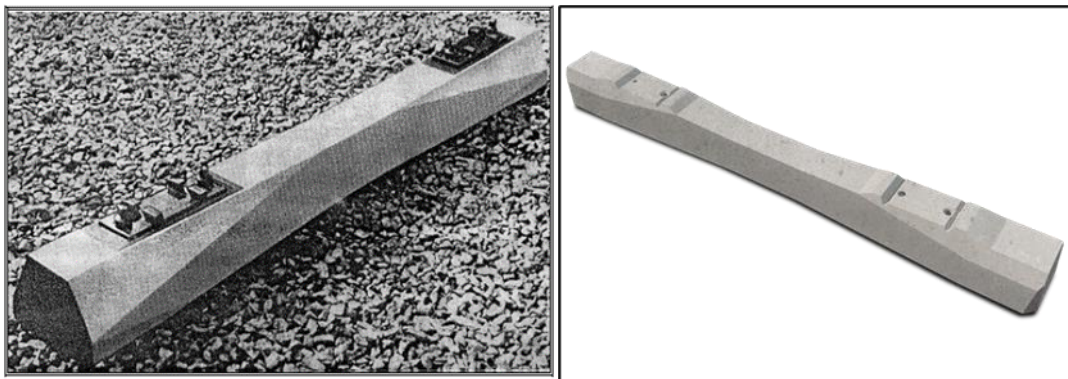
Os dormentes de concreto só começaram a se popularizar a partir da década de 1940 nos pós-Segunda Guerra Mundial em razão da necessidade de reconstrução das ferrovias destruídas na guerra e da escassez e elevado preço da madeira na época (VENUTI, 1980). Soma-se a isso o desenvolvimento do concreto protendido, que surgiu como uma solução técnica economicamente viável para produção de novos dormentes. O impacto do surgimento do dormente protendido foi tamanho, que a (ABCP, 1960) divide o desenvolvimento histórico dos dormentes de concreto em 2 etapas, antes e depois de 1940.

O primeiro projeto de dormente de concreto protendido surgiu na Inglaterra em 1943. O dormente recebeu o nome de DOW-MAC, tinha um comprimento total de 2,60 m, altura de 20 cm sob os trilhos e 12,5 cm na parte central, e pesava 240 kg. A armadura de protensão por aderência era constituída por 20 fios lisos de 5 mm de diâmetro, sendo cada fio tracionado com uma força de 22 kN; a força total de pré-compressão alcançava a 440 kN. Nessa mesma época, na Alemanha, era desenvolvido o dormente monobloco de concreto protendido conhecido como B2. Este era constituído de 56 fios de aço com diâmetro de 2,5 mm e torcidos aos pares. Após os primeiros anos de utilização dos dormentes de concreto

protendido na via, notou-se que eles apresentavam um desempenho muito superior ao dormente de concreto armado, pois além de conferirem maior estabilidade à linha férrea, possuíam uma maior durabilidade e menor necessidade de manutenção. (BASTOS, 1999).

Com o tempo, surgiram novos modelos, com modificações sucessivas no desenho do dormente e na armadura de protensão que foram evoluindo tecnicamente juntamente com a evolução da tecnologia do concreto. O modelo alemão por exemplo, evoluiu do B2 para o B70 passando pelos modelos B6, B9, B12, B61, B62, B53, B55, B 58 e B63. O B70 (Figura 16) atualmente é utilizado em diversas ferrovias do mundo, inclusive no Brasil.

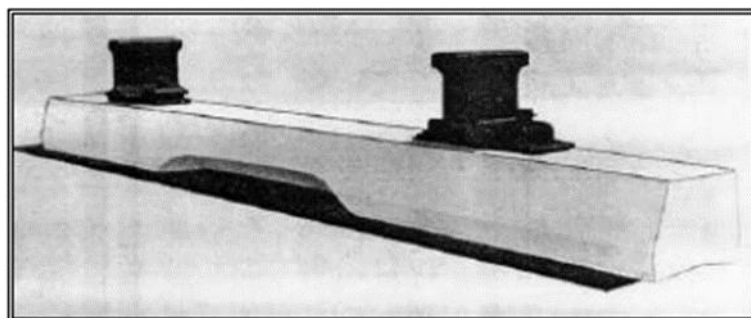
Figura 16 – Dormente alemão modelo B 55 e B70, respectivamente



Fonte: Neumann (1963 apud BASTOS, 1999).

Nos Estados Unidos, o início da utilização do dormente de concreto protendido foi um pouco mais lento, principalmente devido à grande oferta de madeira existente no país e pelo aperfeiçoamento das técnicas de aumento da durabilidade dos dormentes de madeira. Somente a partir de 1957, a Association of American Railroads (AAR), impulsionada pelo sucesso dos dormentes de concreto protendido na Europa, decidiu investir nesse tipo de dormente para as ferrovias norte-americanas. A AAR se baseou na revisão de práticas já consolidadas em ferrovias europeias e desenvolveu 5 tipos de protótipos de dormentes: A, B, C, D e E (Figura 17). (ZEMAN, 2010).

Figura 17 – Dormente de concreto protendido modelo E da AAR



Fonte: Neumann (1963 apud BASTOS, 1999).

No ano de 1965, já existiam cerca de 400 mil dormentes de concreto protendido instalados nas ferrovias dos Estados Unidos. Foi observado, porém, que muitos desses dormentes apresentaram falhas tais como fissuras de flexão na seção central e na região de apoio dos trilhos e problemas de fixação. Segundo Taylor (1996 apud BASTOS, 1999), no projeto desses dormentes foi assumida uma carga de eixo menor do que as então existentes, que não refletia todas as cargas a que o dormente estaria submetido. Esses problemas foram posteriormente corrigidos pelas especificações da American Railroad Engineering and Maintenance Association (AREMA).

A Tabela 4 reúne informações sobre o quantitativo e a proporção de utilização dos dormentes de concreto protendido (comparado ao quantitativo total de dormentes de todos os tipos) em alguns países do mundo. Observa-se que embora os Estados Unidos possuam a maior malha ferroviária do mundo, com 293.560 quilômetros de ferrovia (ANTF, 2020), os dormentes de concreto protendido representam apenas 5% dos dormentes instalados nas ferrovias norte-americanas, isso se justifica pelo fato de a indústria de silvicultura do país ser umas das maiores do mundo. Já na maioria dos países da Europa, onde a disponibilidade de madeira é reduzida, o dormente de concreto representa uma parcela maior dos dormentes instalados nas ferrovias.

Quadro 4 – Utilização do dormente de concreto protendido em alguns países

País	Número total de dormentes de concreto em serviço (milhões)	Proporção de dormentes de concreto na malha ferroviária
Itália	38	87%
Espanha	24	80%
Rússia	110	74%
França	40	67%
Reino Unido	30	67%
Suécia	13	67%
Alemanha	40,2	58%
África do Sul	21,6	51%
Índia	72,7	45%
Romenia	12	30%
Brasil	6	12%
Estados Unidos	25	5%

Fonte: Adaptada de FIB (2006).

Apesar de, em 2006, os dormentes de concreto representarem apenas 12% dos dormentes instalados nas ferrovias brasileiras, esse número vem mudando de maneira significativa nos últimos anos pois muitas ferrovias de cargas estão substituindo os seus dormentes de madeira por dormentes de concreto protendido; os principais trens

metropolitanos do Brasil também utilizam predominantemente os dormentes de concreto. Além disso, projetos ferroviários mais recentes no Brasil, como o da Ferrovia Transnordestina, Ferrovia de integração Oeste-Leste (FIOL) e Ferrovia Norte-Sul (FNS) foram concebidos com a utilização de dormentes de concreto protendido.

3.2 SISTEMA DE PRODUÇÃO

Em função do sistema construtivo e do modo como a força de protensão é transferida para a seção de concreto, as peças protendidas classificam-se em: pré-tracionadas e pós-tracionadas.

Na pré-tração, a carga é aplicada nos cabos de protensão antes da concretagem. Após o concreto atingir resistência suficiente para suportar os esforços de protensão, é realizada a transferência de protensão da estrutura de apoio para o concreto, por meio da aderência entre o concreto e o fio de aço ou por meio de placas de ancoragem nas extremidades dos dormentes. Já no sistema de pós-tração, a protensão só é aplicada aos cabos após o endurecimento do concreto do dormente. A transferência da força de protensão é feita por meio das ancoragens terminais (ativas ou passivas) que ficam incorporadas na própria peça. (CHOLFE; BONILHA, 2013).

Além disso, a metodologia construtiva para a produção dormentes de concreto protendido pode variar bastante a depender do número de dormentes a serem produzidos, grau de automação empregado e disponibilidade de mão de obra (KOLLO, 2021; TANTIPIDOK; MCLAUGHLIN; ŠTEMBERK, 2014). Os principais sistemas empregados atualmente são:

3.2.1 Dormentes pré-tensionados

Os dormentes de concreto do tipo pré-tensionados podem ser fabricados por meio de 3 sistemas distintos, a saber:

3.2.1.1 Sistema “Long Line”

Este é o método mais tradicional e comum para a produção de dormentes de concreto protendido. Nesse sistema, os moldes dos dormentes são posicionados em sequência de forma que apresentam um aspecto de linha contínua (Figura 18). Essas linhas possuem comprimentos que variam de 8 a 80 dormentes. (FIB, 2006; UIC, 2004a).

Figura 18 – Sistema de produção long line



Fonte: <http://www.railwaymoulds.com/services.php>.

Os fios de protensão são tensionados e ancorados na extremidade de cada linha, o concreto é colocado nas fôrmas, e após o período de cura adequado, os cabos de protensão são liberados e a força de protensão é transferida para os dormentes por meio da aderência aço/concreto. Os fios de protensão são então cortados nas extremidades de cada dormente e os dormentes são retirados das fôrmas.

Dessa forma, o método long line quando comparado com outros métodos de produção, exige menos automação/tecnologia e mais serviços manuais, além disso a produção necessita de grandes áreas físicas para abrigar todas as camas de protensão (BEZGIN, 2017).

3.2.1.2 Sistema “Short Line”

Nesse método, os dormentes são posicionados em sequência, em linhas mais curtas de 2 a 8 dormentes. Os moldes ficam apoiados em “bancas de protensão” e a protensão é feita de maneira semelhante ao método long-line. Em alguns casos, a produção pode ocorrer em um “carrossel” com a estrutura e os moldes se deslocando entre estações de trabalho; as estações são fixas e cada uma é responsável por uma etapa da produção (protensão, concretagem, cura, liberação da protensão e desmoldagem). (FIB, 2006; UIC, 2004b).

3.2.1.3 Sistema “Single Mould”

Nesse método, a força de protensão é aplicada na extremidade de cada dormente (molde) individualmente (Figura 19). Assim, a transferência de protensão para o concreto é feita por meio de placas da ancoragem localizadas nas extremidades dos dormentes (Figura 20) (FIB, 2006; UIC, 2004b). Diferentemente do long line, em geral, esse sistema exige um maior nível de automação, com custo inicial de implantação mais altos.

Figura 19 – Sistema Single Mould



Fonte: <https://www.vollert.de/en/product-areas/solutions-for-precast-concrete-production/concrete-sleeper-production-plants/>.

Figura 20 – Placas de ancoragem de protensão



Fonte: Bezgin (2017).

3.2.2 Dormentes pós-tensionados

O sistema de produção dos dormentes pós-tensionados é semelhante ao “single mould”, com a diferença que os dormentes são concretados com dutos ao longo de seu comprimento, por onde ocorrerá passagem dos cabos de protensão (fios ou cordoalhas). (FIB, 2006; UIC, 2004b).

Independentemente do tipo de sistema de fabricação, o volume diário de produção dos dormentes está diretamente relacionado ao grau de automação e do número de moldes disponíveis na fábrica. Para que seja possível reaproveitar os moldes e operar vários turnos por dia, é muito comum a utilização da cura acelerada do concreto por meio do processo de cura a vapor (térmica), a fim de aumentar a velocidade de ganho de resistência do concreto, adiantando o desforme dos dormentes. Para isso, precauções devem ser tomadas para garantir que o calor seja introduzido de forma que a taxa de ganho de calor e a temperatura máxima do concreto não excedam os limites estabelecidos em norma.

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Nas seções posteriores estão descritas as principais características dos materiais utilizados na produção do dormente de concreto protendido.

3.3.1 Concreto

Diferentemente de outros elementos estruturais de concreto, os dormentes ferroviários são peças relativamente pequenas, que estão submetidas a grandes carregamentos estáticos e dinâmicos, e estão expostos diretamente às variações climáticas e intempéries da região onde estão instalados, estando, portanto, mais susceptíveis aos mecanismos de degradação física e química.

Nesse cenário, com o avançado desenvolvimento de redes de trens de alta velocidade ao redor do mundo, sobretudo na Europa e na Ásia, cada vez mais têm surgido estudos sobre a produção de dormentes de concreto protendido, a fim de desenvolver estruturas ferroviárias mais seguras, que poderiam atender a maiores demandas de carregamento e durabilidade.

Diante disso, as normas regulatórias do setor ferroviário vêm estabelecendo exigências cada vez mais rígidas quanto à qualidade do concreto, exigindo-se, em geral, a utilização de concretos de alto desempenho (High Performance Concrete). Dentre as vantagens desse tipo

de concreto está o fato de possuir maior resistência à compressão e maior durabilidade do que o concreto convencional, mantendo uma trabalhabilidade adequada (ACI COMMITTEE 363, 1997).

O Apêndice A apresenta um quadro com detalhes dos principais trabalhos experimentais já publicados envolvendo dosagem de concreto de alto desempenho e ultra alto desempenho para dormentes de concreto protendido.

Em essência, o princípio básico para confecção de um Concreto de Alto Desempenho está fundamentado na diminuição da porosidade do concreto, por meio da modificação da estrutura dos poros (tipos, tamanhos e distribuição). Para atingir tal objetivo, as seguintes ações são necessárias:

- a) diminuição da relação água/aglomerante e da quantidade total de água por m^3 , através do uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes;
- b) otimização da granulometria dos agregados para se obter maior compacidade.
- c) reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas, pelo uso de adições minerais que provocam o refinamento dos poros e dos grãos, especialmente do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A NBR 11709:2015 (Dormente de concreto – Projeto, materiais e componentes) estabelece que os dormentes devem ser projetados para classe de agressividade IV (muito forte) e a resistência característica do concreto não pode ser inferior a 45 MPa para os dormentes de concreto protendido, com uma relação água/cimento não superior a 0,38 e um consumo mínimo de cimento de 350kg/m³. Essas exigências estão alinhadas com as principais normas ferroviárias do mundo, entre elas a europeia EN 13230:2009 e a americana AREMA (2014), conforme Quadro 5.

Quadro 5 – Comparação entre as principais normas ferroviárias

Parâmetro	EN 13230:2009	AREMA:2014	NBR 11709:2015
Relação água/cimento máxima	0,45	0,40	0,38
Resistência a compressão mínima	45 MPa	48 MPa	45 MPa
Consumo de cimento mínimo	300kg/m ³	-	350kg/m ³

Fonte: O Autor (2022).

Ao se analisar os trabalhos apresentados no Apêndice A, observa-se que em praticamente todos os trabalhos experimentais o concreto desenvolvido atingiu resistência a compressão (aos 28 dias) superior a 45MPa e relações água/ligante variando entre 0,17 e 0,44. Conforme esperado, os concretos com menor relação água/ligante foram os que apresentaram uma maior resistência à compressão. Na maior parte dos trabalhos foi adicionado algum outro

tipo de ligante (adições minerais) em substituição parcial do cimento, de forma que o consumo de ligante em geral ficou entre 350 e 550 kg/m³.

Nessa direção, para garantir que os dormentes sejam duráveis o suficiente, alguns cuidados adicionais devem ser tomados, desde a seleção do material, passando pelo processo de produção e cura, manuseio, instalação e manutenção. O uso de adições minerais, aditivos químicos, reforço com fibras, a avaliação da reatividade dos agregados, teor de enxofre no cimento, qualidade da água de amassamento e o estudo de diferentes tipos de dosagens são as principais estratégias dos pesquisadores que tentam aumentar a durabilidade dos dormentes. (AREMA, 2014; TAHERINEZHAD et al., 2013).

Dessa forma, por causa da necessidade de se manter a bitola correta entre os trilhos, os dormentes de concreto devem ser projetados e produzidos em níveis de precisão dimensional mais elevados do que os elementos estruturais de concreto típicos, como vigas, lajes e colunas. A obtenção dessa precisão proporciona a operação segura e confiável dos serviços ferroviários (BEZGIN, 2021).

Bezgin (2017) também esclarece que um dos principais cuidados que deve ser tomado durante a concretagem dos dormentes é quanto ao processo de vibração do concreto, visto que o excesso de vibração pode ocasionar uma segregação e assentamento dos agregados em direção a face superior do dormente (usualmente o dormente é concretado de cabeça para baixo). Essa situação pode resultar em uma matriz de concreto mais frágil, facilitando a formação de fissuras na superfície inferior do dormente na região de apoio dos trilhos (Figura 21), que são as regiões que desenvolvem maior tensão de tração durante a passagem do trem. (BEZGIN, 2017).

Figura 21 – Diferença da distribuição dos agregados ao longo da seção do dormente



Fonte: Bezgin (2017).

3.3.2 Cimento

Para se produzir Concretos de Alto Desempenho, recomenda-se a utilização de cimentos o mais puro possível, visto que a quantidade de pozolanas a serem adicionadas na mistura será grande e de qualidade superior às incorporadas nos cimentos comerciais, como a cinza volante e a escória alto-forno. Por isso, sem levar em conta o tamanho das partículas, os cimentos Portland comum e cimento Portland de Alta Resistência Inicial são os mais recomendados (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Ao se analisar os trabalhos apresentados no Apêndice A, observa-se que os tipos de cimento mais utilizados foram de fato o cimento Portland comum e de Alta Resistência Inicial, com prevalência deste último. Para o caso específico da produção de dormentes de concreto protendido, o uso do cimento de Alta Resistência Inicial se justifica pela necessidade de alta resistência do concreto nas primeiras idades como forma de atender a velocidade do ciclo de produção dos dormentes. Em geral, esse tipo de cimento é um cimento mais fino (maior superfície específica), com maiores níveis de silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) e de aluminato tricálcico (C_3A) (RIBEIRO, 2021; TAYLOR, 1997).

Assim, o C_2S e C_3S têm um papel dominante na determinação das características de endurecimento da pasta de cimento e, conseqüentemente, no desenvolvimento da resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O C_3A também está associado ao rápido endurecimento do cimento, porém pode ocasionar uma redução da eficiência de alguns tipos de superplastificantes, afetando comportamento reológico das pastas cimentícias, com redução na fluidez e rápida perda da trabalhabilidade (CATARINO, 2012; COLLEPARDI et al., 1999; GUTIERREZ; CANOVAS, 1996).

Desse modo, as normas ferroviárias estabelecem também critérios quanto aos níveis de álcalis e presença de SO_3 no cimento a ser utilizado na produção do dormente de concreto protendido, a fim de garantir uma maior durabilidade aos dormentes. O teor de Na_2O equivalente ($Na_2O + 0,658 K_2O$) do cimento deve ser o mais baixo possível, não ultrapassando o valor de 0,6%, de forma a minimizar a chance de reação álcali agregado (RAA). Já o teor máximo de SO_3 no cimento deve ser compatível com o processo de cura adotado para os dormentes (ABNT, 2015; AREMA, 2014). Os elevados níveis de SO_3 podem contribuir de maneira significativa para a formação da etringita tardia, patologia comumente conhecida como DEF (COSTA, 2018; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Sabe-se, hoje, que a indústria cimenteira é responsável por cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO_2 no meio ambiente, contribuindo significativamente para o

aquecimento global (WBCSD, 2012). Em razão disso, pesquisas mais recentes levantaram a necessidade de redução cada vez maior do uso de cimento Portland na fabricação dos dormentes de concreto. Como solução para o problema, esses estudos propõem o aumento da utilização de adições minerais em substituição ao cimento Portland e também a utilização de concretos geopoliméricos sem qualquer utilização de cimento Portland (GOURLEY; JOHNSON., 2005; KOH; HWANG, 2013). A produção do concreto geopoliméricos pode reduzir a emissão de CO₂ em mais de 70% comparado com o concreto convencional e ter uma durabilidade, resistência mecânica e vida útil comparável ou até mesmo superior ao concreto de cimento Portland, tornando confiável sua utilização em larga escala (AMORIM JUNIOR, 2020).

3.3.3 Agregados

À medida que se eleva a resistência do concreto pelo aumento da resistência da pasta e da zona de transição, a qualidade do agregado começa a ter uma influência relativa cada vez mais significativa. Os agregados devem ter elevada resistência e propriedades elásticas similares à pasta de cimento, no intuito de reduzir as deformações diferenciais, geradas entre as duas fases. A depender de sua qualidade, o agregado pode em alguns casos se tornar o fator limitante da resistência do concreto (ANDRADE, 2001; CETIN; CARRASQUILLO, 1998; WU et al., 2001).

Parâmetros importantes do desempenho estrutural do dormente de concreto protendido como módulo de elasticidade e resistência à tração do concreto estão diretamente relacionados ao tipo de agregado utilizado. Em geral, são preferíveis para dormentes a utilização de agregados provenientes de rochas de origem ígnea, como o basalto e granito, com alta resistência aos esforços mecânicos e à abrasão. Estudos mostram que os agregados graúdos provenientes de rochas de origem magmática conferem maiores resistências e módulo de elasticidade para concretos de alto desempenho estrutural, principalmente quando comparado com agregados de rochas calcárias (AGINAM; CHIDOLUE; NWAKIRE, 2013; GIACCIO et al., 1992; NETO; OLIVEIRA; RAMOS, 2011; WU et al., 2001).

No Apêndice A, é possível verificar que poucos são os trabalhos experimentais sobre dormentes de concreto protendido que especificam com clareza a origem mineralógica dos agregados utilizados. Dos 22 trabalhos constantes no quadro do Apêndice A, apenas 6 (Quadro 6) apresentaram um maior detalhamento quanto aos tipos de agregados utilizados e sua dimensão máxima. Dentre eles, prevaleceu o uso de agregados graúdos de origem

sedimentar (calcário e dolomita), o que demonstra que, apesar das rochas magmáticas serem preferíveis, não há impedimentos para utilização de agregados provenientes de rochas sedimentares ou metamórficas, principalmente se esse fato representar uma vantagem econômica para a produção dos dormentes.

Quadro 6 – Tipo dos agregados utilizados em trabalhos experimentais de dormentes de concreto

Referência	Resistência à Compressão (MPa)	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Dimensão máxima do agregado graúdo
(BASTOS, 1999)	58-63	areia natural	Brita (basalto)	19mm
(VAN DAM, 2014)	60-80	areia natural	Brita (calcário dolomítico)	19mm
(GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA; FERNANDEZ, 2017)	100	areia de rio (silicatos)	Brita (dolomita triturada) / agregado reciclado	10mm
(BEZGIN, 2017)	60-80	areia (calcário)	Brita (calcário)	15-22 mm
(SILVEIRA, 2018)	60	areia natural	Brita (gnaisse)	19mm
(BAE; PYO, 2020)	149-169	areia (sílica)	Brita (dolomita)	5mm

Fonte: O Autor (2022).

Outras características importantes dos agregados que também influenciam a resistência do concreto de alto desempenho são o seu tamanho, a sua forma e a sua textura superficial (CETIN; CARRASQUILLO, 1998). Quanto ao tamanho da partícula do agregado, existe um consenso que, para uma mesma relação água/cimento, à medida que se reduz o diâmetro das partículas do agregado graúdo, aumenta-se a resistência à compressão e à tração do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; XU et al., 2019). Agregados maiores tendem a formar uma zona de transição na interface mais fraca, contendo mais microfissuras. Segundo Aïtcin e Metha (1990) e Neville (1997), maiores resistências são obtidas quando o diâmetro máximo do agregado varia no intervalo de 10 a 14mm. Agregados de diâmetros menores possibilitam maior facilidade de lançamento e adensamento, redução da exsudação e segregação, apesar de exigirem maior quantidade de cimento e consequentemente um custo mais elevado (ANDRADE, 2001).

Com relação à forma dos grãos do agregado graúdo, essa é a característica que mais afeta a trabalhabilidade do concreto se mantidas as demais variáveis do traço. Os grãos cuboides do cascalho permitem trabalhabilidade muito superior à dos grãos lamelares e alongados do basalto. Os grãos de granito, se produzidos em britadores apropriados, ficam em posição intermediária (BAUER, 2018).

Ademais, os agregados utilizados na produção de concreto de Alto Desempenho devem também ser isentos de qualquer substância deletéria. A presença de argila, silte, pó decorrente da trituração e todas as formas de revestimento prejudicam o desenvolvimento das ligações cimento-agregado, acarretando redução na resistência do concreto. (AGINAM; CHIDOLUE; NWAKIRE, 2013).

Do ponto de vista da durabilidade, é essencial que os agregados apresentem baixo potencial de reatividade com os álcalis do cimento. A norma brasileira de dormentes de concreto (NBR 11709:2015) exige a realização de ensaio de reatividade álcali-agregado para os agregados. De maneira semelhante, a norma americana (AREMA) recomenda a realização de análise petrográfica e de reatividade dos agregados baseado nas normas da ASTM (C295 e 1260 / C1105).

Diante disso, alguns estudos experimentais vêm sendo realizados com a substituição de agregados naturais por outros tipos de agregados, a fim de tornar a produção dos dormentes de concreto protendido mais sustentável do ponto de vista ambiental. Dentre os principais materiais utilizados em substituição aos agregados tradicionais, estão a escória de alto forno, fragmentos de borracha e concreto reciclado.

Nessa direção, Gonzalez (2017) realizou estudos com a utilização de agregados de concreto reciclados na produção de dormentes de concretos protendido. Os agregados miúdos e graúdos foram obtidos por meio da trituração de dormentes de concreto rejeitados, que possuíam 3 anos de fabricados e um fck de projeto de 100MPa. Foram analisadas 3 misturas, uma com 100% de agregados naturais, outra com 50% de agregados reciclados substituindo os agregados naturais e uma terceira mistura com a utilização de 100% de agregados reciclados. Apesar de os dormentes produzidos com agregados reciclados terem apresentado uma resistência à compressão um pouco inferior ao concreto produzido com agregados naturais, as 3 misturas deram origem a dormentes que atenderam às exigências estruturais da Europa para dormentes de concreto protendido, não apresentando diferença significativa de desempenho estrutural. (GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA; FERNANDEZ, 2017).

Além disso, estudos experimentais sobre os agregados para dormentes de concreto protendido foram realizados também por Hameed e Shashikala (2016) com a substituição de 15% (fração volumétrica) de agregado fino por borracha de pneu triturada. O estudo mostrou que, apesar da redução da resistência à compressão dos dormentes produzidos com adição de borracha, houve um aumento na resistência à fadiga, bem como um aumento de 60% na

resistência ao impacto quando comparado aos dormentes de concreto protendido convencional.

De maneira semelhante, Raj et al. (2020) realizaram estudos com a utilização de concreto autoadensável na produção de dormentes com a substituição de 15% de agregado fino por borracha triturada, e obteve como resultado dormentes com capacidade de absorver energia de impacto até 40% maior que dormentes produzidos com concretos sem adição de borracha.

Os trabalhos de Meesit (2017) e Kaewunruen et al. (2018) também utilizaram restos de borracha de pneu triturado em substituição aos agregados tradicionais em dormentes de concreto e obtiveram resultados semelhantes aos descritos anteriormente, com o concreto apresentando uma redução na resistência à compressão, mas com um aumento significativo da resistência à flexão, melhora da capacidade de amortecimento e aumento da resistividade elétrica (KAEWUNRUEN et al., 2018; MEESIT; KAEWUNRUEN, 2017). Esses estudos mostram que a adição de borracha triturada ao concreto se mostra como uma boa solução para aumentar a resistência dos dormentes de concreto protendido em situações de impacto, como ocorre em descarrilamentos.

A escória de alto-forno também pode ser utilizada em substituição dos agregados do concreto. Zakeri et al. (2014) realizaram testes em concretos para dormente de concreto protendido produzido com a utilização de escória de alto-forno em substituição total ao agregado gráúdo tradicional e observou um aumento de 46% na resistência à compressão do concreto. Também foi verificado que os dormentes produzidos com esse tipo de agregado suportaram uma carga até 30% maior antes do surgimento da primeira fissura no teste de momento negativo no centro do dormente (ZAKERI et al., 2016). De maneira análoga, alguns estudos também mostraram que a utilização da escória de alto-forno em substituição ao agregado miúdo e em substituição parcial ao cimento no concreto para dormentes foi capaz de melhorar o desempenho mecânico e durabilidade do dormente quando comparado um dormente de concreto protendido tradicional (KOH et al., 2016; KOH; HWANG, 2015; NGAMKHANONG; LI; KAEWUNRUEN, 2017). Diante disso, fica evidente que o uso da escória de alto-forno como agregado, além de trazer benefícios aos dormentes do ponto de vista estrutural, pode ser uma solução viável em locais onde os recursos naturais são escassos.

3.3.4 Aditivos

Dependendo das propriedades desejadas, um concreto de alto desempenho pode conter um ou mais tipos de ativos químicos, tais como superplastificantes, controladores de pega e incorporadores de ar. Eles têm um papel fundamental, juntamente com as adições, para que o concreto consiga atender às exigências de durabilidade e resistência de um concreto de Alto Desempenho (SMIRNOVA, 2017).

A utilização de aditivos redutores de água (plastificantes ou superplastificantes) é algo comum nos concretos de alto desempenho (HARTMANN, 2002). Dentre esses aditivos, os produzidos à base de polímeros sintéticos como policarboxilatos (PCE) são os que possuem maior capacidade de redução de água, podendo reduzir até 40% da água das misturas, estando entre os mais utilizados para essa finalidade (NKINAMUBANZI; MANTELLATO; FLATT, 2016).

A quase totalidade dos trabalhos apresentados no Apêndice A utilizaram algum tipo de aditivo na produção dos dormentes de concreto protendido, tendo o aditivo plastificante e superplastificante a base de policarboxilatos sido o mais utilizado nas dosagens dos trabalhos experimentais. Dentre os trabalhos onde houve o detalhamento do tipo de plastificante utilizado, apenas um não utilizou o aditivo a base de policarboxilato, tendo sido utilizado, no caso, um plastificante a base de polímero de Naftaleno Sulfonado.

A cinética de hidratação, na presença de um superplastificante PCE, e o desenvolvimento das propriedades reológicas do concreto têm dependência significativa sobre a quantidade inicial de aluminatos presentes no cimento, a finura do cimento, bem como o teor de álcalis e de sulfato. (NKINAMUBANZI; MANTELLATO; FLATT, 2016; SILVA, 2015b). De modo geral, quanto maior os teores de álcalis, sulfato, C_3A e finura do cimento menor é a eficiência do superplastificante. (CATARINO, 2012; TAVARES, 2011).

Diante disso, é imprescindível a verificação da compatibilidade química entre a composição do cimento utilizado no CAD e a do aditivo superplastificante, pois para cada tipo deste último existe um ponto de saturação para um dado cimento (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Silva (2015b) alerta também para a possibilidade de que o teor e tipo de determinados superplastificantes possam contribuir na expansão do gel de RAA.

No Brasil, o emprego de aditivo na produção dos dormentes é admitido mediante precaução e na medida em que seja justificado por ensaio que comprove que o produto acrescentado, na condição prevista, provoca o efeito desejado, sem contraindicação (por exemplo: corrosão de armadura). É proibido o emprego de aditivo à base de cloreto ou algum

outro halogeneto (ABNT, 2015). De maneira semelhante, as normas internacionais também exigem cuidados com relação ao uso de aditivos e recomendam a utilização de aditivos incorporadores de ar para dormentes expostos em locais com ciclos de congelamento/degelo frequentes (AREMA, 2014).

3.3.5 Adições Minerais

Nas seções posteriores estão descritas as principais características das adições minerais utilizadas na produção do dormente de concreto protendido.

3.3.5.1 Adições pozolânicas

A utilização de adições minerais pozolânicas é algo comum na produção de concreto de alto desempenho. Além da redução de custo e economia de energia, elas podem melhorar as propriedades do concreto fresco e endurecido.

Dentre os benefícios possíveis alcançados com a utilização de adições pode-se citar a melhora da trabalhabilidade do concreto, aumento da impermeabilidade, maior resistência a compressão, melhora na resistência do concreto à fissuração térmica, maior resistência às patologias de origem química e melhor durabilidade do concreto de forma geral (ELAHI et al., 2010; GEDAM; BHANDARI; UPADHYAY, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, muitos dos materiais utilizados como adições minerais, também denominados de materiais cimentícios suplementares, são resíduos de outras indústrias, que ao ser reaproveitados pela indústria da construção civil, aliviam a pressão sobre o uso de recursos naturais do planeta e reduzem a emissão de CO₂ pela indústria cimentícia.

Dessa maneira, para melhorar as características e o desempenho do concreto utilizado na fabricação dos dormentes, a NBR 11709:2015 permite a utilização de adições minerais pozolânicas, como sílica ativa (micros sílica), metacaulim e outros, em substituição parcial ao cimento Portland na proporção total máxima de 20% com relação ao peso do cimento.

Os efeitos dessas adições na matriz cimentícia são de origem física e química. Dentre os efeitos físicos estão o aumento da densidade da mistura, refinamento da estrutura de poros e alteração da microestrutura da zona de transição. Já o efeito químico está associado à reação da adição mineral com a Portlandita (Ca (OH)₂), que dá origem ao C-S-H secundário. (SCHÖLER et al., 2017).

Conforme pode ser verificado no Apêndice A, muitos estudos já foram desenvolvidos a fim de se investigar os efeitos e as proporções ideais de adição dos materiais cimentícios suplementares ao dormente de concreto protendido. As principais adições utilizadas nesses trabalhos são a sílica ativa (mais utilizada), a cinza volante e o metacaulim. De maneira geral, a utilização desses materiais trouxe um grande benefício ao desempenho estrutural e durabilidade do dormente.

Hasnat e Ghafoori (2021) realizaram pesquisa a fim de determinar a resistência à abrasão de dormentes de concreto produzidos com diferentes tipos de dosagem para concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC). Para esse trabalho, foram utilizados como adição mineral a sílica ativa e a cinza volante. Dentre as dosagens estudadas, a utilização da sílica ativa em substituição parcial (5%) do cimento Portland resultou em um melhor desempenho do concreto do ponto de vista mecânico, com uma maior resistência à compressão e à tração aos 28 dias, e uma maior resistência à abrasão. Já a substituição do cimento por 20% e 30% de cinza volante resultou em um concreto com desempenho inferior, com resistência a compressão e abrasão inferior à amostra de controle sem nenhuma adição (HASNAT; GHAFOORI, 2021). O trabalho de Van Dam (2014) encontrou resultados similares ao estudar dosagens para produção de concreto de alto desempenho para dormentes de concreto, evidenciando a superioridade da utilização da sílica ativa para o melhoramento das propriedades mecânicas do dormente. (VAN DAM, 2014).

Shurpali et al (2017) realizaram trabalho semelhante, também voltado para formas de melhorar o desempenho do dormente frente à abrasão por meio da utilização de sílica ativa e cinzas volantes. Porém, diferentemente dos trabalhos anteriores, o resultado experimental mostrou que concreto de alto desempenho produzido com adição de 15% de cinzas volantes apresentou uma maior resistência à abrasão do que a substituição de 5% e 10% de sílica ativa (SHURPALI et al., 2017). Os autores associam esse resultado inesperado a problemas na mistura da sílica ativa no concreto.

Já os trabalhos de Palomo (2007; 2010) e de Uehara (2010) analisaram as vantagens da produção de dormentes de concreto protendido produzidos com concreto geopoliméricos com 100% de substituição do cimento por cinzas volantes álcali ativadas. Em ambos trabalhos foi possível alcançar resistência à compressão superiores a 50MPa, além disso os dormentes também demonstraram ter uma maior resistência a patologias de origem química (RAA, DEF, ataque de ácidos) e falhas decorrentes de ciclos de congelamento e degelo. (PALOMO et al., 2007; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2011; UEHARA, 2010).

O trabalho de Trouan e Sova (2019) analisou a adição de metacaulim como forma de melhorar a resistência de dormentes de concreto à ocorrência de RAA. Foi verificado que a adição de 5% de metacaulim (em substituição ao cimento) reduziu consideravelmente o potencial de desenvolvimento da reação álcali-sílica no concreto. Esse resultado está alinhado com os resultados obtidos por trabalhos recentes a respeito dos benefícios da utilização de metacaulim em estruturas de concreto (SIDDIQUE; KLAUS, 2009).

3.3.5.2 Adições não pozolânicas

As adições minerais não pozolânicas não apresentam atividade química significativa, podendo, no entanto, proporcionar um maior empacotamento de partículas na matriz cimentícia, atuando como pontos de nucleação na formação de compostos hidratados. (RIBEIRO, 2021)

Dentre os materiais com propriedades cimentantes, se destaca a escória granulada de alto-forno, que é proveniente do resíduo da produção de ferro-gusa e vem sendo bastante utilizados em substituição parcial ao cimento Portland. Os trabalhos de Yang et al. (2017) e Yoo et al. (2019) investigaram o desempenho estrutural de dormentes de concreto protendido produzidos com a substituição de cimento Portland por escória granulada de alto forno (56% em massa). Em ambos os trabalhos, o dormente de concreto com escória apresentou resistência mecânica superior ao dormente de concreto protendido sem adição, tanto nos ensaios estáticos quanto nos dinâmicos (fadiga) (YANG et al., 2017; YOO et al., 2019).

De modo similar, Koh et al. (2016) realizaram experimentos com dormentes de concreto protendido produzidos com adição de escória de alto forno substituindo parcialmente o cimento Portland de alta resistência inicial em 30%. Além de serem mais sustentáveis do ponto de vista ambiental, esses dormentes também apresentaram desempenho estático e dinâmico satisfatórios para normas ferroviárias internacionais (KOH et al., 2016). Os dormentes produzidos com escória de alto-forno também apresentaram uma melhor durabilidade de maneira geral, sendo mais resistentes à penetração de íons cloreto, a ataques químicos e aos efeitos dos ciclos de gelo e degelo. (KOH; HWANG, 2013, 2015).

3.3.6 Adições de Fibra

Em geral, as fibras são adicionadas ao concreto como forma de melhorar sua tenacidade, resistência à fissuração, resistência a fadiga e ao impacto. A presença das fibras

permite uma “costura” das microfissuras que surgem quando a tensão na matriz cimentícia supera sua resistência à tração, o que melhora as propriedades do concreto a depender do tipo, quantidade, e das dimensões das fibras adicionadas, bem como das propriedades da matriz cimentícia e a interface fibra-matriz. Na maioria das aplicações modernas para a construção civil se utilizam fibras manufaturadas, como as de aço, vidro ou polímero. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; RIBEIRO, 2021).

Conforme pode ser visto no Apêndice A, muitos trabalhos já se utilizaram da adição de fibras no concreto como forma de melhorar o desempenho estrutural dos dormentes de concreto protendido. Em todos esses trabalhos, o tipo de fibra utilizado foi a de aço.

Nesse sentido, Bastos (1999) realizou ensaios estáticos e dinâmicos em dormentes com a adição de fibras de aço na proporção de 0,5% e 0,75% (em volume) com o objetivo de quantificar o benefício das fibras de aço à resistência estrutural do dormente. De maneira geral, quanto maior a proporção de fibras no concreto melhor o desempenho do dormente. Aqueles com maior quantitativo de fibras (0,75%) apresentaram um maior aumento do momento fletor de primeira fissura (no centro do dormente e na região de apoio do trilho), redução da formação e abertura de fissuras, e a força de escorregamento dos fios de protensão foi 46% maior que o dormente feito de um concreto sem fibras. As fibras também acrescentaram grande ductilidade aos dormentes e diminuíram a tensão nos fios de protensão nos estágios mais avançados do carregamento (BASTOS, 1999).

Os trabalhos de Yang et al. (2017), Parvez (2017) e Silveira (2018) também abordaram a temática da adição de fibras de aço aos dormentes de concreto protendido e encontraram resultados semelhantes a Bastos (1999). Silveira (2018) realizou ensaios em dormentes de concretos protendidos com fibras de aço (na proporção de 0,25%, 0,50% e 1,00%) e verificou que estes dormentes apresentaram um aumento da resistência e tenacidade do concreto, melhorando o seu comportamento mesmo após o surgimento de fissuras (SILVEIRA, 2018).

Já Parvez (2017) investigou a resistência à fadiga de dormentes de concreto protendido com adição de fibras de aço. Foram ensaiados dormentes com teores de fibra de zero, 0,25% ou 0,5%, em volume, sob carga cíclica e estática de amplitude constante. Os dormentes com 0,5% de fibras demonstraram maior capacidade estática, vida útil prolongada à fadiga, deflexões mais baixas e larguras mais finas de trincas do que a de dormentes sem fibras. Já os dormentes com 0,25% apresentaram resultados variáveis e, em alguns casos, uma redução no desempenho à fadiga, demonstrando que um volume mínimo de fibras é essencial para garantir maior desempenho. (PARVEZ; FOSTER, 2017).

Yang et al. (2017) observaram que a adição de 0,75% (em volume) de fibras de aço, resultou num crescimento na capacidade de flexão e fadiga do dormente por meio do controle de propagação das trincas e evitando uma falha brusca. Além disso, verificaram também que a adição de fibras de aço dispensa a necessidade de utilização de estribos nas extremidades dos dormentes de concreto protendido (YANG et al., 2017).

Bae e Pyo (2020) testaram dormentes produzidos com concreto de Ultra Alto Desempenho (UHCP), com resistências à compressão superiores a 150 MPa, com o objetivo de aumentar sua vida útil e diminuir a necessidade de manutenção. A alta resistência do concreto foi atingida por meio da utilização de fibras de aço, adições minerais (escória granulada de alto-forno e sílica ativa) e baixa relação a/c (0.22). A principal vantagem apresentada pelos dormentes de UHCP foi a resistência a abertura de fissuras, mesmo após milhões de ciclos de carregamento dinâmico. (BAE; PYO, 2020).

3.3.7 Aço

A resistência e a capacidade dos dormentes de concreto protendido dependem amplamente da força de protensão e das ligações entre os fios de aço e o concreto. A força de protensão deve garantir o estado de protensão das seções de concreto durante toda a vida útil da estrutura.

A perda de parte dessa força de protensão, geralmente, pode ser classificada em dois estágios, a saber: perdas iniciais e perdas progressivas. A perda inicial é estimada entre 20 e 27% da força de protensão inicial, dependendo do tipo de fio, aderência, materiais utilizados no concreto e da mão de obra utilizada durante os processos de liberação de esforço de protensão (KAEWUNRUEN, 2007). Já as perdas progressivas ocorrem em função do tempo e são associadas à retração, fluência do concreto e a relaxação do aço. As cargas de tráfego e os danos e fissuras aos dormentes também contribuem para a perda progressiva da força de protensão. (CHOLFE; BONILHA, 2013).

Kaewunruen (2014) realizou investigação experimental com objetivo de determinar a força de protensão residual em dormentes de concreto após anos de serviço em ferrovias. Dormentes com mais de 30 anos de aplicação na linha férrea e que apresentavam desgaste superficial foram analisados por meio da técnica de relaxamento dinâmico e observou-se que em alguns dormentes a protensão nos fios de aço era de apenas 40% do valor do projeto. Os resultados experimentais demonstraram que a perda de protensão pode estar ligada à

integridade do material concreto, visto que boa parte dos dormentes estudados apresentaram desgastes em sua superfície. (REMENNIKOV; KAEWUNRUEN, 2014).

No Brasil, os fios de protensão devem ser dos tipos CP 170 RB ou CP 175 RB, com acabamento liso (L) ou entalhado (E). No caso de armadura ativa com aderência inicial, somente é permitido o emprego de fio de protensão com acabamento entalhado (E). Já as cordoalhas de protensão devem ser do tipo CP 190 RB.

Nessa direção, Posluszny e Fry (2016) e Park et al. (2021) estudaram a substituição dos fios de protensão de aço nos dormentes de concreto protendido por barras poliméricas reforçadas com fibra de aramida (Kevlar), também conhecido pela sigla AFRP, que foram protendidas tal como o aço no concreto protendido. O AFRP tem a vantagem de ter uma resistência à tensão de aproximadamente 1400 MPa (semelhante à do aço), possuir uma baixa condutibilidade elétrica e não sofre corrosão. Os dormentes com AFRP mostraram ter mais do que o dobro da resistência elétrica quando comparado com os dormentes com aço protendido. Com relação a resistência mecânica dos dormentes com AFRP, ainda existem dúvidas com relação ao seu desempenho, visto que embora os dormentes não tenham apresentado falha nos ensaios estáticos, não conseguiram atender aos requisitos de surgimento de fissura da norma americana AREMA, sendo então sugerido mais pesquisas sobre o assunto (PARK et al., 2021; POSLUSZNY; FRY, 2016).

3.4 RESUMO

O dormente de concreto protendido tem sido o tipo de dormente mais utilizado nos novos projetos de ferrovias brasileiras e ao redor do mundo. O projeto do dormente e seus meios de produção são variados e passaram por grandes modificações até atingir o atual patamar de confiabilidade.

Usualmente, o concreto é formado por ligante, agregados, adições minerais pozolânicas ou não, aditivos e fibras. A composição adequada desses materiais é que produz dormentes duráveis capazes de suportar intempéries da exposição e as variadas e intensas cargas do material rodante. Em razão disso, as normas regulatórias do setor ferroviário vêm estabelecendo exigências cada vez mais rígidas quanto a qualidade do concreto, exigindo-se, em geral, a utilização de concretos de alto desempenho (High Performance Concrete).

Com relação ao cimento, recomenda-se a utilização de cimentos o mais puro possível (CPI e ARI) e com limitação quanto ao teor de álcalis (não superior a 0,6%) e presença de SO₃ no cimento, a fim de garantir uma maior durabilidade aos dormentes. Os elevados níveis

de SO₃ podem contribuir de maneira significativa para a formação da etringita tardia, patologia comumente conhecida como DEF.

Parâmetros importantes do desempenho estrutural do dormente como módulo de elasticidade e resistência à tração do concreto estão diretamente relacionados ao tipo de agregado utilizado. Em geral, são preferíveis para dormentes a utilização de agregados provenientes de rochas de origem ígnea, como o basalto e granito. Do ponto de vista da durabilidade, é essencial que os agregados apresentem baixo potencial de reatividade com os álcalis do cimento.

Alguns estudos experimentais vêm sendo realizados com a substituição de agregados naturais por outros tipos de agregados, a fim de tornar a produção dos dormentes de concreto protendido mais sustentável e econômica. Dentre os principais materiais utilizados com sucesso em substituição aos agregados tradicionais estão a escória de alto-forno, fragmentos de borracha triturada e concreto reciclado.

É comum na fabricação de concreto de alto desempenho, a utilização de aditivos químicos como forma de melhorar o desempenho do concreto. O tipo de aditivo mais utilizado nos trabalhos experimentais analisados foi o plastificante e superplastificante a base de policarboxilatos. De maneira geral, as normas ferroviárias exigem cuidados com relação ao uso de aditivos, proibindo a utilização de aditivos à base de cloreto e recomendando a utilização de aditivos incorporadores de ar para dormentes expostos em locais com ciclos de congelamento/degelo frequentes.

As adições minerais (pozolânicas ou não) também são utilizadas com frequência na fabricação do concreto para dormentes. Além da redução de custo e economia de energia, elas melhoram as propriedades do concreto fresco e endurecido. Dentre as adições minerais pozolânicas, as que vêm apresentando melhor resultado com relação ao desempenho dos dormentes são a sílica ativa (mais utilizada) e cinza volante. Com relação às adições não pozolânicas, a escória granulada de alto-forno é o produto que apresenta melhor resultado.

A adição de fibras ao concreto também é uma estratégia comum na busca por concretos de alto desempenho. As fibras melhoram a tenacidade do concreto, a resistência à fissuração, a resistência à fadiga e ao impacto. O tipo de fibra mais utilizado na produção dos dormentes de concreto é a fibra metálica.

A qualidade do concreto influencia diretamente também na qualidade da ligação entre o concreto e o aço protendido. A força de protensão deve garantir o estado de protensão das seções de concreto durante toda a vida útil da estrutura. Estudos experimentais demonstraram

que dormentes com sinais de degradação/desgaste apresentaram perdas significativas da força de protensão.

4 PATOLOGIAS NOS DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO

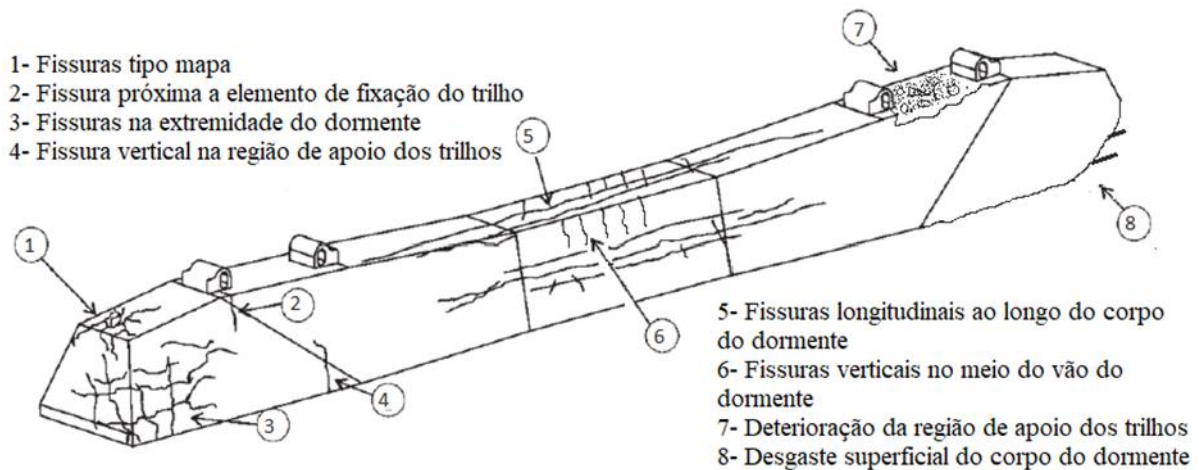
As falhas em dormentes ferroviários já foram abordadas em alguns trabalhos de diferentes autores nos últimos anos (A; MUTHUKANNAN, 2019; FERDOUS; MANALO, 2014; TAHERINEZHAD et al., 2013; YU et al., 2015; ZAKERI; REZVANI, 2012; ZEMAN et al., 2009). Um grupo de pesquisadores do Centro de Engenharia e Transporte Ferroviário da Universidade de Illinois (RailTEC) realizou uma pesquisa internacional com profissionais da indústria ferroviária a fim identificar e ranquear as falhas mais comuns em dormentes de concreto protendido e em suas fixações (VAN DYK; DERSCH; EDWARDS, 2012). De maneira semelhante, Bastos et al. (2015) realizou pesquisa com experts do setor ferroviário com o objetivo de identificar as falhas mais comuns associadas aos acidentes ferroviários envolvendo dormentes de concreto. Analisando o resultado dos trabalhos anteriores e das duas pesquisas citadas, pode-se dizer que as principais patologias associadas à deterioração dos dormentes de concreto protendido são:

- a) deterioração da região de apoio dos trilhos no dormente (RSD);
- b) fissuras decorrentes de fatores ambientais (congelamento/degelo) ou químicos (DEF/RAA);
- c) fissuras verticais na região de apoio dos trilhos;
- d) fissuras no meio do vão do dormente;
- e) desgaste superficial do corpo do dormente;
- f) fissuras decorrentes da fabricação do dormente protendido.

Conforme pode ser visto acima, as patologias nos dormentes de concreto protendido podem estar relacionadas a diferentes fatores tais como o processo de fabricação dos dormentes, os materiais utilizados na fabricação e o ambiente onde o dormente está instalado. Apesar de estarem sendo analisadas separadamente, a maioria das falhas em dormentes não ocorre de forma isolada.

Assim, os dormentes podem ser afetados por mais de um tipo de falha, e muitas vezes os mecanismos de ocorrência dessas falhas estão relacionados entre si. Fissuras resultantes do processo de fabricação do dormente, por exemplo, podem torná-lo mais suscetível à degradação por fatores ambientais e químicos (SAFIUDDIN et al., 2018); a fissuração por fatores químicos pode enfraquecer o concreto, facilitando a ocorrência de fissuração em razão de cargas dinâmicas. Os principais tipos de fissuras que ocorrem nos dormentes de concreto protendido são mostrados na Figura 22.

Figura 22 – Principais tipos de falhas que ocorrem nos dormentes de concreto protendido



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

As principais causas de degradação do dormente de concreto protendido estarão descritas em detalhes neste capítulo. De forma a facilitar o entendimento do mecanismo dessas patologias, elas foram separadas em 2 grupos, patologias de causas intrínsecas e extrínsecas. Classificam-se como causas intrínsecas as que são inerentes à própria estrutura do dormente, ou seja, todas as que têm sua origem nos materiais e peças estruturais durante a fase de execução e/ou utilização do dormente (Reação Álcali agregado, Formação de Etringita tardia, Fissuras devido ao processo construtivo). Já as causas extrínsecas são aquelas causadas por eventos externos ao dormente, ou seja, fatores que afetam a estrutura “de fora para dentro” (Deterioração da região de apoio dos trilhos, desgaste superficial do concreto, fissuras no meio do vão e na região de apoio dos trilhos, ação dos ciclos de gelo/degelo).

4.1 PATOLOGIAS DE CAUSAS INTRÍNSECAS

Nas seções posteriores estão descritas as principais patologias de causa intrínseca que atingem os dormentes de concreto protendido.

4.1.1 Fissuras em razão do processo construtivo do dormente

As fissuras decorrentes do processo de fabricação dos dormentes geralmente estão relacionadas à força de protensão aplicada ao concreto ou ao torque excessivo aplicado ao sistema de fixação dos dormentes (DONAIRE-ÁVILA; MONTAÑÉS-LÓPEZ; SUÁREZ, 2019). Para membros como dormentes de concreto, que normalmente não contêm nenhuma armadura transversal, as fissuras podem se propagar longitudinalmente (Figura 23) e levar à

deterioração estrutural do dormente e redução significativa da sua capacidade de carga (DASTGERDI, 2019).

Figura 23 – Exemplo de dormentes fissurados pouco tempo após fabricação



Fonte: Silva et al. (2018).

Situações de fissuração na região de ancoragem em dormentes protendidos são causadas por tensões de tração conhecidas na literatura como “bursting” e “splitting”. O bursting (explosão) é a tensão de tração que é gerada pelo escorregamento do fio/cordoalha na extremidade do dormente; as fissuras ocorrem quando a massa de concreto ao redor da armadura é insuficiente para absorver as tensões radiais decorrentes desse escorregamento da armadura. Já o splitting (separação) é a tensão de tração gerada pela transferência da força de protensão dentro do comprimento de ancoragem que, quando ultrapassam a resistência à tração do concreto, pode causar fissuras que partem de uma cordoalha para outra (CATOIA, 2011).

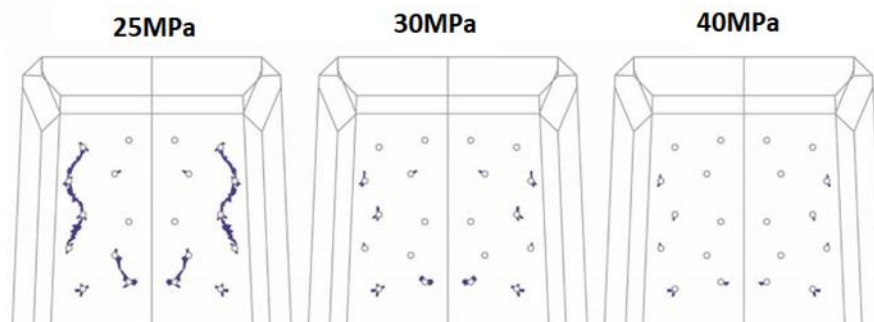
Em geral, as fissuras surgem quando a liberação da força de protensão ocorre sem que o concreto tenha desenvolvido resistência suficiente apontada em projeto. Contudo, existem outros fatores como cobrimento do concreto, tipo de agregado, e tipo de superfície da armadura que também podem influenciar na intensidade de formação dessas fissuras (SHIN; YU, 2018). Barras de aço com superfície rugosa ou entalhes, por exemplo, apesar de aumentarem a aderência do aço ao concreto quando comparado com barras lisas, diminuem o comprimento de transferência de protensão, aumentando a tensão na interface entre concreto e barra de aço, facilitando a ocorrência de fissuras (BODAPATI et al., 2013; SAVIC et al., 2019).

Nesse sentido, Dastgerdi et al. (2019) analisaram a influência da granulometria e forma dos agregados graúdos do concreto na resistência dos dormentes às fissuras decorrentes da protensão. Foi observado que quanto maior o diâmetro médio do agregado, menor era a chance de surgimento de fissuras após a protensão, por causa de uma maior resistência à

fratura do concreto. Do mesmo modo, agregados de forma angular apresentaram uma resistência à fratura 50% superior quando comparado com os agregados arredondados, diminuindo consideravelmente a chance de formação de fissuras. Já (SAVIC et al., 2018) constataram que o aumento da resistência à compressão do concreto e do cobrimento das armaduras são fatores que diminuem consideravelmente a ocorrência de fissuras em razão da protensão.

Estudo realizado por Yu (2017) comparou a liberação da força de protensão em fios de protensão de superfície entalhada em concretos com 3 resistências iniciais diferentes por meio de modelagem computacional. O dormente modelado possuía 20 fios de protensão de 5.3mm de diâmetro submetidos a uma tensão de 1400 MPa cada. Na figura 24, é possível observar as regiões da extremidade do dormente onde a tensão atuante no concreto ultrapassa a sua resistência à tração, sendo esses os locais com potencial para surgimento de fissura. O estudo concluiu que baixas resistências do concreto, acompanhadas de ligações aço-concreto pouco desenvolvidas, são responsáveis pela degradação inicial do concreto que podem se deteriorar ainda mais sob carga do tráfego.

Figura 24 – Efeito da liberação da protensão em concretos com diferentes resistências



Fonte: Yu (2017).

As fissuras relacionadas ao alto torque de aperto aplicado ao sistema de fixação dos dormentes, por outro lado, podem levar ao desenvolvimento de grandes fissuras longitudinais (Figura 25). Esse tipo de falha já foi relatado em ferrovias da Espanha (DONAIRE-ÁVILA; MONTAÑÉS-LÓPEZ; SUÁREZ, 2019), Irã (REZAIE; SHIRI; FARNAM, 2012), Grécia (TSOUKANTAS et al., 2008) e Croácia (ZOVKIĆ; LAKUŠIĆ, 2019). Segundo Rezaie et al. (2019), fatores como a presença de água e finos dentro da bucha de fixação do dormente, bem como deformações plásticas nos tirefões (parafusos ferroviários) e buchas podem contribuir para o aumento da tensão transversal na região de fixação do dormente e consequente surgimento de fissuras.

Figura 25 – Fissura longitudinal decorrente de má execução do sistema de fixação do dormente



Fonte: Tsoukantas et al. (2008).

Alguns estudos propõem a utilização de fibras metálicas ou o uso de estribos nos dormentes de concreto protendido como forma de reforçar a resistência transversal do concreto e evitar o surgimento das fissuras durante a liberação da protensão (DASTGERDI, 2019; DHONDE; MO; HSU, 2005; KOLLO, 2021; MAYVILLE; JIANG; SHERMAN, 2014).

A depender da extensão e gravidade da fissura, existe ainda a possibilidade de recuperação de dormentes fissurados por meio da utilização de impermeabilização por cristalização, técnica que pode ser utilizada para selar as fissuras e evitar a penetração de água e agentes agressivos por meio da formação de cristais nas pequenas aberturas do concreto. De acordo com Silva et al. (2018), esse método foi utilizado com sucesso na recuperação de dormentes que apresentavam pequenas fissuras decorrentes do processo de fabricação no Norte do Brasil. O estudo aponta ainda que a utilização do método contribuiu para evitar o descarte de aproximadamente 12.000 dormentes de concreto protendido, evitando um prejuízo financeiro e ambiental, visto que foram emitidas aproximadamente 400 toneladas de CO₂ em decorrência da produção desses dormentes.

4.1.2 Reação álcali agregado

A reação álcali-agregado ocorre entre a solução intersticial do concreto, fortemente básica e rica em álcalis, e certos minerais silicosos reativos dos agregados. O gel álcali-sílica formado provoca uma pressão interna que, ao exceder os limites de resistência a tração do

concreto, provoca sua fissuração (MOUNDOUNGOU et al., 2014). Para que o processo se inicie, é necessário que três condições sejam simultaneamente atendidas: agregados reativos, concentração elevada de álcalis no concreto e presença de água (CYR; RIVARD; LABRECQUE, 2009). Finlândia, Estados Unidos, China e Portugal estão entre os países onde já houve relatos de casos de RAA em dormentes de concreto protendido.

As principais características visuais de ocorrência dessa patologia são a expansão do concreto e a ocorrência de fissuras superficiais (Figura 26), que podem abrir caminhos para a entrada de agentes agressivos, como cloretos, sulfatos e carbonatos, que podem induzir a corrosão das armaduras de aço (JEAN-PIERRE OLLIVIER; VICHOT, 2014). Os dormentes de concreto, por estarem expostos diretamente às intempéries ambientais, são elementos mais susceptíveis a sofrer dessa patologia.

Figura 26 – Fissuras superficiais em dormente de concreto protendido



Fonte: Shayan (2007).

Os primeiros registros de RAA em dormentes datam da década de 1970, onde foram observados diversos dormentes de concreto deteriorados em uma ferrovia na Finlândia. Pesquisas iniciais relacionaram a fissuração do concreto à formação de etringita tardia visto que os dormentes haviam sido curados em temperaturas acima de 75°C (TEPPONEN; ERIKSSON, 1987). Anos depois, porém, pesquisadores australianos coletaram amostras destes dormentes e por meio de análise petrográfica, MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDX (espectroscopia de raios-x) observaram uma grande quantidade de gel

esbranquiçado e rico em sílica preenchendo fissuras ao redor e dentro dos agregados do concreto. Além disso, observaram também que as agulhas de etringita se localizavam apenas em alguns pontos da pasta, e não ocupavam inteiramente as microfissuras do concreto, indicando que a etringita estava apenas ocupando fissuras já existentes. Diante desses fatos, a conclusão do grupo foi de que na verdade a reação álcali agregado seria a causa preponderante da falha dos dormentes finlandeses (SHAYAN; QUICK, 1994).

Ademais, a coexistência de gel de reação álcali-sílica e etringita, semelhante à observada no caso acima já foi estudada por alguns autores (BAINGAM et al., 2012; THOMAS et al., 2008). Segundo eles, as fissuras resultantes da reação expansiva do RAA podem fornecer espaço onde a etringita se cristaliza. A formação de gel álcali-sílica diminui a concentração alcalina da solução porosa, facilitando o desenvolvimento de etringita, já que esta é favorecida em soluções de baixo teor alcalino, formando-se em áreas próximas ao gel de sílica alcalina. Além disso, existem evidências de que a alta temperatura precoce no concreto pode desencadear tanto a RAA quanto a DEF (BAINGAM et al., 2012).

A reação álcali agregado também foi identificada em uma ferrovia de Shanghai, onde aproximadamente metade dos dormentes de concreto da ferrovia apresentaram fissuras longitudinais ao longo de seu comprimento e fissuras tipo mapa nas extremidades. Os dormentes haviam sido fabricados havia menos de 10 anos e foram submetidos a análise DTA, MEV, EDS e análise petrográfica onde foram encontrados indícios da ocorrência de reação álcali agregado, não tendo sido identificada a presença de etringita em quantidade considerável. Foi observado que as fissuras se originavam principalmente dos agregados graúdos, sendo eles compostos por minerais de quartzo microcristalino e calcedônia. A análise laboratorial por meio do método do autoclave chinês confirmou a reatividade dos agregados graúdos utilizados, tendo estes apresentado expansão acima de 0,10%. (QINHUA; MIN; SUFEN, 1996).

Ensaio mecânicos realizados em corpos de prova desses dormentes mostraram que a resistência à compressão do concreto estava 25% inferior à resistência de projeto, porém ensaios estáticos realizados nos dormentes indicaram que eles ainda apresentavam desempenho estrutural satisfatório para as normas chinesas (QINHUA; WEIQING; LIANG, 1997).

Portanto, os resultados obtidos na análise dos dormentes chineses se alinham com os resultados obtidos por outros estudos em estruturas afetadas pelo RAA, onde, muito frequentemente, ocorre uma queda considerável nas características mecânicas medidas sobre os testemunhos da estrutura, a qual não é verificada quando se determina o desempenho

(ensaios estáticos de flexão e cisalhamento) da estrutura in loco. Essas diferenças de comportamento são atribuídas ao fato de as armaduras no interior do concreto terem um efeito de restrição às expansões induzidas pela RAA (FAN; HANSON, 1998; FUJII et al., 1987). Trabalhos mais recentes, porém, indicam que os efeitos deletérios da RAA podem ser poucos significativos nos anos iniciais da estrutura, mas que no longo prazo ocorre uma redução considerável na capacidade de carga do elemento afetado (GOWRIPALAN; CAO, 2019; HAJIGHASEMALI; RAMEZANIANPOUR; KASHEFIZADEH, 2014).

Figura 27 – Dormente afetado por RAA em ferrovia norte-americana



Fonte: Mayville, Jiange e Sherman (2014).

Dormentes de uma das principais ferrovias dos Estados Unidos também foram afetados pela patologia do RAA. O fato se deu no corredor nordeste da linha da AMTRAK, onde foram observados diversos dormentes com fissuras longitudinais, sendo a maioria delas paralelas às barras de aço localizadas na camada superior da armação do dormente. Em alguns casos mais severos, a parte superior do dormente se destacava (Figura 27). Esses dormentes haviam sido produzidos entre 1994 e 1998 e estavam aplicados na linha férrea havia aproximadamente 10 anos (MAYVILLE; JIANG; SHERMAN, 2014).

Por meio de uma análise minuciosa de campo e laboratório, o Departamento de Transporte dos Estados Unidos (FRA) chegou à conclusão de que a falha dos dormentes se deu devido a 2 fatores: Alta concentração de tensões na região próxima as cordoalhas de protensão (defeito construtivo) e pressões causadas por gel derivado da reação álcali-sílica. A análise petrográfica do dormente mostrou a presença de gel decorrente da RAA, onde os dormentes mais comprometidos estruturalmente eram também os que possuíam as maiores

evidências de presença de gel expansivo. O cimento utilizado na confecção do dormente foi um cimento com baixo teor de álcalis (abaixo de 0.6%) e os agregados utilizados haviam sido testados quanto a sua reatividade por testes padrões da ASTM (C227 e C289) na época (MAYVILLE; JIANG; SHERMAN, 2014).

Apesar dos testes de reatividade dos agregados serem importantes para reduzir o risco de ocorrência do RAA, eles não garantem a não reatividade do cimento e dos agregados por completo, principalmente quando essa reatividade se apresenta de forma mais lenta. (FORSTER et al., 1998).

Dormentes danificados por RAA também foram identificados em uma ferrovia portuguesa. Os dormentes haviam sido produzidos na década de 1990 e, poucos anos depois de instalados em campo, apresentaram fissuras características desta patologia. Ensaios realizados (DRX, MEV, reatividade do agregado) nesses dormentes indicaram a presença de gel expansivo proveniente de RAA e uma forte presença de etringita. O cimento utilizado foi o CIM I europeu (cimento Portland comum sem adição) com um consumo de 440kg/m³. Os dormentes foram curados por meio de cura a vapor, onde acredita-se que a temperatura máxima do processo de cura chegava a 80°C. Teste de potencial de reatividade foram executados de acordo com ASTM C1260, e indicaram que os agregados utilizados poderiam ser considerados reativos. (SILVA; GONÇALVES; PIPA, 2008).

Estudo realizado posteriormente nos dormentes portugueses utilizou dois métodos na tentativa de tentar controlar a RAA e DEF: aplicação de revestimentos especiais para proteção da superfície de concreto e tratamento do concreto com utilização de Nitrato de Lítio (SILVA et al., 2008). O revestimento da superfície do concreto foi realizado conforme orientações da norma EN 1504-2 (Products and systems for the protection and repair of concrete structures), onde foram utilizados diferentes tipos de materiais: cimentos poliméricos, revestimento de epoxy, revestimento acrílico e impregnação hidrofóbica. Em geral, esses revestimentos reduziram a expansão dos corpos de prova quando comparados com amostras não revestidas, o que era esperado, uma vez que o revestimento aplicado reduz a absorção de umidade por parte do concreto. Já os resultados com o tratamento com Lítio foram ainda mais eficazes, pois além de acarretarem uma redução significativa na expansão do concreto, reduziram a disponibilidade de álcalis e etringita tardia dentro do concreto, o que confirma os resultados encontrados por outros estudos sobre o tema e reforça a importância dos sais de Lítio na prevenção da reação em obras novas e também no tratamento de estruturas já construídas e que sofram de RAA (EKOLU; THOMAS; HOOTON, 2007).

Outra forma já bastante difundida de prevenir a ocorrência de reação álcali agregado é por meio da utilização de adições minerais pozolânicas, como a cinza de casca de arroz, cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim (SHAFATIAN et al., 2013; THOMAS, 2011). Essas adições agem no concreto reduzindo a concentração de álcalis e promovendo o refinamento dos poros, que reduz a permeabilidade do concreto, dificultando a entrada de umidade e melhorando a sua durabilidade (RAJABIPOUR et al., 2015).

Apesar da RAA já ter afetado dormentes de diversas ferrovias em diferentes países, raros são os trabalhos publicados a respeito, em razão, principalmente, de questões legais (SHAYAN; QUICK, 1992). O Quadro 7 resume os trabalhos já publicados sobre o tema. A maioria dos casos relatados ocorreu em dormentes produzidos entre os anos de 1960 e 2000, quando não se havia tantas exigências normativas quanto a prevenção da ocorrência de RAA. Em todos os casos relatados, o tipo de cura adotado foi a cura a vapor e os dormentes apresentaram falha em até 10 anos depois de produzidos. Em 3 dos 5 casos registrados, a presença do RAA estava associada ao DEF.

Quadro 7 – Trabalhos publicados sobre RAA em dormentes de concreto

Local	Data de fabricação do Dormente	Idade dos dormentes (anos)	Nº de dormentes afetados	Tipo de cimento	Cura a vapor?	Presença de etringita tardia?	Referência
Finlândia	1968	10	Não informado	CPI	Sim	Sim	(SHAYAN; QUICK, 1994)
China	1985-1988	3	9.082	CPI	Não informado	Não	(QINHUA; MIN; SUFEN, 1996)
Estados Unidos	1994-1998	10	>1.000.000	CP - baixo teor de álcalis	Sim	Não	(MAYVILLE A; JIANG; SHERMAN, 2014)
Austrália	Não informado	7-8	>300.000	CP de alta resistência inicial	Sim	Sim	(SHAYAN; QUICK, 1992), (SHAYAN, 2007)
Portugal	1996	7	Não informado	CPI	Sim	Sim	(SILVA; GONÇALVES; PIPA, 2008)

Fonte: Mielenz et al. (1995).

4.1.3 Formação de etringita tardia

Dentre as manifestações patológicas relacionadas ao ataque de sulfatos, a formação de etringita tardia (DEF) é a mais comum em dormentes de concreto protendido (Figura 28), ela

está associada à existência de fontes de sulfato internas e já foi identificada em dormentes dos Estados Unidos, Portugal, Índia e Suécia.

Figura 28 – Dormente com fissuração decorrente de DEF



Fonte: Mielenz et al. (1995).

O mecanismo da expansão da DEF não é unanimidade entre os pesquisadores (SAHU; THAULOW, 2004), mas acredita-se que a etringita primária, formada em idades iniciais do concreto por meio da reação do aluminato tricálcico (C_3A) com a gipsita, se decompõe em temperaturas acima de 65° ; sendo depois recomposta em idades avançadas, na presença de umidade, formando cristais que geram elevadas pressões internas e que podem causar fissuração e desagregação do concreto. (TAYLOR, 1997).

Nesse sentido, a elevação da temperatura do concreto pode estar associada ao processo de cura térmica ou a uma exotermia natural do material (GODART; DIVET, 2012). Em geral, a DEF se manifesta por meio de fissuras multidirecionais, apresentando certa analogia com a fissuração por causa da reação álcali-agregado, embora os mecanismos envolvidos nas reações expansivas sejam diferentes (SILVA et al., 2017; THOMAS et al., 2008).

Ademais, os dormentes ferroviários são peças mais susceptíveis à ocorrência do DEF em razão do fato de seu sistema de produção exigir que estes tenham alta resistência inicial em poucas horas após a concretagem, sendo necessária, quase sempre, a utilização da cura térmica. Além disso, a grande maioria dos dormentes ferroviários ficam expostos à umidade, em razão de chuvas e outras intempéries ambientais.

O primeiro registro de formação de etringita tardia no mundo ocorreu justamente em dormentes de concreto protendido na década de 1980 (COLLEPARDI, 2003). Segundo Mielenz (1995), esses dormentes estavam instalados em uma ferrovia da Costa Leste dos Estados Unidos e apresentaram fissuras paralelas aos fios de protensão e fissuras tipo “mapa” poucos anos após sua instalação em campo. Percebeu-se também que os dormentes instalados dentro de túneis não apresentavam fissuras, enquanto os que estavam estocados ao ar-livre apresentavam o mesmo problema dos que estavam em serviço, indicando que a umidade seria fator preponderante para a patologia em questão. O concreto havia sido produzido com cimento de alta resistência inicial (tipo III da ASTM), com a utilização de aditivos redutores de água e incorporadores de ar, foi observado também que os níveis de SO_3 no cimento variavam de 1% a 3%.

A fim de identificar o agente causador dessas fissuras, um grupo de pesquisadores realizou estudos por meio de análise petrográfica, MEV e DTA, onde foram identificadas grandes concentrações de etringita preenchendo as fissuras da pasta de cimento e da região da zona de transição da interface do agregado e da pasta de cimento. Também foram identificados “ninhos” de etringita na pasta de cimento, de onde emanavam inúmeras microfissuras. A conclusão dos pesquisadores foi de que a formação da etringita tardia estava relacionada, principalmente ao alto teor de SO_3 presente no cimento, teor acima dos limites impostos pela norma americana (ASTM) na época. Foi observado que boa parte desse sulfato era proveniente do próprio clínquer, sendo assim um sulfato com menor solubilidade, o que pode ter contribuído para a ocorrência do DEF (Mielenz et al., 1995).

Ainda segundo Mielenz et al. (1995), um fato interessante sobre o caso anterior é que os dormentes que eram concretados nas sextas-feiras eram curados naturalmente durante o final de semana, sem implemento da cura térmica. Apesar disso, esses dormentes também apresentaram o mesmo aspecto de degradação oriundo da formação de etringita tardia, indo de encontro com a conclusão de outros estudos que apontam a elevada temperatura do concreto em suas idades iniciais como condição necessária para a formação da etringita tardia (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Corroborando com os estudos anteriores, Collepardi (2003) observou que a formação de etringita tardia não está limitada a peças de concreto submetidas à cura térmica. Ele propôs uma hipótese holística em que o DEF seria resultante na verdade de 3 fatores, quais sejam: existência de microfissuras no concreto, sulfato tardio liberado por fonte interna e a presença de água. Com relação às microfissuras, essas poderiam ser causadas por retração do concreto, ocorrência de RAA, força de protensão excessiva, cargas de serviço e outros. Já com relação

ao sulfato tardio liberado, esse poderia ter origem relacionada a agregados contaminados com gipsita, por exemplo, ou ser derivado da decomposição da etringita em temperaturas acima de 65°C.

Dormentes produzidos na Suécia na década de 1990 também apresentaram fissuras características de reações expansivas de origem endógenas. Os dormentes foram produzidos com a utilização da cura a vapor, com temperatura controlada abaixo de 60°C, e poucos anos após a instalação no campo, uma pequena parte deles apresentou um quadro de fissuração do tipo “mapa” precocemente. Análises de petrografia e microscopia eletrônica de varredura indicaram se tratar de formação de etringita tardia. Apesar de os dormentes terem sido curados em temperatura controlada, os pesquisadores apontaram que outros fatores podem ter contribuído para o desenvolvimento da DEF, como por exemplo, o alto consumo de cimento (500kg/m³) no concreto, bem como o fato do cimento utilizado possuir teores relativamente elevados de SO₃ (3,7%), C₃A (8%), finura (550 m²/kg) e álcalis. (SAHU; THAULOW, 2004).

Figura 29 – Dormente com fissuração longitudinal decorrente de DEF



Fonte: Sundaram et al. (2018).

A ocorrência de DEF em dormentes também já foi registrada na Índia, onde peças com idades entre 6 e 9 anos apresentaram fissuração característica de formação de etringita tardia (Figura 29), o que foi confirmado mais tarde por meio do MEV com EDS. Semelhante aos outros casos já relatados, tanto os dormentes em uso na linha férrea quanto os que estavam estoque apresentaram quadro fissuratório. Registros da produção dos dormentes indicaram que o cimento utilizado havia sido de alta resistência inicial e que o concreto havia sido submetido à cura térmica, com temperatura do concreto chegando a mais de 80°C durante o processo de cura. (AWASTHI et al., 2017).

Nesse sentido, Sundaram et al. (2018) estudaram a capacidade estrutural desses dormentes indianos, analisando tanto dormentes fissurados quanto os dormentes sem nenhuma fissura aparente. Os dormentes fissurados foram separados de acordo com o grau de degradação entre leve, moderado e severo. Foram realizados ensaios para verificar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos corpos de prova, e ensaios de flexão e cisalhamento em dormentes retirados da via. Como esperado, em todos os ensaios analisados os dormentes considerados com degradação severa obtiveram um desempenho estrutural muito inferior aos dormentes não fissurados ou com danos leves. No caso dos testes de flexão e cisalhamento, os dormentes com fissuração severa tiveram sua capacidade reduzida em 56% e 36%, respectivamente.

De forma a combater a formação de etringita tardia, a maioria das normas que tratam sobre a produção de dormentes faz recomendações quanto ao tratamento térmico do concreto, estabelecendo limites para a duração do período de espera entre a aplicação do concreto fresco e o início do aumento da temperatura, a taxa de aumento da temperatura e limitando a temperatura máxima no interior do concreto (em geral, 70°C) (JEAN-PIERRE OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Além disso, recomenda-se a utilização de cimentos com baixos teores de álcalis, sulfatos e C3A, bem como refinar os poros da matriz cimentícia (IFSTTAR, 2018; RIBEIRO, 2018). Para isso, algumas adições minerais (pozolânicas) têm sido utilizadas como substitutas parciais do cimento, como, por exemplo, cinzas volantes e sílica ativa (AMINE; LEKLOU; AMIRI, 2017; KAWABATA; TAKAHASHI; WATANABE, 2021; LEKLOU; NGUYEN; MOUNANGA, 2017). Deve-se atentar, porém, ao uso do metacaulim que pode não mitigar a reação (DEF) por causa do alto teor de Alumina (HOPPE et al., 2015).

O quadro 8 reúne os trabalhos já publicados sobre a ocorrência de formação de etringita tardia em dormentes onde essa patologia foi apontada como a principal causa de deterioração dos dormentes. Em todos os casos registrados, os dormentes foram curados a vapor e as manifestações patológicas se iniciaram em menos de 10 anos após a produção dos dormentes. Os níveis de SO_3 nesses dormentes também se encontravam acima dos valores recomendados na época em que foram produzidos. Os casos de ocorrência simultânea de RAA e DEF foram registrados no Quadro 8.

Quadro 8 – Trabalhos publicados sobre DEF em dormentes de concreto

Local	Data de fabricação	Idade dos dormentes (anos)	Tipo de cimento	Cura a vapor?	Temperatura máxima de cura	SO ₃	C ₃ A	Consumo de cimento	Referência
Estados Unidos	1980-90	< 10 anos	CP de alta resistência inicial	Sim	não informado	1-3%	não informado	não informado	(MIELENZ et al., 1995)
Suécia	1992-96	7 anos	CP “especial”	Sim	60°C	3,70%	8,00%	500 kg/m ²	(SAHU; THAULOW, 2004)
Índia	não informado	6 anos	CP de alta resistência inicial	Sim	>80°C	2,22%	7,50%	não informado	(AWASTHI et al., 2017)

Fonte: O autor (2022).

4.2 PATOLOGIAS DE CAUSAS EXTRÍNSECAS

Nas seções posteriores estão descritas as principais patologias de causa extrínseca que atingem os dormentes de concreto protendido.

4.2.1 Deterioração da região de apoio dos trilhos (RSD)

A deterioração da região de apoio dos trilhos é uma patologia comum em dormentes de concreto protendido, principalmente nas ferrovias dos Estados Unidos, onde há um maior número de registros de acidentes em razão desse problema (SHURPALI et al., 2014; VAN DYK; DERSCH; EDWARDS, 2012). A RSD (rail seat deterioration), como é chamada na literatura existente, se caracteriza pelo desgaste da superfície do concreto na interface entre o dormente e a palmilha do trilho (Figura 30).

Figura 30 – Deterioração da região do apoio dos trilhos (RSD)



Fonte: Federal Railroad Administration (2019).

O mecanismo por meio do qual o RSD ocorre não é unanimidade entre os pesquisadores, mas há alguns fatores apontados como potenciais causadores dessa patologia. Segundo Kernes (2013) e Zeman (2010), existem 5 mecanismos que potencialmente contribuem para o RSD no dormente de concreto, são eles: a abrasão, esmagamento, fissuras provenientes de ciclos de gelo-degelo, fissuras provenientes da pressão hidráulica e erosão hidroabrasiva (Hydro-Abrasive Erosion).

Ademais, a abrasão, ou desgaste superficial do concreto, está associado ao movimento relativo que ocorre na região abaixo do trilho, associado a tensões normais e cisalhantes, presença de finos e umidade que por meio do atrito desgastam a superfície do concreto. Já o esmagamento (crushing) é decorrente de altas cargas de impacto ao qual o trilho está submetido durante a passagem do material rodante.

Já a presença de água atua nessa patologia por meio dos fenômenos da fissuração por pressão hidráulica e da erosão hidro abrasiva. Estudos anteriores demonstraram que as superfícies de concreto sofrem um desgaste abrasivo maior na presença de umidade, possivelmente devido ao enfraquecimento da pasta do concreto ao ser exposta à umidade (WU et al., 2011; ZEMAN, 2010). Da mesma forma, a presença de materiais finos na superfície do concreto mostrou acelerar a taxa de abrasão dos dormentes em testes de resistência à abrasão padrão (KERNES et al., 2011). Além disso, a água também tem um papel significativo no potencial de degradação pelo fenômeno dos ciclos de congelamento-degelo em locais com variação climática significativa (ZEMAN, 2010).

Outro fator associado à ocorrência do RSD é a ausência ou o desgaste acentuado da palmilha amortecedora abaixo do trilho, também conhecida como almofada. Nesse caso, o trilho faz contato direto com o concreto, aumentando os efeitos dos impactos vertical e lateral (CHOROS; COLTMAN; MARQUIS, 2007).

Já Mcqueen (apud SILVA; OLIVEIRA, 2015) considera que a maior causa para ocorrência da deterioração do concreto na região de apoio dos trilhos é oriunda de falha dos materiais de fixação do trilho no dormente, que permitiriam uma rotação considerável do trilho e uma maior solicitação da área abaixo dele.

Em geral, o RSD pode se apresentar de duas formas: desgaste superficial uniforme, onde a área abaixo do trilho apesar de desgastada ainda apresenta certa planicidade (Figura 30), e desgaste superficial irregular onde o padrão de desgaste na região tem um formato triangular (Figura 31). Esse segundo padrão foi observado mais recentemente, e é encontrado, principalmente em regiões de curvas de grande inclinação.

Figura 31 – Desgaste superficial do concreto (RSD) com formato triangular



Fonte: Greve et al. (2015).

Entre as consequências do RSD estão o desgaste precoce do concreto, com redução da sua vida útil e a possibilidade de abertura de bitola (afastamento entre os trilhos), que configura uma situação de alto risco para ocorrência de descarrilamentos (ZEMAN et al., 2009). Alguns estudos também já mostraram que o RSD pode reduzir significativamente a capacidade de carga dos dormentes de concreto protendido a depender do nível de desgaste dos dormentes (SILVA et al., 2020b; YOU et al., 2019).

Nesse contexto, essa patologia foi apontada como principal causa de um acidente ferroviário que ocorreu em 2006, em Washington DC, onde um trem com 4 carros de passageiros descarrilou em uma curva causando um prejuízo de aproximadamente 850 mil dólares e deixando 30 pessoas feridas. Investigações no local do acidente indicaram a presença de uma sequência de 19 dormentes de concreto que apresentavam deterioração da região de apoio dos trilhos, com desgastes variando de 1.5 a 30mm (NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2006).

A RSD é uma patologia difícil de ser identificada em inspeções ferroviárias de rotina em razão da sua ocorrência ser embaixo do trilho. Em geral, para que seja feita uma inspeção detalhada ou manutenção corretiva emergencial é necessária a interrupção da operação ferroviária, para que os trilhos sejam levantados e a manutenção possa ser feita (KERNES et al., 2014). Um método de reparo utilizado por alguns operadores ferroviários é o preenchimento da área desgastada com epóxi (ou outro material de endurecimento rápido) que permite o retorno da operação ferroviária dentro de algumas horas (EDWARDS; LANGE, 2014; LUTCH; HARRIS; AHLBORN, 2009). Já Choros et al. (2007) defendem que o a melhor solução, porém mais onerosa, é a substituição definitiva do dormente.

Um dos métodos para prevenir a ocorrência desse problema é o desenvolvimento de palmilhas mais resistentes. As propriedades mecânicas das palmilhas, como o módulo de cisalhamento, módulo de flexão, dureza e geometria afetam o comportamento de atrito na região de apoio dos trilhos e influenciam a ocorrência da abrasão (KERNES et al., 2011). Diferentes tipos de polímeros já foram utilizados na fabricação destas palmilhas, sendo o de poliuretano o mais utilizado (DO CARMO et al., 2014). Atualmente, já existem palmilhas especiais desenvolvidas com camadas intercaladas de metal e borracha que vêm apresentando resultado bastante superior às palmilhas tradicionais tanto na resistência quanto na durabilidade (CARRASCAL et al., 2019; PÉREZ et al., 2020).

Além disso, Shurpali et al. (2014, 2017) investigaram a influência do tipo de concreto e da camada de proteção da região de apoios dos trilhos na ocorrência do RSD. Dentre as diversas misturas e dosagens estudadas (concreto autoadensável, concreto com aditivo incorporador de ar, concreto reforçado com fibras, com diferentes adições minerais e outros) foi observado que o concreto reforçado com fibras metálicas foi o tipo de concreto que obteve um resultado mais significativo contra a patologia do RSD, apresentando uma redução de 65% no desgaste da região de apoio dos trilhos. Eles também observaram que a utilização de uma camada de poliuretano na região de apoio dos trilhos aumentou em 85% a resistência do concreto contra ocorrência do RSD.

4.2.2 Fissuras verticais na região de apoio dos trilhos

Uma das principais falhas associadas à redução de desempenho dos dormentes de concreto protendido é o surgimento de fissuras verticais na região do dormente que dá apoio aos trilhos. Em geral, esse tipo de fissura se inicia na parte de baixo do dormente e sobe em direção aos trilhos (TAHERINEZHAD et al., 2013). Sua causa está associada às altas forças de impacto as quais a via permanente está submetida durante a passagem do trem, o que pode gerar um alto momento positivo na região de apoio dos trilhos que ultrapassa o limite de resistência à tração do concreto e origina as fissuras (Figura 32).

Figura 32 – Fissuras na região de apoio dos trilhos no dormente de concreto



Fonte: Zeman (2010).

Essas forças de impacto que ocorrem na linha férrea são forças de curta duração, mas de grande intensidade, geradas durante a passagem do trem por defeitos existentes na superestrutura da via permanente e nas rodas do trem (YE; WANG; MINDESS, 1994). Entre os defeitos da via, pode-se citar os defeitos superficiais nos trilhos (ondulações e descamação) e as regiões de descontinuidades da via devido a presenças de talas de junção de trilhos e de soldas em más condições. Do mesmo modo, os principais defeitos das rodas ferroviárias são a presença de calos (wheel flats), escamação (shelling) e lascamento (spalling) do aço da roda (ALVES, 2000). Quanto maior o nível de degradação da ferrovia e de seu material rodante, maiores serão as cargas de impacto na via e os riscos de defeitos precoces em seus componentes (REMENNIKOV; KAEWUNRUEN, 2008).

De acordo com Kaewunruen e Remennikov (2009), um fato que está associado ao surgimento precoce de fissuras em dormentes de concreto protendido é o fato de o método de dimensionamento atual basear em uma análise simplista, onde os efeitos dinâmicos são incorporados por meio da utilização de fatores de carga muitas vezes não realistas. Na concepção de com Remennikov et al. (2012), esse tipo de dimensionamento atende bem às solicitações de rotina, contudo, em dormentes de concreto sob tráfego não rotineiro, uma análise dinâmica realista é recomendada para o dimensionamento do dormente. Muitos pesquisadores propuseram métodos mais realistas por meio de uma abordagem de projeto probabilística, com utilização de dados de campo, representativos das reais demandas de flexão a que os dormentes estão submetidos (EDWARDS et al., 2020; KAEWUNRUEN et al., 2019; KAEWUNRUEN; REMENNIKOV; MURRAY, 2014; LEONG, 2007; REMENNIKOV; MURRAY; KAEWUNRUEN, 2012).

De forma a avaliar a influência das fissuras (na região de apoio dos trilhos) no desempenho da superestrutura ferroviária, Montalbán Domingo et al., (2014) realizaram um estudo computacional por meio do método dos elementos finitos. O modelo avaliou as deformações e deflexões em diferentes camadas da via (trilho, dormente, lastro, sublastro) e levou em consideração três condições diferentes de dormente: não fissurado, fissurado na seção central e fissurado na seção do apoio do trilho. O modelo com fissuras na região de apoio do trilho foi o que apresentou maiores variações de tensão e deformações na estrutura ferroviária. Foi estimado que a rigidez vertical total da via sofre uma redução de até 5% com a presença de dormentes fissurados na seção de apoio dos trilhos. De maneira geral, o aumento das deflexões produz maior deformação nas camadas granulares que podem comprometer o desempenho estrutural da via permanente.

Kaewunruene e Remennikov (2010) realizaram investigações experimentais com o objetivo de compreender a propagação de fissuras decorrentes de cargas dinâmicas em dormentes de concreto protendido submetidos a cargas de impacto. Foi observado que as primeiras fissuras que surgiram eram pequenas fissuras de flexão de pequena abertura (0.01-0.02mm) e, como esperado, as cargas de maior intensidade geraram fissuras mais compridas e largas. Observaram também que a rigidez da via influencia de maneira significativa na forma como as fissuras se propagam, com a fissuração se iniciando mais rapidamente em vias com rigidez excessiva.

Uma forma de atenuar a ocorrência de formação de fissuras na região de apoio dos trilhos é por meio da identificação precoce de rodas defeituosas que estejam gerando altas cargas de impacto na via. De acordo com Kaewunruen e Remennikov (2006), as rodas defeituosas são responsáveis pelas cargas de maior intensidade em uma ferrovia. A identificação desse problema pode ser feita por meio da utilização de um mecanismo conhecido como WILD (Wheel Impactor Load detector), que é instalado na via para monitorar o impacto causado pela passagem das rodas dos trens, indicando aquelas que necessitam passar por uma manutenção. Esse mecanismo foi utilizado primeiramente em uma ferrovia do corredor Nordeste da AMTRAK que apresentava muitos dormentes fissurados na região dos trilhos na década de 1980, desde então já foi utilizado com sucesso em muitas ferrovias do mundo. (MOODY, 1987).

Uma outra forma minimizar essa patologia é por meio da utilização de palmilhas amortecedoras de alta resistência que amortecem o impacto das cargas dinâmicas e reduzem a deflexão devido à flexão do dormente. (SADEGHI, 2010).

Nem todas as fissuras que surgem nos dormentes são detectáveis a olho nu, muitas vezes as fissuras podem estar cobertas pelo lastro. Em decorrência disso, hoje, já existem equipamentos e veículos ferroviários capazes de identificar a situação dos dormentes de concreto de maneira manual ou automatizada por meio de métodos não destrutivos como análise automática de imagem (TABATABAEI et al., 2019), emissões acústicas (JANELIUKSTIS et al., 2019) e métodos de ondas de tensão (eco impacto) e ultrassom (FISK, 2018; TATARINOV; RUMJANCEVS; MIRONOV, 2019). Dentre esses métodos, o do eco impacto tem se mostrado o mais promissor, ele se utiliza de reflexões de ondas dentro do concreto para localizar anomalias em sua massa, identificando a presença de fissuras, vazios e concreto de baixa resistência. Equipamentos ferroviários mais modernos que utilizam essa técnica já conseguem inspecionar dormentes de concreto protendido a uma velocidade de 1 dormente por segundo (FISK, 2018).

4.2.3 Fissuras verticais no meio do vão do dormente

Outro tipo de falha que pode ocorrer nos dormentes de concreto protendido é o surgimento de fissuras no meio do vão do dormente. Essas fissuras se iniciam no topo do dormente e descem verticalmente para a sua parte inferior à medida que o nível de degradação do concreto aumenta. Elas são decorrentes da existência de um alto momento fletor negativo no centro do vão do dormente, geralmente causado pela combinação de cargas dinâmica de alta intensidade com uma deficiência de apoio do dormente, geralmente relacionado a degradação ou ausência de lastro para dar suporte ao dormente (TAHERINEZHAD et al., 2013).

Figura 33 – Dormentes fissurados no meio do vão



Fonte: National Transportation Safety Board (2014).

Um exemplo de como esse tipo de falha pode contribuir para ocorrência de acidentes ocorreu em Nova York (EUA) em 2013, onde um trem de ferrovia de carga descarrilou em uma curva e causou um prejuízo de mais 800 mil dólares. O relatório de análise do acidente indicou que a provável causa do acidente foi uma abertura de bitola (afastamento dos trilhos) excessiva decorrente de uma combinação de lastro degradado e dormentes danificados. Os dormentes em questão apresentavam sinais de desgaste superficial e várias fissuras verticais nas suas faces superior e lateral (Figura 33). Ainda de acordo com o relatório: *“As fissuras no centro do vão do dormente são uma indicação de que não há suporte nas extremidades dos dormentes (falta de lastro) e que estes podem flexionar ou arquear quando submetidos a cargas do trem. Quando os dormentes se curvam, a bitola da via aumenta porque os trilhos inclinam para fora”*. (NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2014).

González-Nicieza et al. (2008) investigaram o problema de dormentes fissurados em uma ferrovia por onde passavam vagões com cargas de até 370kN por eixo, consideradas cargas excepcionais por causa da sua grande magnitude. Os dormentes eram recém-instalados quando apresentaram fissuras verticais no meio do vão, alguns inclusive chegaram a romper na sua seção central (Figura 34). Após uma análise criteriosa dos materiais e do projeto do dormente, concluiu-se que as principais causas da falha dos dormentes foram o fato do dormente ter sido subdimensionado e as anomalias encontradas no sistema lastro-sublastro. O lastro apresentava granulometria inadequada e capacidade de carga abaixo do esperado, não cumprindo corretamente sua função de suportar o dormente.

Figura 34 – Dormente rompido em sua seção central



Fonte: González-Nicieza et al. (2008).

Sobre esse tema, Bastos (2016) realizou ensaios em dormentes de concreto apoiados de 6 formas distintas, simulando possíveis distribuições de lastro sob o dormente, variando desde um dormente totalmente apoiado pelo lastro a dormentes suspensos apoiados apenas em sua seção central. O estudo quantificou a influência das condições de apoio do dormente na sua deflexão e consequente abertura da bitola. Os resultados dos testes mostraram que os momentos fletores no centro do dormente são mais sensíveis à distribuição do lastro (condições de apoio) do que na região do assento do trilho.

Os trabalhos de Grassie e Cox (1985), Hamarat et al. (2020) e Wolf (2015) também procuraram elucidar o comportamento dinâmico da ferrovia diante de diferentes formas de suporte do dormente pelo lastro. Em todos eles, chegou-se à conclusão de que o desempenho do dormente à flexão é influenciado de maneira significativa pelas condições de suporte do dormente, o que pode aumentar os momentos negativos no centro do dormente e momentos positivos próximo às suas extremidades. Além disso, na ausência de lastro, reduz-se o amortecimento da vibração dos dormentes e consequentemente, as deflexões do sistema de fixação e as tensões dos dormentes são amplificadas.

Diante disso, fica clara a importância que o lastro possui no desempenho estrutural dos dormentes, sendo um elemento essencial para a correta distribuição de carga e prevenção de fissuras e desgastes precoce do concreto. Para que isso seja possível, é essencial que os programas de manutenção ferroviária incluam sempre atividades de inspeção das condições de lastro. Hoje, já existem veículos ferroviários que conseguem inspecionar a via, identificando a situação de apoio dos dormentes e possíveis ocorrências de “vazios” no lastro (SUSSMANN et al., 2017; SYSYN et al., 2021).

4.2.4 Desgaste Superficial do corpo do dormente

O contato do dormente de concreto com a brita do lastro causa um atrito que desgasta a superfície de ambos materiais (STEFFLER, 2013). Esse desgaste, quando ocorre em grande intensidade, reduz a seção do dormente e arredonda as suas pontas, caracterizando o fenômeno da abrasão do concreto (Figura 35) que afeta a durabilidade e desempenho estrutural do dormente (NGAMKHANONG; LI; KAEWUNRUEN, 2017). Além disso, esse fenômeno gera uma grande quantidade de finos que contribui para a contaminação do lastro ferroviário, processo conhecido como “colmatação do lastro” (fouled ballast), que reduz a qualidade da via permanente e implica altos custos para manutenção (HUANG; TUTUMLUER, 2011; HUDSON et al., 2016).

Figura 35 – Efeito da abrasão do concreto em um dormente de concreto



Fonte: National Transportation Safety Board (2014).

São poucos os estudos acerca desse tema nas ferrovias, mas acredita-se que os principais responsáveis pelo acelerado desgaste superficial do dormente são a ocorrência de altas cargas de impacto, a falta de manutenção na via permanente, a ação da água e a má qualidade do material do concreto (RIDING et al., 2018). As altas e repetidas cargas de impacto, as quais o dormente está submetido nas regiões de descontinuidades da ferrovia (talas de junção, soldas, encontro de viadutos e outros) aumentam a tensão atuante sobre o lastro e o atrito entre o dormente e a brita, acelerando o desgaste destes elementos (BONA, 2005).

Ademais, a água também é um aspecto que deve ser levado em consideração, visto que o desgaste do dormente é ampliado em regiões de alta precipitação e com drenagem ineficiente, onde água atua como um agente lixiviador do concreto e da brita, facilitando a ocorrência da abrasão do dormente (STEFFLER, 2013). A qualidade do concreto também tem grande influência na ocorrência do desgaste superficial, uma vez que a resistência à abrasão do concreto é função da dureza dos agregados e da dureza de pasta de cimento. E a dureza do cimento é função da sua resistência à compressão. (VAN DAM, 2014).

Figura 36 – Desgaste superficial do dormente de concreto e lastro contaminado



Fonte: Riding et al., (2018).

Riding et al. (2018) realizaram inspeções em 36 locais de diferentes ferrovias dos Estados Unidos onde os dormentes apresentavam a patologia da abrasão superficial. Foi constatado que todos esses locais apresentavam sinais de drenagem ineficiente (Figura 36) e que na maioria dos locais a via permanente estava em um mau estado de conservação, sendo os dormentes mais degradados encontrados em pontos de elevada rigidez da via. Como consequência dessa patologia, foi verificado que em muitos locais a abrasão do dormente de concreto contribuiu para o desgaste precoce do trilho e para o surgimento de trincas no centro do dormente, situações que diminuem a segurança operacional da ferrovia. Além disso, o estudo também observou que os dormentes de concreto produzidos com agregados calcários tinham um desgaste superficial maior e mais uniforme do que aqueles produzidos com agregados silicosos, já que o calcário tem uma dureza mais próxima a do cimento.

Dito isso, a abrasão superficial do concreto prejudica a resistência e a capacidade de impacto dos dormentes das ferrovias, reduzindo seu desempenho estrutural e exigindo que os dormentes sejam monitorados regularmente (KAEWUNRUEN; FREIMANIS; GOTO, 2018). Segundo Ngamkhanong et al. (2019), dormentes com desgaste de 15 mm em sua superfície inferior, por exemplo, apresentaram redução na capacidade de carga próxima a 20%. Em outro estudo, os mesmos autores investigaram a influência da abrasão do dormente na retração e fluência do concreto, e observou-se que há um aumento nas deformações de fluência e retração por causa da abrasão do dormente (LI; NGAMKHANONG; KAEWUNRUEN, 2017). Embora muitos estudos tenham buscado formas de minimizar ou

solucionar o problema da deterioração do concreto causada por abrasão, ainda existe uma grande preocupação com o desempenho do dormente de concreto protendido frente a esse tipo de dano (HASNAT; GHAFOORI, 2021).

De forma a melhorar a resistência à abrasão do concreto, conforme explicitado no item 3.3.5 (adições minerais) deste trabalho, vem se tornando cada vez mais comum a utilização de concretos com a utilização de baixa relação água/cimento, agregados resistentes, aditivos superplastificantes, adições minerais e fibras.

Outra medida preventiva para minimizar a abrasão do dormente de concreto e suas consequências negativas é por meio do uso de palmilhas poliméricas embaixo do dormente, que são componentes de polímero instalados na interface de contato entre o dormente e o lastro. Esse tipo de palmilha aumenta a área de contato entre o lastro e o dormente, amortece a carga de impacto, reduz a deformação e os movimentos verticais e laterais do lastro, reduzindo consideravelmente a degradação do lastro e do dormente. (JAYASURIYA; INDRARATNA; NGOC NGO, 2019).

4.2.5 Danos decorrentes de ciclos de Congelamento/Degelo

Em locais de clima frio e onde a temperatura do ar flutua entre valores próximos a zero, os dormentes de concreto podem sofrer danos atribuídos à ação dos ciclos de congelamento e degelo. Os modos de falha associados a estes ciclos incluem a ocorrência de trincas estruturais e lascamento do concreto, que levam a uma diminuição significativa da resistência à compressão e à tração do concreto em razão de microfissuras em sua matriz (CASTANEDA, 2016; SHANG; SONG; OU, 2009). Apesar de essa patologia não ser comum no Brasil, optou-se por relatá-la para contribuir com o estado da arte do tema.

Ainda que existam muitas pesquisas já feitas abordando o desempenho estrutural do concreto em situações de congelamento e degelo, esse tipo de falha continua a ocorrer com certa frequência (SMITH et al., 2019). Qin et al., (2016) avaliaram os danos dos ciclos de congelamento e degelo de um concreto de alto desempenho, avaliando também a influência desses ciclos no concreto protendido. O concreto em questão possuía em resistência a compressão aos 28 dias de 66MPa, tendo sido produzido com aditivos superplastificante e adição de cinza volante. Conforme esperado, a resistência à compressão do concreto se reduziu à medida que o número de ciclos de congelamento/degelo aumentava, chegando a uma redução de 40% após 300 ciclos. Com relação às forças de protensão, foi observado uma perda da força de protensão de 5% após 250 ciclos, um valor relevante e que deve ser levado

em consideração no dimensionamento de estruturas protendidas em locais de grande variabilidade climática. Resultado semelhante foi obtido por Cao et al. (2016) ao avaliar a perda da força de protensão em concretos protendidos submetidos a ciclos de gelo/degelo.

Ademais, estudos realizados com objetivo de investigar os efeitos de condições climáticas extremas sobre o desempenho estrutural dos dormentes de concreto protendido mostraram que dormentes instalados em regiões de clima frio podem sofrer uma redução da resistência à compressão do concreto e um aumento significativo das suas deformações por fluência e retração, o que contribui para a perda de protensão do dormente e pode resultar em fissuração e redução da vida útil do dormente. (LI; KAEWUNRUEN, 2019).

Vale ressaltar que o efeito do congelamento-degelo nos dormentes de concreto também é apontado como umas das causas de deterioração dos dormentes na região de apoio dos trilhos (RSD). Nesse caso particular, a falha ocorre quando uma quantidade considerável de água se acumula entre o concreto e a palmilha de suporte do trilho, fazendo com que o concreto atinja a saturação crítica por meio do preenchimento dos seus poros, de forma que os vazios de ar se tornem incapazes de aliviar as pressões hidráulicas geradas pelo congelamento e acarretando a fissuração da pasta (BAKHAREV; STRUBLE, 1997).

Nesse sentido, as principais causas da expansão da pasta de cimento expostas a ação do congelamento estão associadas a pressão hidráulica (em razão de um aumento no volume específico da água no congelamento de grandes poros) e a pressão osmótica (por causa da diferença de concentração de sais na solução dos poros) dentro do concreto (EBRAHIMI et al., 2018).

Em geral, esse problema pode ser amenizado por meio da utilização de aditivos incorporadores de ar, já que as pequenas bolhas de ar dentro do concreto aliviam a pressão hidráulica gerada pelo congelamento da água (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SHANG; CAO; WANG, 2014). Alguns cuidados também devem ser tomados durante a produção dos dormentes de concreto, principalmente durante a vibração do concreto, que não deve ser excessiva a ponto de reduzir o teor de ar presente na pasta de concreto (ALBAHTTITI, 2015).

Além disso, há estudos que mostram também as vantagens na utilização de adições minerais (KHAN; SIDDIQUE, 2011), adição de fibras (NILI et al., 2018; RICHARDSON; COVENTRY; WILKINSON, 2012), e a confecção de concretos hidrofóbicos (MUZENSKI; FLORES-VIVIAN; SOBOLEV, 2015) como forma de aumentar a resistência do concreto aos ciclos congelamento-degelo.

4.3 RESUMO

São várias as manifestações patológicas que o dormente de concreto protendido pode apresentar. As causas associadas a essas patologias diferem em sua origem e quase sempre levam a uma redução da capacidade estrutural dos dormentes.

A fissuração é o principal sintoma da maioria das patologias apresentadas nesse capítulo. A localização e a forma das fissuras são uma boa indicação da origem da falha apresentada. As fissuras decorrentes de ataques químicos geralmente têm um aspecto multidirecional (fissura tipo mapa). As fissuras resultantes de cargas de alto impacto são verticais e podem aparecer tanto no meio do vão do dormente quanto na região de apoio do trilho, a depender das condições de apoio do dormente. Fissuras longitudinais podem ocorrer como resultado do processo de fabricação inadequado do dormente.

Além do desenvolvimento de fissuras, os dormentes também podem se deteriorar na região de apoio dos trilhos (RSD) e apresentar desgaste superficial. Em ambos casos, a abrasão do concreto e a ação da água são fatores que contribuem consideravelmente para a degradação do dormente e a consequente perda capacidade de carga dos dormentes de concreto protendido.

Apesar de poucas publicações a respeito das patologias de origem química (AAR e DEF) em dormentes de concreto protendido, esse tipo de falha já foi responsável pelo descarte de milhões de dormentes nas últimas décadas. Os dormentes de concreto afetados por DEF geralmente apresentam altos teores de SO_3 e C_3A no cimento e são curados em altas temperatura (cura a vapor), apesar da elevação da temperatura não ser algo indispensável para a ocorrência desta patologia. No caso do RAA, as fissuras geralmente se desenvolvem em menos de dez anos após a produção dos dormentes e estão sempre associadas a agregados reativos e à presença de umidade.

Os dormentes também podem sofrer danos decorrentes de sucessivos ciclos de congelamento e degelo. Essas ocorrências afetam a resistência à compressão do concreto e causam um aumento significativo na deformação em razão da fluência e retração do concreto, o que contribui para a perda de protensão dos dormentes e resulta em redução de vida útil.

Embora já existam técnicas corretivas que permitem a recuperação e reutilização de dormentes danificados, a melhor maneira de evitar sua degradação é por meio de uma boa escolha de materiais do concreto, a manutenção adequada da via férrea e um projeto realista do dormente, que leve em conta todas as cargas que o dormente será submetido. O atual

método de dimensionamento de dormentes de concreto não considera todas as cargas e condições que ocorrem na via, principalmente sob tráfego não rotineiro.

5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo versa sobre o estudo de caso realizado em dormentes de concreto protendido que apresentaram degradação precoce em uma ferrovia brasileira. A ferrovia em questão possui cerca de 130 mil dormentes de concreto instalados na via, dos quais 70 mil foram produzidos na década de 1980 na obra de construção inicial da ferrovia e os outros 60 mil foram fabricados no início dos anos 2000 para uma obra de expansão dessa linha férrea.

A partir das inspeções periódicas nos dormentes produzidos na década de 1980, com mais de 30 anos de uso, constatou-se que os dormentes se encontram em bom estado de conservação, sem oferecer risco para a operação dos trens da ferrovia. Contudo, as equipes de manutenção ferroviárias observaram que os dormentes fabricados no início dos anos 2000, após 10 anos de instalados na via, estavam apresentando fissuras precoces ao longo de todo o seu corpo, e que essa situação se estendia também para os dormentes que estavam no pátio de estoque de reposição, ou seja, dormentes que nunca haviam sido utilizados em campo. Esse fato trouxe, para o setor de engenharia e manutenção da ferrovia, o desafio de investigar esta patologia, de forma a verificar a confiabilidade do desempenho dos dormentes e garantir a segurança na operação dos trens.

Tendo como desafio a investigação das causas das patologias dos dormentes produzidos nos anos 2000, descreve-se a seguir as etapas deste estudo de caso para contribuir no entendimento dessa degradação, que pode vir a comprometer a operação da ferrovia em questão.

5.1 HISTÓRICO DE FABRICAÇÃO DOS DORMENTES

Nas seções posteriores estão descritos o histórico e as principais características da fabricação dos dormentes de concreto protendido estudado.

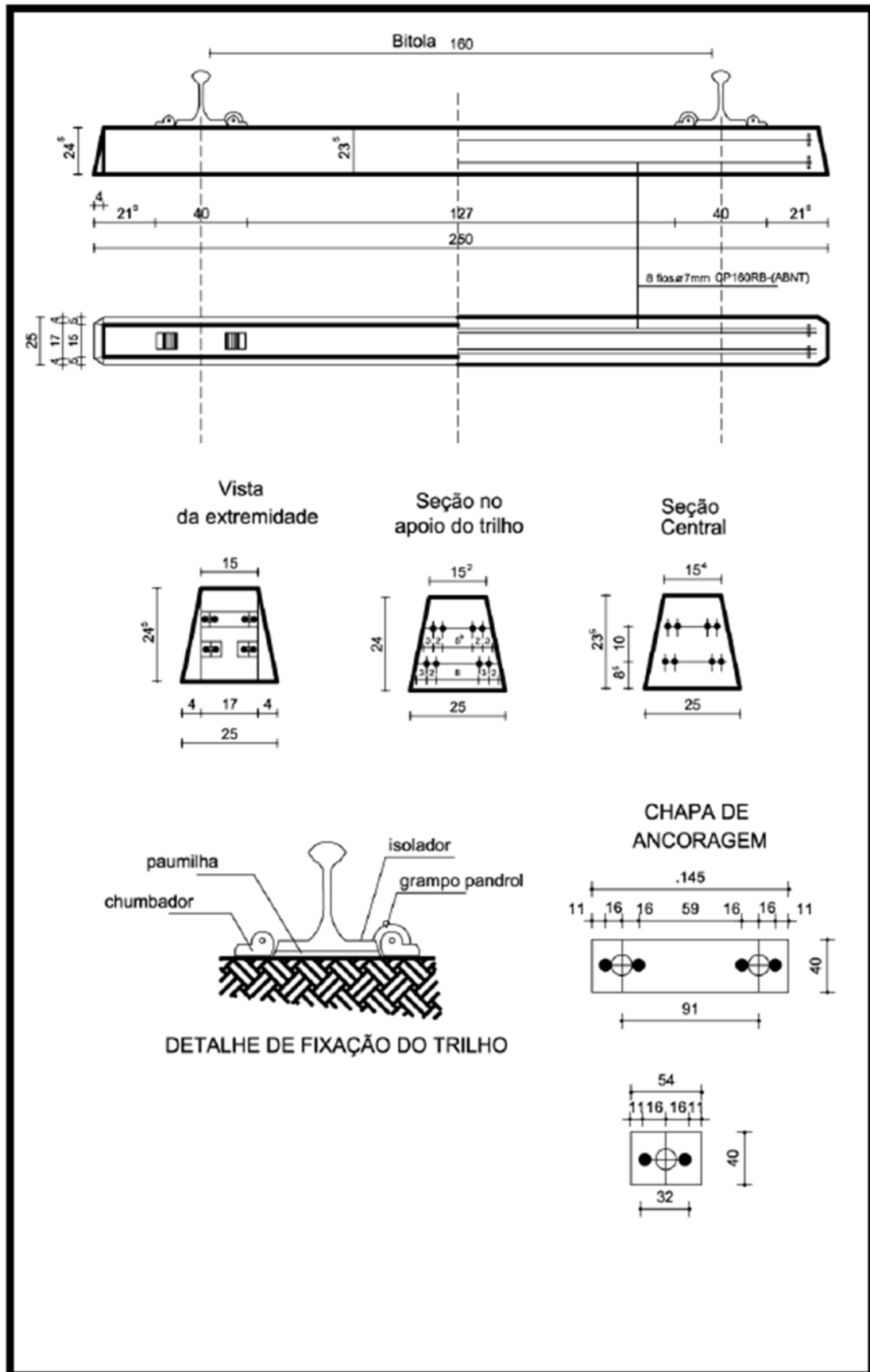
5.1.1 Características técnicas e geométricas

Os dormentes fabricados na década de 1980 e nos anos 2000 possuem as mesmas características técnicas e geométricas. São dormentes de concreto do tipo monobloco protendido (pré-tensionados) produzidos no sistema de fôrmas individuais (Single-mould).

O projeto geométrico do dormente (Figura 37) foi baseado no método conhecido como THOSTI-BBRV, desenvolvido na Alemanha. Esse método consiste na utilização de fios

aderentes, com placas de ancoragem nas extremidades. É necessário também o emprego de fôrmas metálicas resistentes, para que as mesmas suportem a força de protensão, sem apresentar deformações que possam prejudicar o seu desempenho.

Figura 37 – Projeto geométrico dos dormentes



Fonte: Leão et al. (1985 *apud* ANDRADE, 2001).

As especificações básicas para o desenvolvimento desses dormentes foram as seguintes:

Via Permanente:

- Bitola: 1.600 mm
- Trilho: TR-57 (ABNT)
- Espaçamento entre os dormentes: 600mm
- Carga máxima por eixo: 220 KN
- Velocidade máxima do trem: 90 km/h
- Raio máximo de curvatura: 312 m
- Rampa máxima: 2%

Armadura:

- 08 fios de protensão, $\Phi 7$ mm, CP-160, RB.
- Tensão de escoamento: 1.400 MPa
- Tensão de ruptura: 1600 MPa

Concreto:

- fck: 45 MPa
- Resistência à compressão no momento da transferência da protensão: 35 MPa
- Resistência à tração na flexão aos 7 dias: 5 MPa
- Relação água/cimento máxima: 0,38
- Diâmetro máximo dos agregados: 32 mm

Cargas sobre o dormente:

- Nos apoios dos trilhos:
 $P = 162 \text{ kN}$ (momento positivo)
 $P = 149 \text{ kN}$ (momento negativo)
- No centro do dormente:
 $P = 34 \text{ kN}$ (momento positivo)
 $P = 76 \text{ kN}$ (momento negativo)

5.1.2 Materiais e produção dos dormentes

As informações sobre os materiais utilizados nos dormentes e da sua produção foram obtidas em consulta ao setor de engenharia da empresa ferroviária em questão, porém nem

todas as informações foram disponibilizadas ou encontradas de maneira satisfatória. Essas informações seriam importantes para ajudar a entender a patologia estudada.

Para a sistematização das informações desta investigação, foram definidos dois grupos, a saber: GI sem informações registradas e GII com informações registradas.

5.1.2.1 GI – Sem informações registradas

Este grupo consiste em descrever as informações não encontradas na investigação:

- Sobre **materiais**: não foram encontradas informações quanto ao tipo de areia utilizada, nem se houve uso de adições ou aditivos na dosagem do concreto.
- Sobre o **sistema de produção**: não há informações sobre o traço utilizado.

5.1.2.2 GII – Com informações registradas

Este grupo consiste no conjunto de informações registradas em documento ou não. As que não estão registradas em documentos foram obtidas de modo verbal, a partir de depoimento de funcionários.

-Sobre **materiais**: há registros que o cimento utilizado foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial e que os agregados graúdos foram provenientes de uma pedreira localizada na cidade Jaboatão dos Guararapes em Pernambuco, 5km a sul do ponto médio de uma zona de cisalhamento de Pernambuco (Figura 38), região caracterizada por rochas deformadas tectonicamente.

As britas provenientes da pedreira de Jaboatão foram estudadas por Prado (2008), que identificou a presença de mineral deletério (quartzo deformado) e a ocorrência de texturas mirmequítica e pertítica na amostra estudada. Apesar das evidências encontradas indicarem se tratar de um agregado potencialmente reativo (baseado na NBR 15777), observou-se que no ensaio de expansão linear as amostras ensaiadas apresentaram baixos valores de expansão, ou seja, um comportamento considerado inócuo do ponto de vista da reatividade.

de perto pelas equipes de engenharia e manutenção da ferrovia. De 2012 até os dias atuais, observou-se que as fissuras vêm crescendo lenta e gradualmente, inclusive com alguns dormentes tendo apresentado rupturas e necessidade de substituição. Todas as fotos e ensaios apresentados neste trabalho são do estado atual dos dormentes estudados.

O quadro fissuratório dos dormentes fabricados em 2000 possui duas tipologias distintas. A primeira tipologia está localizada nas faces paralelas aos fios e a segunda nas faces das extremidades, que contêm os fios.

Assim, nas faces paralelas aos fios (exceto a face inferior), as fissuras estão orientadas na direção longitudinal dos dormentes, caminhando na mesma direção dos fios de protensão (Figura 39 e 40). Já nas faces das extremidades, foi observada uma fissuração do tipo “mapa” (Figura 41). Vale ressaltar que nos dormentes instalados na linha corrida não foi possível inspecionar a face inferior, porém, nos dormentes do estoque de reposição que estavam suspensos não foram observadas fissuras na face inferior, que é a face mais protegida do calor e da variação de umidade.

Figura 39 – Fissura longitudinal na face lateral do dormente



Fonte: O Autor (2022).

Figura 40 – Fissuras longitudinais na face superior do dormente



Fonte: O autor (2022).

Figura 41 – Fissura tipo “mapa” na extremidade dos dormentes



Fonte: O autor (2022).

A disposição horizontal (e paralela às barras de aço) das fissuras das faces laterais do dormente se justifica pelo fato da força de protensão aplicada no dormente dificultar a formação de fissuras transversais ao sentido da protensão, visto que o dormente se encontra

comprimido. Já nas extremidades dos dormentes, não há mais força de protensão atuando (conforme pode ser visto no projeto do dormente no item 5.1.1), possibilitando o surgimento de fissuras multidirecionais.

Alguns dos dormentes instalados na via estão em situação de degradação mais avançada, com destacamento de parte do concreto da extremidade do dormente e exposição da placa de ancoragem da protensão (Figura 42).

Figura 42 – Dormentes apresentando ruptura da extremidade e ferragem exposta



Fonte: O autor (2022).

Cerca de 93% os dormentes fabricados nos anos 2000 apresentam algum grau de fissuração, inclusive aqueles estocados para uso futuro (Figuras 43 a 46), ou seja, que não estão submetidos a nenhuma carga estática ou dinâmica proveniente da ferrovia. A única exceção a essa situação são os dormentes localizados dentro das estações e abaixo de grandes viadutos (abrigados do sol e chuva), estes não apresentam quadro fissuratório, encontrando-se em um melhor estado de conservação, estes representam cerca de 7% do total de dormentes instalados na via.

Figura 43 – Fissuras nos dormentes estocados



Fonte: O autor (2022).

Figura 44 – Fissuras nos dormentes estocados



Fonte: O autor (2022).

Figura 45 – Fissuras tipo “mapa” na extremidade dos dormentes do estoque



Fonte: O autor (2022).

Figura 46 – Fissuras tipo “mapa” na extremidade dos dormentes do estoque



Fonte: O autor (2022).

A partir dos fatos relatados anteriormente, foi possível descartar a hipótese de um possível subdimensionamento do dormente ou existência de cargas excessivas além das previstas em projeto, e foi possível inferir que as condições ambientais (principalmente umidade e calor) estariam diretamente relacionadas com a causa de degradação dos dormentes, levando à suspeita de uma possível manifestação patológica associada a reações envolvendo a formação de produtos expansivos no concreto, como, por exemplo, formação de etringita tardia, reação álcali-agregado ou corrosão da armadura do concreto.

A partir dessas suposições, partiu-se para uma investigação mais aprofundada das características dos materiais dos dormentes: análise do cimento, dos aços e dos agregados.

5.3 INVESTIGAÇÃO DOS DORMENTES DEGRADADOS

5.3.1 Análise visual

A análise visual consistiu em realizar uma inspeção preliminar com a utilização de dispositivos como lupas, máquina fotográfica, paquímetro e fissurômetro com o objetivo de identificar e registrar todas as anomalias presentes na estrutura do dormente de concreto, para, a partir daí, comparando-se com quadros típicos de sintomas, identificar indícios da patologia atuante.

Com relação à busca por sintomas de RAA e DEF, foram recolhidas 5 amostras de diferentes dormentes que foram analisadas individualmente a fim de identificar características como a presença de fissuras (tanto na argamassa quanto no agregado), presença de poros contendo material (gel) em seu interior, bordas de reação, manchas escuras na argamassa e descolamento entre agregados e a pasta.

Já com relação à possível corrosão das armaduras, as amostras foram analisadas quanto à direção das fissuras, verificação da existência de exposição do aço corroído, superfície do aço, existência de fragmentação e destacamento do cobrimento etc.

Foi também realizada uma comparação entre os dormentes encontrados em campo e o seu projeto estrutural, verificando-se a dimensão e posição das armaduras, cobrimento de concreto e características das chapas de ancoragem.

5.3.2 Ensaio de Carbonatação

A carbonatação do concreto é condição essencial para o início da corrosão das armaduras (CASCUDO, 1997). A carbonatação resulta diretamente da ação dissolvente do anidrido carbônico (CO_2), presente no ar atmosférico, sobre o cimento hidratado, com a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) e a consequente redução do pH do concreto até valores inferiores a 9, o que altera as condições de estabilidade química da película passivadora do aço.

Assim, a principal informação que se pretende com essa medida é saber se a carbonatação chegou até à armadura, contribuindo para deterioração da estrutura.

O indicador escolhido para a análise do concreto dos dormentes foi a fenolftaleína. Esse indicador adquire coloração vermelho carmim com pHs iguais ou superiores a 9,5 aproximadamente. Abaixo desse pH, o concreto tende a não sofrer alteração de cor quando da aspersão do indicador (mantém-se incolor). Tem-se então, com a linha divisória entre a região incolor e a de coloração típica, a evidência do avanço da frente de carbonatação para o interior do concreto de cobrimento.

Foram ensaiados 5 dormentes retirados da linha férrea, sendo os ensaios feitos em diferentes pontos dos dormentes (extremidades e faces laterais). Os cortes na estrutura do dormente foram feitos com auxílio de uma marreta e uma talhadeira. Em todo perímetro cortado foi aspergido solução de fenolftaleína.

5.3.3 Reconstituição de traço e análise de enxofre

A reconstituição de traço do concreto e análise do teor de enxofre do cimento são parâmetros que podem fornecer indícios importantes quanto a patologia atuante nos dormentes estudados, uma vez que um elevado consumo de cimento e um alto teor de SO₃ no cimento podem estar relacionados com a formação de etringita tardia.

O estudo envolvendo a reconstituição de traço foi realizado em uma única amostra de concreto extraído de um dormente que apresentava um extenso quadro fissuratório. O procedimento adotado para a realização da reconstituição de traço foi o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), seguindo o procedimento da norma interna ABCP PO-GT 3016. Esse procedimento se fundamenta na determinação de CaO (componente majoritário do cimento) presente da argamassa, e na obtenção do teor de cimento considerando que 60% (teor médio) do cimento é formado por CaO. Nesse ensaio, não é levado em conta a eventual presença de materiais calcários (além do cimento) ligados aos agregados graúdos e miúdos.

Com a definição do traço do concreto, foi possível estimar o consumo de cimento no concreto considerando a massa específica do concreto seco como 2350 kg/m³ através da equação abaixo:

$$C = \frac{\gamma_c}{1 + a + b + \left(\frac{a}{c}\right)}$$

Onde C é consumo de cimento, γ_c a massa específica do concreto, “a” a relação agregado miúdo/cimento, “b” relação agregado graúdo/cimento e “a/c” a relação água/cimento.

A análise química específica para determinação do enxofre foi realizada com base na norma ASTM C114 (Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement), obtendo-se o teor de trióxido de enxofre (SO₃) presente na amostra de concreto. Os teores determinados representam os valores totais existentes nas amostras, a partir de ataque ácido. A partir do conhecimento do traço do concreto e considerando que os agregados não são fontes de SO₃, foi possível estimar o teor de SO₃ em relação à massa de cimento.

A realização do ensaio de análise química e a interpretação dos resultados foi realizada em parceria com o laboratório SM CONTROLE DE QUALIDADE, localizado na cidade de Recife-Pernambuco.

5.3.4 Microscopia ótica de luz transmitida - Análise Petrográfica

A investigação petrográfica dos agregados e concreto dos dormentes estudados foi realizada via microscopia ótica de luz transmitida. Foram coletadas 3 amostras provenientes de 3 dormentes diferentes e confeccionadas lâminas delgadas para realização da análise. O procedimento da análise e a classificação da reatividade dos agregados foram feitos seguindo os preceitos da NBR 15577-3 (ABNT, 2018).

Assim, o objetivo principal da técnica de microscopia por luz transmitida é fazer a descrição mineralógica dos agregados constituintes dos concretos (origem, constituintes mineralógicos, textura, relações petrogenéticas e outros), com ênfase na investigação dos minerais potencialmente reativos do ponto de vista da RAA, por meio da análise em lâminas delgadas (MIZUMOTO, 2009). No caso de concretos, além de classificar os agregados, é possível determinar também a ocorrência de microestruturas provenientes da RAA, tais como bordas de reação ao longo dos agregados, gel nos poros, presença de microfissuras causadas pela expansão do gel produto da reação e outros (SANCHEZ, 2008).

A realização do ensaio de microscopia ótica de luz transmitida e a análise petrográfica foi realizada com a ajuda do professor Gorki Mariano, do departamento de geologia da Universidade Federal de Pernambuco.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

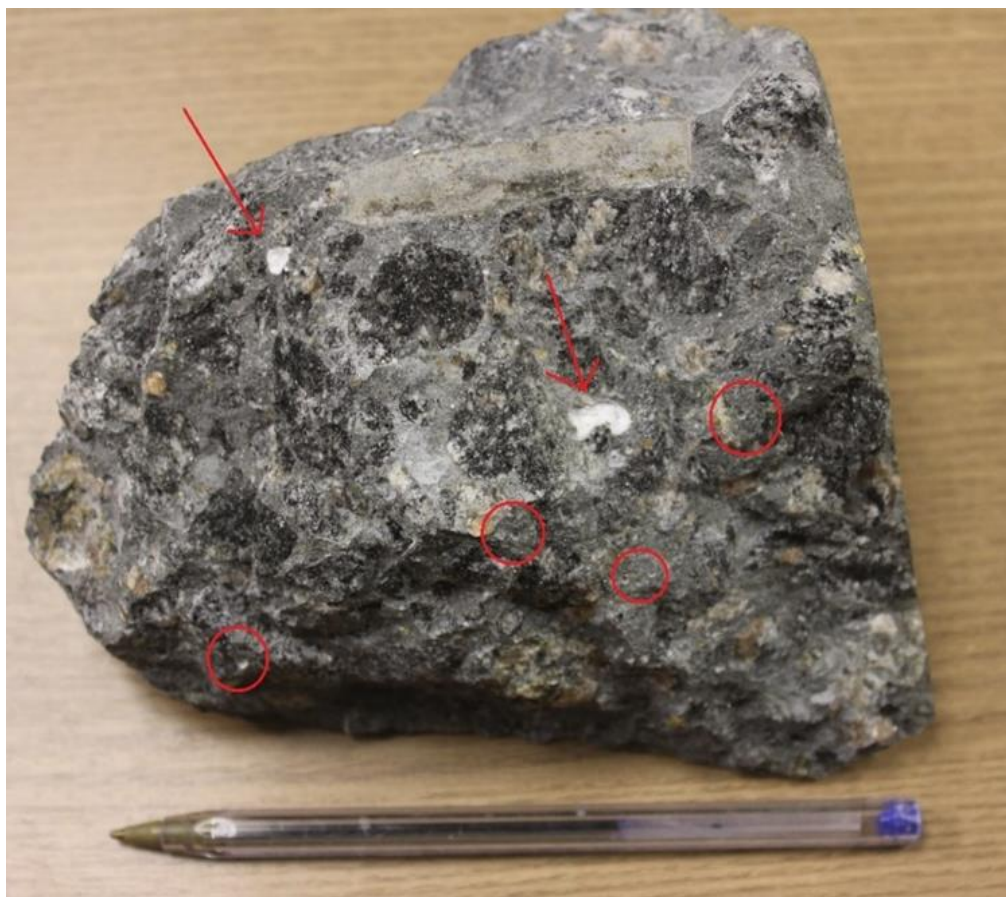
Compreende as análises dos resultados encontrados, bem como, discussões importantes sobre o estudo.

6.1 ANÁLISE VISUAL

Conforme descrito no item 5.1, a grande maioria dos dormentes inspecionados no campo e no estoque apresentavam algum grau de degradação, sendo as manifestações mais comuns a presença de fissuras longitudinais ao longo das faces laterais e superior e fissuras tipo “mapa” na extremidade do dormente.

Em todas as 05 amostras de concreto analisadas, foi possível identificar a presença de diversos poros com material esbranquiçado. As fotografias apresentadas nas Figuras 47 a 50, a seguir, registram as principais manifestações observadas nas amostras obtidas.

Figura 47 – Presença de material esbranquiçado nos poros e próximo aos agregados graúdos da amostra 01



Fonte: O Autor (2022).

Figura 48 – Vista ampliada dos poros contendo material esbranquiçado na amostra 01



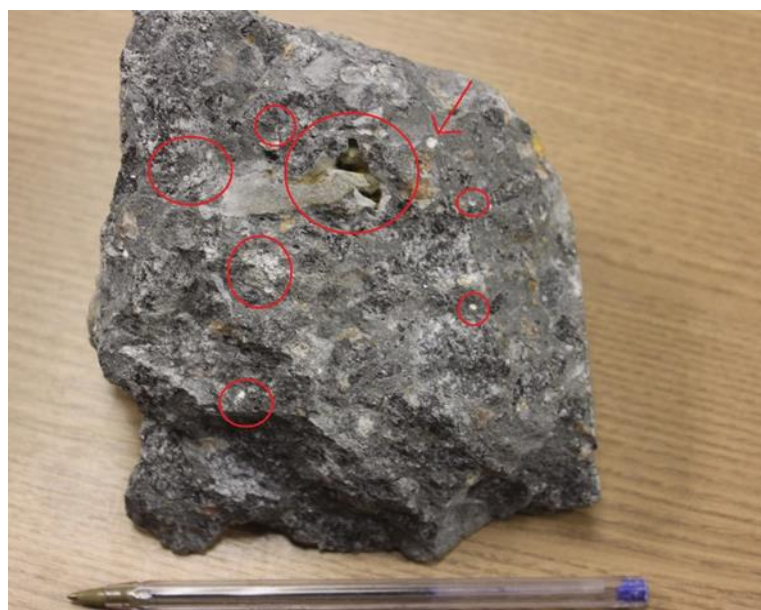
Fonte: O Autor (2022).

Figura 49 – Presença de inúmeros poros com material esbranquiçado na amostra 02



Fonte: O Autor (2022).

Figura 50 – Presença de poros e manchas esbranquiçadas na amostra 03



Fonte: O Autor (2022).

Apesar de todas as amostras apresentarem um grande número de poros preenchidos com material esbranquiçado e algumas manchas esbranquiçadas próximas aos agregados, não foi possível verificar claramente a presença de bordas de reação ao redor do agregado nem sinais de desagregação na interface agregado-pasta. As amostras 01 e 03 foram cortadas para serem analisadas internamente com mais detalhes, contudo também não foi possível identificar bordas de reação de maneira explícita, apenas foi identificado a ocorrência de uma fissura passando pelo agregado da amostra 03, conforme Figuras 51 a 53.

Figura 51 – Cortes realizados na amostra 03 (sem impregnação) e fissura identificada (foto à direita)



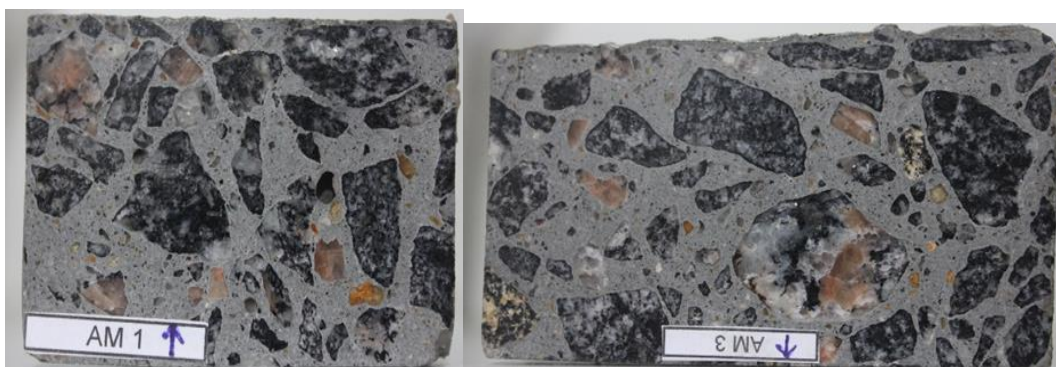
Fonte: O Autor (2022).

Figura 52 – Detalhe da fissura que passa pelo agregado gráúdo indicada na foto 47



Fonte: O Autor (2022).

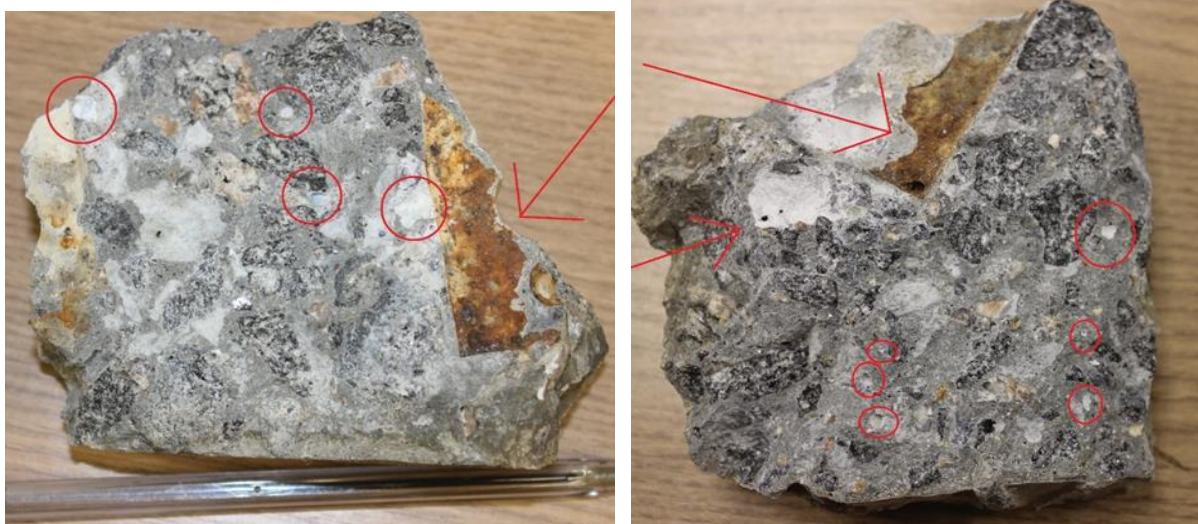
Figura 53 – Cortes impregnados das amostras 01 e 03



Fonte: O Autor (2022).

As amostras 04 e 05 (Figura 54), retiradas da extremidade do dormente, além de apresentarem poros esbranquiçados e manchas brancas no concreto, também apresentaram manchas de coloração marrom alaranjado, características de oxidação na região do concreto que cobria as placas de ancoragem da protensão, indicando que as placas de ancoragem estão passando por um processo de oxidação.

Figura 54 – Poros esbranquiçados, bordas de reação e manchas de oxidação nas amostras 04 e 05



Fonte: O Autor (2022).

Ao se analisar os dormentes internamente, observou-se que nos 5 dormentes analisados, a superfície do aço das chapas de ancoragem apresentava uma camada superficial de oxidação (Figura 55), não foi observado um aumento considerável na seção das chapas nem perda de seção do material.

Figura 55 – Chapas de ancoragem de protensão com sinais de corrosão



Fonte: O Autor (2022).

Já nos fios de protensão CP-160 (RB), por sua vez, não foram identificados sinais de corrosão, não sendo possível identificar manchas de corrosão ou quaisquer alterações na superfície do aço que indicasse um processo de oxidação (Figuras 56 e 57).

Figura 56 – Análise dos fios de protensão do dormente de concreto protendido



Fonte: O Autor (2022).

Figura 57 – Vista ampliada dos fios de protensão CP-160 (RB) dos dormentes estudados



Fonte: O Autor (2022).

Ademais, os cinco dormentes analisados estavam em concordância com o projeto estrutural apresentado na seção 5.2.1. A dimensão (Figura 58) e posição das armaduras estavam corretas, bem como a o cobrimento do concreto e as características das chapas de ancoragem.

Figura 58 – Verificação do diâmetro do fio de protensão



Fonte: O Autor (2022).

6.2 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

O resultado do ensaio de carbonatação natural realizado em 05 dormentes foi inesperado. Mesmo após mais de 20 anos de exposição, sob condições climáticas diversas, não foi observada nenhuma profundidade de carbonatação em qualquer uma das faces ensaiadas. As figuras 59 a 63 mostradas a seguir, apresentam os 05 dormentes ensaiados.

Figura 59 – Ensaio de carbonatação na extremidade do dormente nº 01



Fonte: O Autor (2022).

Figura 60 – Ensaio de carbonatação na extremidade do dormente nº 02



Fonte: O Autor (2022).

Figura 61 – Ensaio de carbonatação na extremidade do dormente nº 03



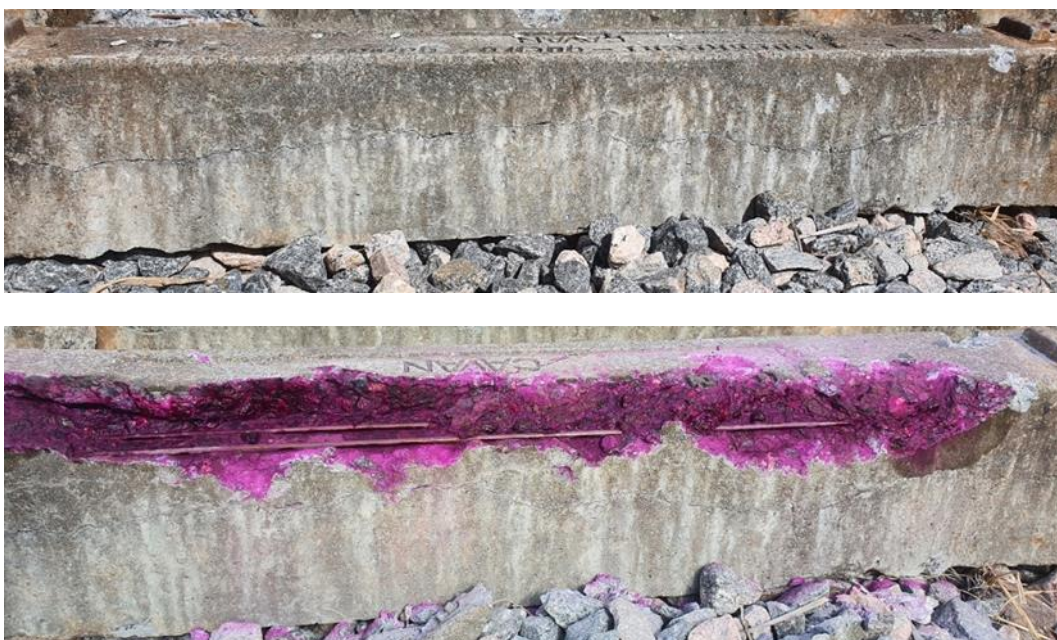
Fonte: O Autor (2022).

Figura 62 – Ensaio de carbonatação na lateral do dormente nº 01



Fonte: O Autor (2022).

Figura 63 – Ensaio de carbonatação na lateral do dormente nº 04



Fonte: O Autor (2022).

Mesmo com a utilização de fissurômetro não foi possível identificar qualquer espessura de concreto carbonatado. Este resultado reforça os estudos de Andrade (2006) e

Khan e Lynsdale (2002) de que o fenômeno de carbonatação geralmente não consiste em um problema para os concretos de alto desempenho.

6.3 RECONSTITUIÇÃO DE TRAÇO E ANÁLISE DE ENXOFRE

Por meio da análise da reconstituição de traço, chegou-se aos seguintes resultados para a amostra de concreto fornecida:

Quadro 9 – Resultados da análise de reconstituição de traço

Determinação	Resultado
Teor de Cálcio da argamassa	17,73% de Cao
Teor de Cimento na Argamassa	29,55%
Massa de cimento presente na argamassa (C1)	100,36g
Massa de agregado miúdo presente da argamassa (AM)	239,25g
Teor de cálcio aderido ao agregado graúdo	5,83% CaO
Teor de cimento aderido ao agregado graúdo	9,72%
Massa de cimento aderido ao agregado graúdo (C2)	42,25g
Massa de agregado graúdo (AG)	392,41g

Fonte: O Autor (2022).

Com base nos resultados anteriores, pode-se chegar ao traço estimado do concreto por meio da proporção entre as partes (C1+C2), AM e AG, resultando em um traço de 1:1,7:2,8.

Já o cálculo do consumo de cimento, foi realizado considerando que a massa específica do concreto seja 2350kg/m^3 e que o consumo de água/cimento do concreto em questão seja de 0,38 (relação a/c máxima constante no projeto do dormente), com isso chegou-se ao consumo estimado de cimento próximo a 400 kg por metro cúbico de concreto, um valor acima do consumo mínimo exigido pela norma brasileira de dormentes de concreto (NBR 11709:2015) e que está dentro do esperado para um concreto de alto desempenho.

O resultado da análise dos teores de enxofre na amostra de concreto, apresentou o seguinte resultado:

Quadro 10 – Resultados da análise de enxofre presente no cimento

Determinação	Resultado
Teor de SO_3	4,02%

Fonte: O Autor (2022).

O teor de SO_3 em relação à massa de cimento encontrado foi de 4,02%, um valor relativamente alto quando comparado com trabalhos que abordaram a ocorrência de DEF em dormentes de concreto. Além disso, segundo a norma brasileira de dormentes de concreto (11709:2015), para teores de SO_3 superiores a 2%, existe uma limitação quanto à temperatura máxima a que o concreto pode ser submetido no processo de cura térmica. Para um concreto com cimento com teor de enxofre de 4%, a temperatura máxima de cura acelerada cai de 70°C (limite geral) para 50° C (NBR 11709:2015).

6.4 MICROSCOPIA ÓTICA DE LUZ TRANSMITIDA – ANÁLISE PETROGRÁFICA

Tendo como base as investigações petrográficas realizadas via microscopia ótica de luz transmitida, os agregados graúdos constituintes das amostras são compostos por grãos de rochas gnáissicas de composição granítica, e encontram-se com foliação caracterizada pela orientação de biotita e de minerais quartzo-feldspáticos.

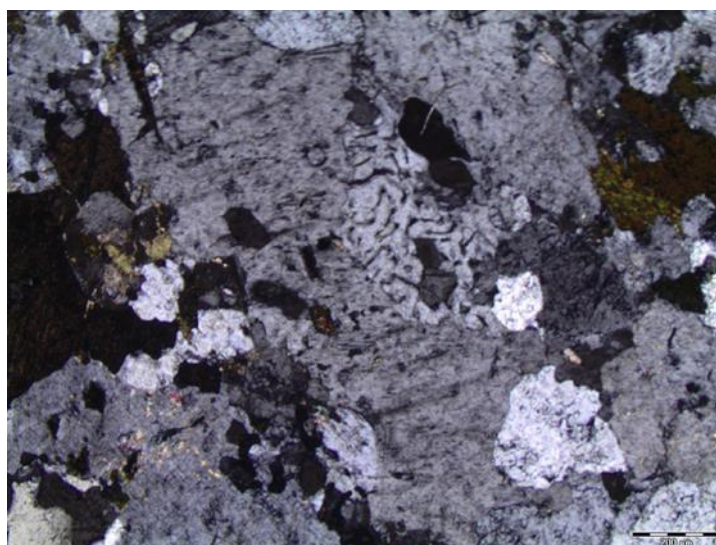
O agregado graúdo apresenta como principais minerais o quartzo, feldspato potássico e plagioclásio e como minerais acessórios a biotita, titanita, epidoto, hornblenda e apatita (Figura 64). Alguns raros grãos de quartzo apresentam extinção ondulatória e recristalização (Figura 68) por rotação de subgrão (frequente nas rochas ricas em quartzo que apresentam deformação tectônica). O plagioclásio ocorre como grão xenomórfico e foi possível identificar a extinção concêntrica com a presença de textura mirmequítica (Figura 65), bem como alterações por sericitização (Figura 66). Quanto aos feldspatos potássicos, ocorrem como grãos xenomórficos, com presença de geminação xadrez (caracterizando microclina) e exsolução de lamelas de plagioclásio formando textura perítica (Figura 67).

Figura 64 – Minerais presentes no agregado graúdo – Bt = biotita, Pl= plagioclásio, Ep= epidoto, Qtz = quartzo, Opc = minerais opacos



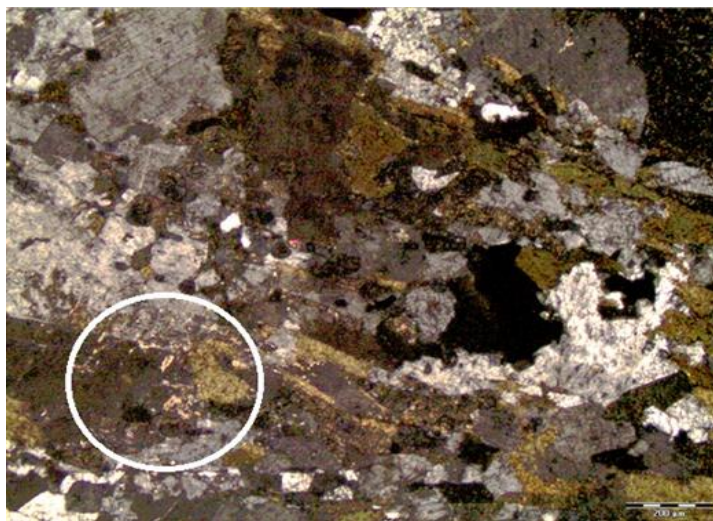
Fonte: O Autor (2022).

Figura 65 – Detalhe aumentado da Mirmequita (M)



Fonte: O Autor (2022).

Figura 66 – Processo de sericitização presente no agregado graúdo



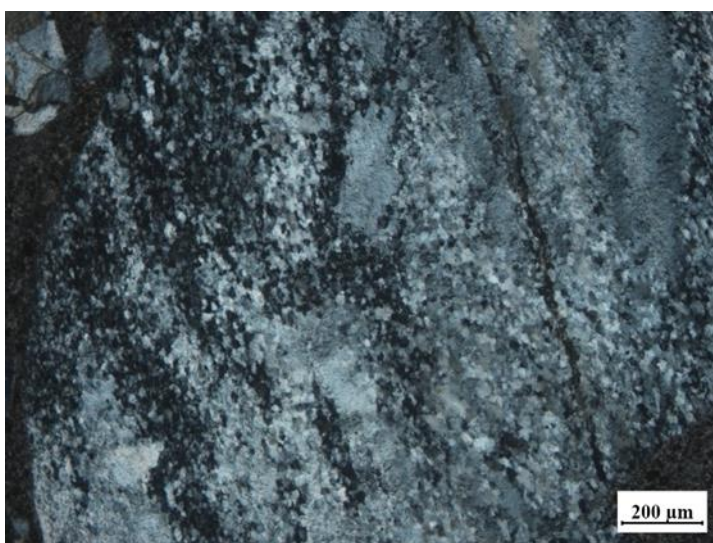
Fonte: O Autor (2022).

Figura 67 – Presença de Recristalização por subgrão e Pertita no agregado graúdo



Fonte: O Autor (2022).

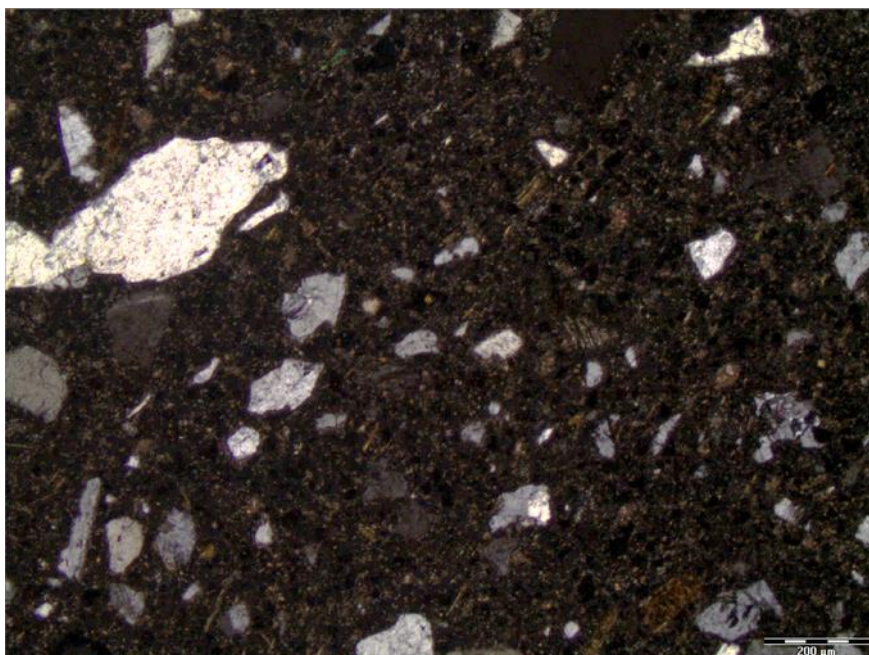
Figura 68 – Presença de quartzo recristalizado



Fonte: O Autor (2022).

Os agregados miúdos são compostos basicamente por quartzo, feldspato potássico, mica branca, epidoto e biotita (Figura 69). O quartzo ocorre como grão xenomórfico, a maioria submilimétrico, mas podendo alcançar até 1 mm e textura de extinção ondulante. O feldspato potássico ocorre disperso no cimento como grãos xenomórficos, variando de submilimétricos, até tamanhos máximos de 2 mm. Exsolução de plagioclásio formando textura pertítica também pode ser identificada.

Figura 69 – Grãos de quartzo característicos do agregado miúdo



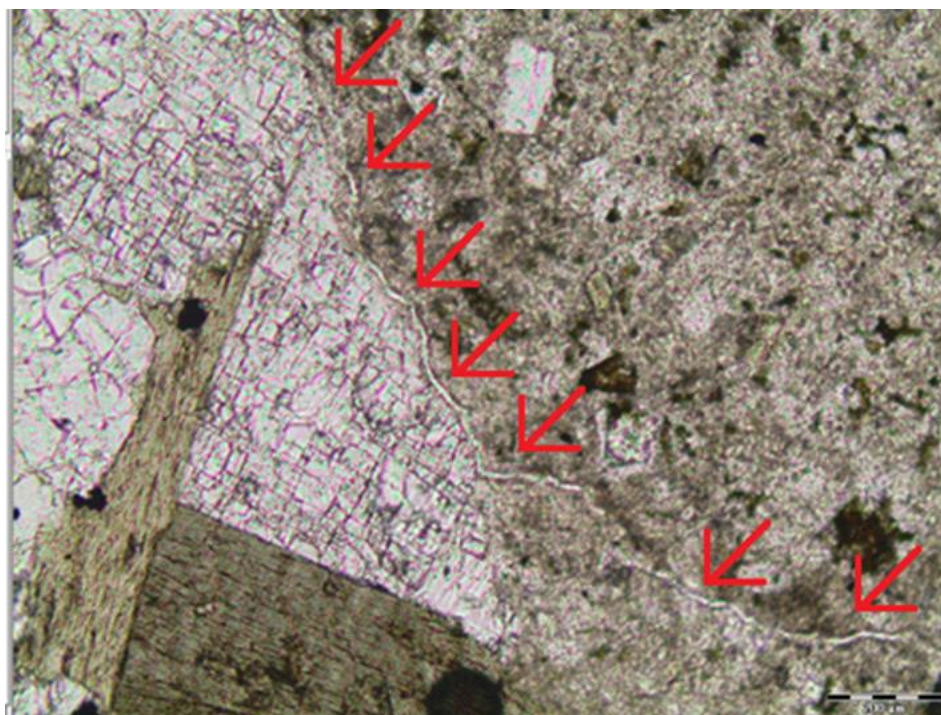
Fonte: O Autor (2022).

Com relação à potencialidade mineralógica dos agregados graúdos para a reação álcali agregado, tomando-se como referência a NBR 15577-3 (ABNT, 2018), destaca-se que nos agregados analisados foram encontrados indícios de reatividade apenas em uma das amostras, e de maneira rara e localizada. Foram identificados alguns cristais de quartzo deformados caracterizados pela presença de extinção ondulante e pela recristalização por rotação de subgrão. Porém, a quase totalidade dos quartzos identificados nas amostras estudadas não apresentavam indícios de deformação/reatividade.

A presença da textura mirmequítica, pertítica (pertita em chama) e sericitização também podem ser indicadores de alteração/deformação da rocha de acordo com a NBR 15577-3, tendo sido também identificados apenas localmente em uma das amostras.

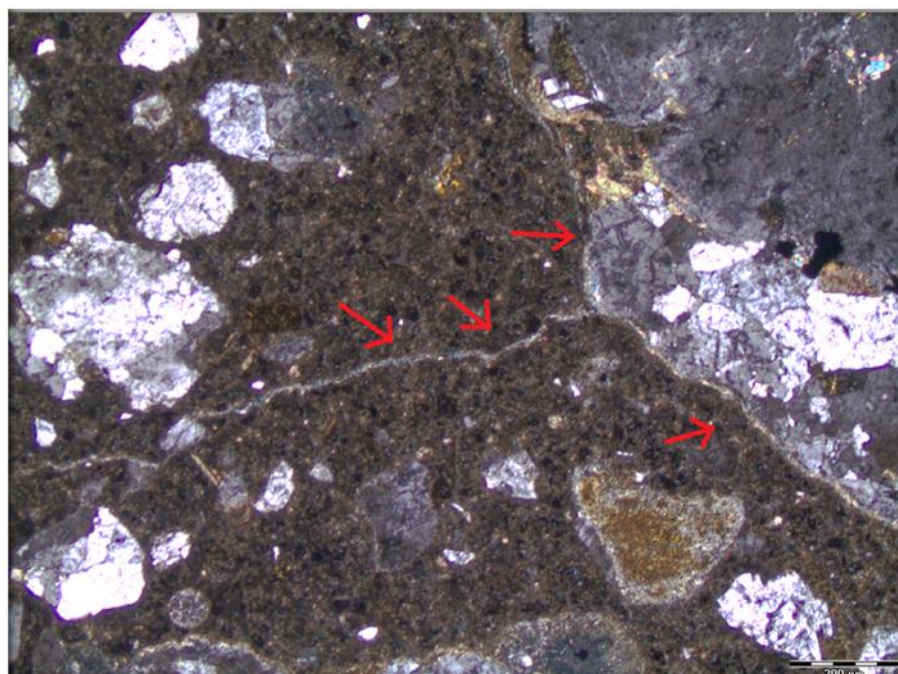
Por meio da microscopia ótica foi possível observar a ocorrência de 02 microfissuras próximas às bordas do agregado e a pasta de cimento (Figuras 70 e 71).

Figura 70 – Microfissuras identificadas na borda do agregado graúdo



Fonte: O Autor (2022).

Figura 71 – Fissuração nas bordas do agregado graúdo e na pasta de cimento do concreto



Fonte: O Autor (2022).

7 CONCLUSÃO

Da revisão da literatura apresentada neste trabalho, fica evidente que o entendimento das patologias nos dormentes de concreto protendido requer um conhecimento amplo dos principais fundamentos da engenharia ferroviária, que envolvem desde a forma de produção dos dormentes até a construção de uma ferrovia e o entendimento das cargas que passam por ela. Entender as causas das possíveis patologias que ocorrem nos dormentes de concreto é fundamental para prevenir gastos com manutenção e, sobretudo, para evitar acidentes.

Dessa forma, o dormente de concreto protendido apresenta desempenho superior aos demais tipos de dormentes principalmente nos quesitos de resistência mecânica, estabilidade e durabilidade, e por isso vem sendo o mais utilizado em projetos ferroviários modernos. De maneira geral, sua produção exige a utilização da cura térmica e reaproveitamento constante das fôrmas como forma de acelerar a produção dos dormentes.

A produção dos dormentes de concreto protendido tem evoluído cada vez mais na utilização de concreto de alto (e ultra alto) desempenho e na utilização de adições minerais, fibras e agregados recicláveis como forma de melhorar o desempenho do dormente e de obter um concreto mais econômico e sustentável do ponto de vista ambiental.

Depois de instalado no campo, são várias as manifestações patológicas que o dormente de concreto protendido pode apresentar. As causas associadas a essas patologias diferem em sua origem e quase sempre levam a uma redução da capacidade estrutural dos dormentes. A fissuração é o principal sintoma da maioria das patologias apresentadas nesse trabalho. A localização e a forma das fissuras são a principal indicação da origem da falha apresentada.

Dentre as patologias apresentadas, as patologias de origem química (RAA e DEF) chamam atenção por já terem sido responsáveis pelo descarte de milhões de dormentes ao redor do mundo. As características dessas patologias são bastante similares, sendo necessário uma investigação minuciosa para a identificação da patologia predominante no dormente.

Embora já existam técnicas corretivas que permitem a recuperação e reutilização de dormentes danificados, a melhor maneira de evitar sua degradação é por meio de uma boa escolha de materiais do concreto, o correto controle do processo de cura, a manutenção adequada da via férrea e um projeto realista do dormente, que leve em conta todas as cargas que o dormente será submetido.

O estudo de caso apresentado neste trabalho demonstrou uma investigação de um dormente de concreto protendido que apresentava fissuras e danos em sua estrutura em um período bastante inferior à vida útil estimada. Por meio de uma investigação com diversas

frentes, foi possível descartar hipóteses previamente levantadas e encontrar indícios da patologia atuante.

Nesse sentido, por meio da análise visual foi possível identificar fissuras tipo “mapa” características de patologias de origem química no concreto. Além disso, ao se analisar a parte interna do dormente, foi possível descartar a ocorrência de oxidação na armadura principal do dormente. Nessa etapa foi verificada a presença de poros contendo material esbranquiçado distribuídos em diversas partes da pasta do concreto, típico de reações expansivas do concreto como RAA e DEF. Verificou-se também que as bordas dos agregados não apresentavam contornos de reação significativos típicos do RAA, o que reduz a chance de o RAA ser apontado como principal fator de degradação do concreto estudado.

O ensaio de carbonatação foi útil para descartar a ocorrência de carbonatação do concreto e a consequente suscetibilidade do aço para um processo de oxidação, confirmando as observações feitas pela análise visual.

A análise petrográfica dos agregados demonstrou que apesar de haver no concreto agregados com características potencialmente reativas para RAA com a presença de quartzo deformado, por exemplo, estes ocorrem de maneira isolada e rara. A grande maioria dos agregados analisados não apresentaram sinais de potencial reativo, o que também diminui as chances de ocorrência de RAA como causa principal da degradação dos dormentes.

A reconstituição de traço demonstrou que o consumo estimado do concreto analisado estava dentro do padrão médio dos concretos de alto desempenho. Já o teor de SO₃ estimado no cimento ficou próximo ao limite máximo aceitável em norma e que limita significativamente a temperatura máxima permitida para a realização da cura a vapor, tornando-se uma situação favorável para o desenvolvimento da formação da etringita tardia.

Portanto, com base na análise visual e tendo como referência os resultados dos estudos laboratoriais nas amostras de concreto apresentados, pode-se dizer que os dormentes em questão estão sofrendo, predominantemente, de um ataque interno de sulfatos característico da formação tardia da etringita (DEF).

Sugestão de trabalhos futuros:

- Realizar ensaio de Microscopia eletrônica de varredura com EDS em amostras dos dormentes estudados neste trabalho como forma de complementar e confirmar a conclusão aqui obtida.

- Apesar da NBR 11709:2015 estabelecer uma relação entre o teor de SO_3 no cimento e a temperatura máxima para a cura térmica na produção dos dormentes de concreto, existe a necessidade de mais estudos a respeito da influência do teor de SO_3 sobre o processo de cura térmica e consequente durabilidade do dormente.
- Diante do ritmo acelerado de produção dos dormentes de concreto pretendido nas fábricas, onde após poucas horas depois da concretagem eles já precisam ser desformados, existe a necessidade de mais estudos a respeito de aceleradores de endurecimento do cimento que permitam uma desforma rápida sem que haja perda das propriedades mecânicas do concreto.
- Aprofundar os estudos sobre os dormentes de polímero como potencial substituto para o dormente de concreto. No Brasil, existem poucos estudos a respeito dos dormentes poliméricos e não existe normatização para esse tipo de dormente, que tem como uma de suas grandes vantagens a possibilidade de ser produzido a partir da reciclagem de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 363. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. **American Concrete Institute**, Farmington Hills, Michigan, v. 92, n. Reapproved, p. 55, 1997.

AGINAM, C. H.; CHIDOLUE, C. A.; NWAKIRE, C. Investigating the effects of coarse aggregate types on the compressive strength of concrete. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, v. 3, n. 4, p. 1140-1144, 2013.

Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/ebef/84c9fbd5ebe30e6d022eb074063bd704fbca.pdf>.

ALBAHTTITI, Mohammed T. **Freeze-thaw performance of prestressed concrete railroad ties**. 2015. 207p. Dissertation (Doctoral of Philosophy) - Department of Civil Engineering College of Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2015.

ALBUQUERQUE, Mariana Zerbone Alves De; CARDOSO, André Luiz Rocha. A importância das ferrovias para a articulação do rural com o urbano em Pernambuco. **Revista Rural & Urbano**, Recife. v. 1, n. 1, p. 96-103, 2016.

ALENCAR, Ignez Santiago. **Dormentes de Madeira tratados com creosoto, Alternativas para a reposição e reuso**: Estudo de caso da estrada de ferro Carajás com vistas à saúde ambiental. 2004. 202 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ALVES, Luis Henrique Dias. **Mecanismos de Desgastes de Rodas Ferroviárias**. 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ALVES, Talita de Freitas. **Análise do comportamento de via permanente lastrada com emprego de sublastro betuminoso**. 2018. 148f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

AMINE, Yasser; LEKLOU, Nordine; AMIRI, Ouali. Effect of supplementary cementitious materials (scm) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes. **Energy Procedia**, v. 139, p. 565-570, 2017.

AMORIM JUNIOR, Nilson Santana. **Avaliação da durabilidade de concretos geopoliméricos obtidos a partir de metacaulim**. 2020. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

ANDRADE, Tibério W. C. O.; HELENE, Paulo. Avaliação de Desempenho do Concreto Empregado nos Dormentes do Metrô da Região Metropolitana do Recife após 16 anos. São Paulo, **Concreto & Construções**, IBRACON, n. 43, p. 95-107, 2006.

ANDRADE, Tibério Wanderley Correia de Oliveira. **Avaliação do concreto de alto desempenho utilizado nos dormentes de concreto protendido nas linhas do Metrô da Região Metropolitana do Recife**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIO (ANTF). **Informações Gerais - Associação Nacional dos Transportes Ferroviários**. 2020. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 4 ago. 2021.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (AREMA). **Manual for Railway Engineering - Ties**. Lanham, Maryland, 2014. DOI: 10.4324/9780203061350-39.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Dormentes de Concreto**. São Paulo: ABCP, 1960.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7590**: Trilho Vignole-Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11709**: Dormente de concreto - Projeto, materiais e componentes. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15577-3**: Agregados - Reatividade álcali agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AWASTHI, Anupam; MATSUMOTO, Koji; NAGAI, Kohei; ASAMOTO, Shingo; GOTO, Seishi. Investigation on possible causes of expansion damages in concrete. **Journal of Asian Concrete Federation**, v. 3, n. 2, p. 49-66, 2017. DOI: 10.18702/acf.2017.06.3.1.49.

BAE, Younghoon; PYO, Sukhoon. Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance. **Engineering Structures**, v. 210, n. January, p. 110374, 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110374. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110374>.

BAINGAM, Lalita; SAENGSOY, Warangkana; CHOKTAWEEKARN, Pongsak; TANGTERMSIRIKUL, Somnuk. Diagnosis of a Combined Alkali Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation. **Thammasat International Journal of Science and Technology**, v. 17, n. 4, p. 22-35, 2012.

BAKHAREV, T.; STRUBLE, L. J. Microstructural features of railseat deterioration in concrete ties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 9, n. 3, p. 146-153, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:3(146).

BARBOSA, Roberto Spinola; COSTA NETO, Álvaro Costa. Dinâmica do rodeiro ferroviário. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, v. 18, p. 318-329, 1997.

BASTOS, Josué César. **Analysis of the Performance and Failure of Railroad Concrete Crossties With Various Track Support Conditions**. 2016. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 2016.

BASTOS, Josué; DERSCH, Marcus S.; EDWARDS, J. Riley; BARKAN, Christopher P. L.; EDWARDS, J. Riley. Determination of Critical Track Conditions and their Impact on the

Performance of Concrete Crossties and Fastening Systems. *In: PROCEEDINGS OF THE AREMA 2015 ANNUAL CONFERENCE 2015*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.]

BASTOS, Paulo. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibra de aço**. 1999. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção 1**. 5. ed. rev. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2018.

BEZGIN, Niyazi Özgür. High performance concrete requirements for prefabricated high speed railway sleepers. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 340-351, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.020.

BEZGIN, Niyazi Özgür. A discussion for the reduction in the length of a prestressed concrete railway tie in time. **Road and Rail Infrastructure VI**, v. 6, n. May, p. 617-623, 2021. DOI: 10.5592/co/cetra.2020.989.

BODAPATI, Naga Narendra B.; ZHAO, Weixin; PETERMAN, Robert J.; WU, Chih-hang John; BECK, B. Terry; HAYNES, Mark; HOLSTE, Joseph R. **Influence of indented wire geometry and concrete parameters on the transfer length in prestressed concrete crossties**. *In: PROCEEDINGS OF THE 2013 JOINT RAIL CONFERENCE 2013*, Knoxville, Tennessee. **Anais [...]**. Knoxville, Tennessee. p. 8.

BONA, Melissa Ellen. **The effect of straightening and grinding of welds on track roughness**. 2005. Queensland University of Technology, 2005.

BONNETT, Clifford F. **Practical Railway Engineering**. 2nd Editio ed. London,: Imperial College Press, 2005.

BORGES, Barsanufo Gomides. Dossiê ferrovias. **Revista UFG**, v. Ano XIII, n. 11, p. 27-36, 2011.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de ferro 1: Via Permanente**. 2 ed. Belo Horizonte, 1988.

BRITO, P. **Ascensão e queda de um Ideal: O Barão de Mauá e seu legado para o sistema ferroviário brasileiro**. Brasília, 2002.

CAO, Da Fu; QIN, Xiao Chuan; MENG, Shao Ping; TU, Yong Ming; ELFGREN, Lennart; SABOUROVA, Natalia; GRIP, Niklas; OHLSSON, Ulf; BLANKSVÄRD, Thomas. Evaluation of prestress losses in prestressed concrete specimens subjected to freeze–thaw cycles. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 2, p. 159-170, 2016. DOI: 10.1080/15732479.2014.998241.

CARRASCAL, Isidro A.; PEREZ, Alejandro; CASADO, José; DIEGO, Soraya; POLANCO, Juan A. Development of metal rubber pads for high speed railways. **Computers in Railways**, v. 181, n. 1, p. 487-498, 2019. DOI: 10.2495/CR180431.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armadura em concreto - Inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997.

CASTANEDA, Daniel. **Freeze-thaw environment of precast concrete crossties and effect of vibration on fresh materials**. 2016. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016. Disponível em: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/92745>.

CATARINO, Joana Filipa. **Avaliação da Influência do Cimento na interação Cimento-Superplastificante**. 2012. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.

CATOIA, Bruna. **Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em lajes alveolares protendidas**. 2011. 325f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CETIN, A.; CARRASQUILLO, R. L. High-Performance Concrete: Influence of coarse aggregates on mechanical properties. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 3, p. 251-262, 1998.

CHANDRA, Satish. **Railway Engineering**. New York: Oxford University Press, 2007.

CHANDRAN, Praneeth; THIERRY, Florian; ODELIUS, Johan; FAMUREWA, Stephen M.; LIND, Håkan; RANTATALO, Matti. Supervised Machine Learning Approach for Detecting Missing Clamps in Rail Fastening System from Differential Eddy Current Measurements. **Applied Sciences-Basel**, v. 11, n. 9, 2021.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto protendido - Teoria e prática**. São Paulo: Editora Pini, 2013.

CHOROS, John; COLTMAN, Michael N.; MARQUIS, Brian. Prevention of derailments due to concrete tie rail seat deterioration. **Proceedings of the ASME/IEEE Joint Rail Conference and the ASME Internal Combustion Engine Division, Spring Technical Conference 2007**, n. 617, p. 173-181, 2007. DOI: 10.1115/JRC/ICE2007-40096.

COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4-5 SPEC, p. 401-407, 2003. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00080-X.

COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; TROLI, R.; COLLEPARDI, M. Mechanisms of Actions of Different Superplasticizers For High Performance Concrete. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGHPERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETES STRUCTURES 1999*, Gramado, RS. **Anais [...]**. Gramado, RS p. 503-524.

COPE, David L.; ELLIS, John B. **Plain Line Maintenance of Track: Volume 4 - British Railway Track**. 7th Revise ed. [s.l.]: Permanent Way Institution, 2001.

COSTA, Felipe Lima da. **Resistência ao ataque por sulfato em sistemas de cimento Portland: efeito do polimorfismo do aluminato tricálcico**. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

Porto Alegre, 2018. Disponível em:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7556065><http://www.pubmedcentral.nih.gov/article/render.fcgi?artid=PMC394507><http://dx.doi.org/10.1016/j.humpath.2017.05.005><http://doi.org/10.1007/s00401-018-1825-z><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27157931>.

COSTA, Robson Correia da. **Proposição de dispositivo de medidas “in situ” para avaliação do comportamento mecânico de lastro ferroviário**: estudo de caso na Estrada de Ferro Carajás. 2016. 176f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-30092016-140923/pt-br.php>.

CRAWFORD, Robert H. Greenhouse gas emissions embodied in reinforced concrete and timber railway sleepers. **Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 10, p. 3885-3890, 2009. DOI: 10.1021/es8023836.

CYR, Martin; RIVARD, Patrice; LABRECQUE, Francis. Reduction of ASR-expansion using powders ground from various sources of reactive aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 7, p. 438-446, 2009. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.04.013.

DASTGERDI, Aref; SAVIC, Adrijana; PETERMAN, Robert; RIDING, Kyle; BECK, B. Terry. Evaluation of Splitting Crack Propagation in Pre-Stressed Concrete Ties Made With Different Types of Coarse Aggregate. *In: PROCEEDINGS OF THE 2019 ASME JOINT RAIL CONFERENCE 2019*, Snowbird, UT. **Anais [...]**. Snowbird, UT p. 9. DOI: 10.1115/JRC2019-1280.

DASTGERDI, Aref Shafiei. **Effect of concrete composition on splitting-cracks in prestressed concrete railroad ties**: Application of fracture mechanics. 2019. 194 f. Dissertation (Doctoral of Philosophy) – Department of Civil Engineering College of Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2019.

DE CASTRO ALVES, Edgard Gomes; DA SILVA RAMOS, Rebeca Barbosa; SILVA, Carolina Rosa. Transporte ferroviário no Brasil: Desafios e oportunidades. **Revista Conecta**, v. 3, p. 15-27, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Especificação técnica de materiais**: Dormentes. Brasília: DNIT, 2016.

DHONDE, Hemant B.; MO, Y. L.; HSU, Thomas T. C. **Fiber reinforcement in prestressed concrete beams**. Houston: University of Houston, 2005.

DO CARMO, Thiago B.; KERNES, Ryan G.; EDWARDS, J. Riley; KERNES, Ryan G.; BARKAN, Christopher P. L.; ANDRAWES, Bassem O. Mechanistic Behavior of Concrete Crosstie Fastening System 2 Rail Pad Assemblies 3. *In: PROCEEDINGS OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 93RD ANNUAL MEETING 2014*, **Anais [...]**. Washington, DC: s.n., 2014.

DONAIRE-ÁVILA, Jesús; MONTAÑÉS-LÓPEZ, Antonio; SUÁREZ, Fernando. Influence of temperature on the longitudinal cracking in multipurpose precast concrete sleepers prior to their installation. **Materials**, v. 12, n. 7, p. 9-11, 2019. DOI: 10.3390/ma12172731.

DUFFY, M. C. George Stephenson and the introduction of rolled railway rail. **Journal of Mechanical Working Technology**, v. 5, n. 3-4, p. 309-342, 1981.

DYK, Brandon J.; EDWARDS, J. Riley; DERSCH, Marcus S.; RUPPERT, Conrad J.; BARKAN, Christopher P. L. Evaluation of dynamic and impact wheel load factors and their application in design processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. **Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 231, n. 1, p. 33-43, 2017. DOI: 10.1177/0954409715619454.

EBRAHIMI, Khashayar; DAIEZADEH, Mohammad Javad; ZAKERTABRIZI, Mohammad; ZAHMATKESH, Farhad; KORAYEM, Asghar Habibnejad. A review of the impact of micro- and nanoparticles on freeze-thaw durability of hardened concrete: Mechanism perspective. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 1105-1113, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.029. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.029>.

EDWARDS, J. Riley; CANGA RUIZ, Alvaro E.; BASTOS, Josué César; LIANG, Yubing; DERSCH, Marcus S. Use of Field Flexural Demand Data for Reliability-Based Analysis and Design of Concrete Railroad Sleepers. **Frontiers in Built Environment**, v. 6, n. October, p. 1-15, 2020. DOI: 10.3389/fbuil.2020.582948.

EDWARDS, J. Riley; LANGE, David A. Investigation of material improvements to mitigate the abrasive wear of concrete crosstie rail seat deterioration (RSD)USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report NEXTRANS. **Materials Science**, p.1-32 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000616.

EKOLU, S. O.; THOMAS, M. D. A.; HOOTON, R. D. Dual effectiveness of lithium salt in controlling both delayed ettringite formation and ASR in concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 6, p. 942-947, 2007. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.01.014.

ELAHI, A.; BASHEER, P. A. M.; NANUKUTTAN, S. V.; KHAN, Q. U. Z. Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 3, p. 292-299, 2010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045>.

ESVELD, Coenraad. **Modern Railway Track**. Second Edi ed. Holland: The Netherlands MRT Pre, 2001.

FAN, Shenfu; HANSON, John M. Effect of alkali silica reaction expansion and cracking on structural behavior of reinforced concrete beams. **ACI Structural Journal**, v. 95, p. 498-505, 1998.

FARIA, G. L.; GODEFROID, Leonardo Barbosa; CÂNDIDO, Luiz Cláudio; PORCARO, Rodrigo Rangel. Caracterização microestrutural e estudo cinético de transformação de fases em dois aços standard e premium de aplicação ferroviária. In: ANAIS DO 71º CONGRESSO ANUAL DA ABM 2016, **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABM, 2016.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION(FRA). **Detection of Concrete Tie Rail Seat Deterioration**. Washington DC: U.S. Department of Transportation, 2019.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON (FIB). **State of art report - Concrete railway sleepers**. Lausanne, Switzerland: Federation internationale du Beton, 2006.

FERDOUS, Wahid; MANALO, Allan. Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies - Review of current practice. **Engineering Failure Analysis**, v. 44, p. 17-35, 2014. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.04.020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.020>.

FERRO, E.; HARKNESS, J.; LE PEN, L. The influence of sleeper material characteristics on railway track behaviour: concrete vs composite sleeper. **Transportation Geotechnics**, v. 23, p. 100348, 2020. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100348.

FIB. **Precast concrete railway track systems**. Lausanne, Switzerland.

FISK, Paul S. **Inspection of concrete ties using sonic/ultrasonic impact Velocity and Impact echo measurements**. Washington, D.C., 2018.

FORSTER, Stephen W. et al. State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity. **Reported by ACI Committee 221**, v. 98, n. Reapproved, p. 1-31, 1998.

FORTUNATO, Eduardo Manuel Cabrita. **Renovação de Plataformas Ferroviárias: estudos Relativos à Capacidade de Carga**. 2005. 628 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2005. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11441>.

FUJII, M.; KOBAYASHI, K.; KOJIMA, T.; MAEHARA, H. The Static and Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Cracking Due to Alkali-Silica Reaction- Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions. In: 1987, Ottawa, Canada. **Anais [...]**. Ottawa, Canada: Noyes Publications, 1987.

GEDAM, Banti A.; BHANDARI, N. M.; UPADHYAY, Akhil. Influence of Supplementary Cementitious Materials on Shrinkage, Creep, and Durability of High-Performance Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 4, p. 04015173, 2016. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001462.

GIACCIO, G.; ROCCO, C.; VIOLINI, D.; ZAPPITELLI, J.; ZERBINO, R. High-Strength Concretes Incorporating Different Coarse Aggregates. **Materials Journal**, v. 89, n. 3, p. 242-246, 1992.

GODART, Bruno; DIVET, Loïc. **DEF prevention in France and temperature control at early age Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures**. Paris: RILEM Publications SARL, 2012.

GONZALEZ-COROMINAS, Andreu; ETXEBERRIA, Miren; FERNANDEZ, Ignasi. Structural behaviour of prestressed concrete sleepers produced with high performance recycled aggregate concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 1, p. 1-14, 2017. DOI: 10.1617/s11527-016-0966-6.

GONZÁLEZ-NICIEZA, C.; ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ, M. I.; MENÉNDEZ-DÍAZ, A.; ÁLVAREZ-VIGIL, A. E.; ARIZNAVARRETA-FERNÁNDEZ, F. Failure analysis of

concrete sleepers in heavy haul railway tracks. **Engineering Failure Analysis**, v. 15, n. 1-2, p. 90-117, 2008. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.021.

GOURLEY, J. T.; JOHNSON., G. B. Developments in geopolymer precast concrete. **World congress geopolymer**, p. 139-143, 2005.

GOWRIPALAN, Nadarajah; CAO, Jinsong. Effect of Alkali Silica Reaction on bond strength and load capacity of reinforced concrete structures. *In: FIB 2018 - PROCEEDINGS FOR THE 2018 FIB CONGRESS: BETTER, SMARTER, STRONGER 2019, Anais [...]*. Sidney: University of Technology Sydneyp, 2019. p. 3088-3099.

GRASSIE, S. L.; COX, S. J. The Dynamic Response of Railway Track With Unsupported Sleepers. **Journal of Automobile Engineering**, v.199, n.2, p.123-135, 1985. DOI: 10.1243/PIME.

GREVE, Matthew J.; DERSCH, Marcus S.; EDWARDS, J. Riley; BARKAN, Christopher P. L.; THOMPSON, Hugh; SUSSMANN, Theodore R.; MCHENRY, Michael T. Examination of the effect of concrete crosstie rail seat deterioration on rail seat load distribution. **Transportation Research Record**, v. 2476, p. 1-7, 2015. DOI: 10.3141/2476-01.

GUTIERREZ, Pilar Alaejos; CANOVAS, Manuel Fernandez. High-Performance Concrete: Requirements for Constituent Materials and Mix Proportioning. **Materials Journal**, v. 93, n. 3, p. 233-241, 1996.

HAJIGHASEMALI, Saeid; RAMEZANIANPOUR, Aliakbar; KASHEFIZADEH, Mohammadhossein. The effect of alkali-silica reaction on strength and ductility analyses of RC beams. **Magazine of Concrete Research**, v. 66, n. 15, p. 751-760, 2014. DOI: 10.1680/macr.13.00282.

HAMARAT, Mehmet; PAPAELIAS, Mayorkinos; SILVAST, Mika; KAEWUNRUEN, Sakdirat. The effect of unsupported sleepers/bearers on dynamic phenomena of a railway turnout system under impact loads. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2020. DOI: 10.3390/app10072320.

HAMEED, Afia S.; SHASHIKALA, A. P. Suitability of rubber concrete for railway sleepers. **Perspectives in Science**, v. 8, p. 32-35, 2016. DOI: 10.1016/j.pisc.2016.01.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pisc.2016.01.011>.

HARTMANN, Carine Toso. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HASNAT, Ariful; GHAFOORI, Nader. Abrasion Resistance of Ultra-High-Performance Concrete for Railway Sleepers. **Urban Rail Transit**, v. 7, n. 2, p. 101-116, 2021. DOI: 10.1007/s40864-021-00145-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00145-8>.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação de Concretos Afetados pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HOGER, D. **Fibre composite railway sleeper**. Toowoomba: University of Southern Queensland, 2000.

HOPPE, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F. De; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, v. 61, p. 168-177, 2015.

HUANG, Hai; TUTUMLUER, Erol. Discrete Element Modeling for fouled railroad ballast. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3306-3312, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.019>.

HUDSON, Andrew; WATSON, Geoff; LE PEN, Louis; POWRIE, William. Remediation of Mud Pumping on a Ballasted Railway Track. **Procedia Engineering**, v. 143, n. Ictg, p. 1043-1050, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.103. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.103>.

HWANG, Chao Lung; CHEN, Chun Tsun; LEE, Long Sherng; BUI, Le Anh Tuan; HOU, Bhi Song; HSIEH, Hsi Yi. The material and mechanical property of heavy-duty prestressed concrete sleeper. **Applied Mechanics and Materials**, v. 97-98, p. 408-413, 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.97-98.408.

ICIMOTO, Felipe Hideyoshi. **Dormentes de Madeira Lamelada Colada (MLC) Reforçados com Tecidos de Fibra de Vidro**. 2018. 1005 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

IFSTTAR. **Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation**. Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018.

INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. **Advanced rail geotechnology-ballasted**. London, UK: Taylor & Francis Group, 2011.

JANELIUKSTIS, Rims; CLARK, Andrew; PAPAELIAS, Mayorkinos; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Flexural cracking-induced acoustic emission peak frequency shift in railway prestressed concrete sleepers. **Engineering Structures**, v. 178, n. march 2018, p. 493-505, 2019. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.058. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.058>.

JAYASURIYA, Chamindi; INDRARATNA, Buddhima; NGOC NGO, Trung. Experimental study to examine the role of under sleeper pads for improved performance of ballast under cyclic loading. **Transportation Geotechnics**, v. 19, n. february, p. 61-73, 2019. DOI: 10.1016/j.trgeo.2019.01.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.01.005>.

JEAN-PIERRE OLLIVIER; VICHOT, Angélique. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2014.

KAEWUNRUEN, S.; REMENNIKOV, A. **Discussion paper on the use of reliability-based approach in the conversion of the existing code AS1085. 14 to limit states design**. [s.l.]: Research Report, 2006.

KAEWUNRUEN, Sakdirat. Experimental and numerical studies for evaluating dynamic behaviour of prestressed concrete sleepers subject to severe impact loading. **Research Online, UoW, Australia**, p. 412, 2007. Disponível em: <http://ro.uow.edu.au/theses/277>.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; FREIMANIS, Andris; GOTO, Keiichi. Impact responses of railway concrete sleepers with surface abrasions. In: PROCEEDINGS OF THE 25TH INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION 2018, Hiroshima, Japan. **Anais [...]**. Hiroshima, Japan, 2018. p. 8-12.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; LI, Dan; CHEN, Yu; XIANG, Zhechun. Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber. **Materials**, v. 11, n. 7, 2018. DOI: 10.3390/ma11071169.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; LI, Dan; REMENNIKOV, Alex M.; ISHIDA, Tetsuya. Dynamic resistance and rational design of railway prestressed concrete sleepers. Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete - Innovations in Materials. **Design and Structures**, p. 1477-1484, 2019.

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, 2009. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.06.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.06.002>.

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, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000152.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; REMENNIKOV, Alex M.; MURRAY, Martin H. Introducing a new limit states design concept to railway concrete sleepers: An Australian experience. **Frontiers in Materials**, v. 1, n. July, p. 1-3, 2014. DOI: 10.3389/fmats.2014.00008.

KAWABATA, Yuichiro; TAKAHASHI, Haruka; WATANABE, Sadayuki. The long-term suppression effects of fly ash and slag on the expansion of heat-cured mortar due to delayed ettringite formation. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125235, 2021.

KERNES, Ryan G. **The mechanics of abrasion on concrete crosstie rail seats**. 2013. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 2013.

KERNES, Ryan G.; EDWARDS, J. Riley; DERSCH, Marcus S.; LANGE, David A.; BARKAN, Christopher P. L. Investigation of the Impact of Abrasion as a Concrete Crosstie Rail Seat Deterioration (RSD) Mechanism. In: AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION (AREMA) CONFERENCE PROCEEDINGS. 2011, **Anais [...]**. [s.l]: AREMA, 2011.

KERNES, Ryan G.; SHURPALI, Amogh A.; EDWARDS, J. Riley; DERSCH, Marcus S.; LANGE, David A.; BARKAN, Christopher P. L. Investigation of the mechanics of rail seat deterioration and methods to improve the abrasion resistance of concrete sleeper rail seats.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. **Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 228, n. 6, p. 581-589, 2014. DOI: 10.1177/0954409714530911.

KHAN, Mohammad Iqbal; LYNSDALE, C. J. Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 1, p. 123-131, 2002.

KHAN, Mohammad Iqbal; SIDDIQUE, Rafat. Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 57, p. 30-35, 2011. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2011.09.016.

KLINCEVICIUS, Mary Gisele Yoshimori. **Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2011.

KOH, Taehoon; HWANG, Seonkeun. Field performance and durability of eco-friendly prestressed concrete sleeper. **Sustainable Construction Materials and Technologies**, v. 2013, august, 2013.

KOH, Taehoon; HWANG, Seonkeun. Field evaluation and durability analysis of an eco-friendly prestressed concrete sleeper. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 1-6, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001109.

KOH, Taehoon; SHIN, Moochul; BAE, Younghoon; HWANG, Seonkeun. Structural performances of an eco-friendly prestressed concrete sleeper. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 445-454, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.189.

KOLLO, Szablocs Attila. **Optimization of prestressed concrete sleepers**. 2021. Technical University of Cluj-Napoca, [S. l.], 2021.

LEKLOU, Nordine; NGUYEN, Van-Huong; MOUNANGA, Pierre. The effect of the partial cement substitution with fly ash on Delayed Ettringite Formation in heat-cured mortars. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 4, p. 1359-1366, 2017.

LEONG, Jeffrey. **Development of a limit state design methodology for railway track**. 228f. Thesis (Master of Engineering School of Civil Engineering) – Queensland University of Technology, Queensland, Austrália, 2007.

LEONG, Jeffrey; MURRAY, Martin H. Probabilistic analysis of train-track vertical impact forces. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS-TRANSPORT 2008, **Anais** [...]. Thomas Telford Ltd, 2008. p. 15-21.

LI, Dan; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Effect of extreme climate on topology of railway prestressed concrete sleepers. **Climate**, v. 7, n. 1, 2019. DOI: 10.3390/cli7010017.

LI, Dan; NGAMKHANONG, Chayut; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Influence of Surface Abrasion on Creep and Shrinkage of Railway Prestressed Concrete Sleepers. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 245, n. 3, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/245/3/032040.

LOVETT, Alexander H.; DICK, C. Tyler; RUPPERT, Conrad; BARKAN, Christopher P. L. Cost and delay of railroad timber and concrete crosstie maintenance and replacement. **Transportation Research Record**, v. 2476, n. october, p. 37-44, 2015. DOI: 10.3141/2476-06.

LUTCH, Russell H.; HARRIS, Devin K.; AHLBORN, Theresa M. Causes and Preventative Methods for Rail Seat Abrasion in North America's Railroads. **Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction.**, p. 455-466, 2009.

MANALO, A.; ARAVINTHAN, T.; KARUNASENA, W.; TICOALU, A. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. **Composite Structures**, v. 92, n. 3, p. 603-611, 2010. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.08.046. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.046>.

MATSUOKA, Kodai; WATANABE, Tsutomu. Application of a Frequency-Based Detection Method for Evaluating Damaged Concrete Sleepers. **Advances in Structural Health Monitoring**, p. 1-21, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.82711.

MAYVILLE A, Ronald; JIANG, Liying; SHERMAN, Matthew. **Performance Evaluation of Concrete Railroad Ties on the Northeast Corridor**. Washington, D.C: U.S. Department of Transportation, 2014.

MEESIT, Ratthaphong; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Vibration characteristics of micro-engineered crumb rubber concrete for railway sleeper applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 15, n. 2, p. 55-66, 2017. DOI: 10.3151/jact.15.55.

MEHTA, P.K.; AITCIN, P.C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, concrete, and aggregates**. CCAGDP, n. 12, n. 2, Winter 1990, p. 70-78

MEHTA, Kumar; MONTEIRO, Paulo. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIELENZ, Richard C.; MARUSIN, Stella L.; HIME, William G.; JUGOVIC, Zvonimir T. Investigation of prestressed concrete railway tie distress. Concrete International. **Concrete International**, v. 17, n. 12, p. 62-68, 1995.

MIURA, Shigeru; TAKAI, Hideyuki; UCHIDA, Masao; FUKADA, Yasuto. The Mechanism of Railway Tracks. **Japan Railway & Transport Review**, v. 3, n. march, p. 38-45, 1998.

MIZUMOTO, Camilo. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2009.

MONTALBÁN DOMINGO, Laura; ZAMORANO MARTÍN, Clara; PALENZUELA AVILÉS, Cristina; REAL HERRÁIZ, Julia I. Analysis of the influence of cracked sleepers under static loading on ballasted railway tracks. **Scientific World Journal**, v. 2014, 2014. DOI: 10.1155/2014/363547.

MONTEIRO, Paulo J. M.; SHOMGLIN, Kome; WENK, H. R.; HASPARYK, Nicole P. Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. **Materials Journal**, v. 98, n. 2, p. 179-183, 2001.

MOODY, H. G. Dynamic Wheel Load Detector Extends Life of Concrete Railroad Ties. **TR News**, n. 128, p. 8-9, 1987.

MOREIRA, Welison Serafim; MARQUES, Jaffer Jael; OLIVEIRA, Jucelaine Lopes de. Diferenças Métricas de Bitolas: Impactos Causados nas Operações. In: CONGRESSO DE LOGÍSTICA DAS FACULDADES DE TECNOLOGIA DO CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA, 11., 2020, Bragança Paulista. **Anais [...]**. Bragança Paulista: FATECLOG, 2020.

MOUNDOUNGOU, I.; BULTEEL, D.; GARCIA-DIAZ, E.; THIÉRY, V.; DÉGRUGILLIERS, P.; HAMMERSCHLAG, J. G. Reduction of ASR expansion in concretes based on reactive chert aggregates: Effect of alkali neutralisation capacity. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 147-162, 2014. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.036.

MUZENSKI, Scott; FLORES-VIVIAN, Ismael; SOBOLEV, Konstantin. Durability of superhydrophobic engineered cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 291-297, 2015. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.014.

NABAIS, R. J. S. **Manual básico de Engenharia Ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Railroad Accident Brief -Amtrak passenger train derailment**. Washington, D.C. DOI: 10.5749/j.ctvthhd37.29.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Railroad Accident Brief: Metro-North Railroad Derailment**. Washington, D.C.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador Eugênio Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NGAMKHANONG, Chayut; LI, Dan; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Impact Capacity Reduction in Railway Prestressed Concrete Sleepers with Surface Abrasions. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 245, n. 3, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/245/3/032048.

NGAMKHANONG, Chayut; LI, Dan; REMENNIKOV, Alex; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Dynamic capacity reduction of railway prestressed concrete sleepers due to surface abrasions considering the effects of strain rate and prestressing losses. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v. 19, n. 01, p. 1940001, 2019. DOI: 10.1142/S0219455419400017.

NILI, Mahmoud; AZARIOON, Alireza; DANESH, Amir; DEIHIMI, Ali. Experimental study and modeling of fiber volume effects on frost resistance of fiber reinforced concrete. **International Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 263-272, 2018. DOI: 10.1007/S40999-016-0122-2.

NKINAMUBANZI, P. C.; MANTELLATO, S.; FLATT, Robert J. Superplasticizers in practice. **Science and Technology of Concrete Admixtures**, p. 353-377, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-08-100693-1.00016-3.

OLIVARES, R. Ordóñez; GARCIA, C. I.; DEARDO, A.; KALAY, S.; HERNÁNDEZ, F. C. Robles. Advanced metallurgical alloy design and thermomechanical processing for rails steels for North American heavy haul use. **Wear**, v. 271, n. 1-2, p. 364-373, 2011.

PALOMO, Angel; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana. Alkaline Activation, Procedure for Transforming Fly Ash into New Materials. Part 1: Applications. **Proceedings of World of Coal Ash**, n. September 2015, p. 1-14, 2011. Disponível em: <http://www.flyash.info/2011/205-Palomo-2011.pdf>.

PALOMO, Ángel; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; LÓPEZ-HOMBRADOS, Cecilio; LLEYDA, José Luis. Railway sleepers made of alkali activated fly ash concrete. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 22, n. 2, p. 75-80, 2007. DOI: 10.4067/S0718-50732007000200001.

PARK, Sun Hee; POSLUSZNY, Ryan; MANDER, John B.; HURLEBAUS, Stefan. Improving serviceability of concrete railroad ties using prestressed AFRP strands. **Construction and Building Materials**, v. 280, p. 122396, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122396. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122396>.

PARVEZ, Ahsan; FOSTER, Stephen James. Fatigue of steel-fibre-reinforced concrete prestressed railway sleepers. **Engineering Structures**, v. 141, p. 241-250, 2017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.03.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.025>.

PASSOS, Leonardo Braga. **Avaliação experimental do comportamento mecânico de dormentes reciclados de madeira visando redução do impacto ambiental**. 2006. 405 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PAULA, Dilma Andrade de. Passado-presente: a extinção de ramais ferroviários durante a ditadura civil-militar. **Revista HISTEDBR On-line**, v. 14, n. 56, p. 186, 2014. DOI: 10.20396/rho.v14i56.8640443.

PÉREZ, Alejandro; FERREÑO, Diego; CARRASCAL, Isidro A.; POLANCO, Juan A.; CASADO, José A.; DIEGO, Soraya. Metal cushion dampers for railway applications: A review. **Construction and Building Materials**, v. 238, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117711.

POMPEU NETO, B. B. P.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Revista Matéria**, v. 16, n. 2, p. 690-702, 2011. DOI: 10.1590/S1517-70762011000200005.

POSLUSZNY, Ryan D.; FRY, Gary T. Applications of prestressed afrp bars in concrete railroad ties. 149 f. Thesis (Master of Science) – Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University, 2016.

PRADO, Adelson Gomes do. **Avaliação petrográfica e experimental de agregados graúdos afetados por deformação tectônica, desenvolvimento de minerais de alteração e texturas de exsolução**. 101f. 2008. Dissertação (Mestrado Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

PROFILLIDIS, V. A. **Railway Management and Engineering**. 4th. ed. Greece: Democritus Thrace University, 2014.

QIAO, Pizhong; DAVALOS, Julio F.; ZIPFEL, Michael G. Modeling and optimal design of composite-reinforced wood railroad crosstie. **Composite Structures**, v. 41, n. 1, p. 87-96, 1998. DOI: 10.1016/S0263-8223(98)00051-8.

QIN, Xiao chuan et al. Evaluation of freeze-thaw damage on concrete material and prestressed concrete specimens. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 892-904, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.098. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.098>.

QINHUA, Jin; MIN, Deng; SUFEN, Han. Investigation of deteriorated concrete railway ties. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 4, p. 551-556, 1996.

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, 1997. DOI: 10.1016/S0008-8846(96)00186-X.

QUEIROZ, Paulo Roberto Cimó. Notas sobre a experiência das ferrovias no Brasil. **História Econômica & História de Empresas**, v. 2, n. 1, p. 91-111, 1999.

RAJ, Anand; NAGARAJAN, Praveen; SHASHIKALA, Aikot Pallikkara. Failure prediction of impact behaviour of self-compacted rubcrete sleepers. **Material Design & Processing Communications**, n. march, p. 1-8, 2020. DOI: 10.1002/mdp2.174.

RAJABIPOUR, Farshad; GIANNINI, Eric; DUNANT, Cyrille; IDEKER, Jason H.; THOMAS, Michael D. A. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 130-146, 2015. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.024>.

RANGEL, George Wilton Albuquerque; ARAGÃO, Francisco Thiago Sacramento; MOTTA, Laura Maria Goretti da. Modelagem computacional do pavimento ferroviário usando concreto asfáltico como alternativa para a construção da camada de sublastro. **44º Rapv – Reunião Anual de Pavimentação e 18º Enacor – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**, v. 55, n. 62, p. 1-15, 2015.

REMENNIKOV, A. M.; MURRAY, M. H.; KAEWUNRUEN, S. Reliability-based conversion of a structural design code for railway prestressed concrete sleepers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. **Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 226, n. 2, p. 155-173, 2012. DOI: 10.1177/0954409711418754.

REMENNIKOV, Alex M.; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Experimental load rating of aged railway concrete sleepers. **Engineering Structures**, v. 76, p. 147-162, 2014. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.06.032.

REMENNIKOV, A. M.; KAEWUNRUEN, S.. A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction. **Structural Control & Health Monitoring**, n. 15, p. 207-234, 2008.

REZAIE, F.; SHIRI, M. R.; FARNAM, S. M. Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre-stressed concrete sleepers. **Engineering Failure Analysis**, v. 26, p. 21-30, 2012. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.001>.

RIBEIRO, Daniel Vêras. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios - produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. Curitiba: Editora Appris Ltda., 2021.

RIBEIRO, D. V. Deterioração das estruturas de concreto. In: (org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 2. ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, GEN. v. 1. p. 159-190, 2018.

RICHARDSON, A. E.; COVENTRY, K. A.; WILKINSON, S. Freeze/thaw durability of concrete with synthetic fibre additions. **Cold Regions Science and Technology**, v. 83-84, p. 49-56, 2012. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2012.06.006.

RIDING, Kyle A.; PETERMAN, Robert J.; GUTHRIE, Spencer; BRUESEKE, Matthew; MOSAVI, Hossein; DAILY, Koby; RISQVI-HENDRICKSON, Wyatt. Environmental and track factors that contribute to abrasion damage. In: 2018 JOINT RAIL CONFERENCE, JRC 2018 2018, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1-10. DOI: 10.1115/JRC2018-6167.

SADEGHI, J. Experimental evaluation of accuracy of current practices in analysis and design of railway track sleepers. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 9, p. 881-893, 2008. DOI: 10.1139/L08-026.

SADEGHI, J. Field investigation on dynamics of railway track pre-stressed concrete sleepers. **Advances in Structural Engineering**, v. 13, n. 1, p. 139-151, 2010. DOI: 10.1260/1369-4332.13.1.139.

SAFIUDDIN, Md; KAISH, A. B. M. Amru.; WOON, Chin Ong; RAMAN, Sudharshan N. Early-age cracking in concrete: Causes, consequences, remedial measures, and recommendations. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 10, 2018. DOI: 10.3390/app8101730.

SAHU, Sadananda; THAULOW, Niels. Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1675-1681, 2004. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.027.

SANCHEZ, Leandro. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos**. 2008. 170f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SAVIC, Adrijana; BECK, Burdette Terry; ROBERTSON, Aaron A.; PETERMAN, Robert. Effects of Cover, Compressive Strength, and Wire Type on Bond Performance in Prismatic Prestressed Concrete Members. *In: PROCEEDINGS OF THE 2018 ASME JOINT RAIL CONFERENCE 2018*, Pittsburgh, PA. **Anais** [...]. Pittsburgh, PA p. 12. DOI: 10.1115/JRC2018-6153.

SAVIC, Adrijana; BECK, Burdette Terry; SHAFIEI, Aref; PETERMAN, Robert. The Effect of Wire Type on Cracking Propensity in Prestressed Concrete Prisms. *In: PROCEEDINGS OF THE 2019 ASME JOINT RAIL CONFERENCE 2019*, Snowbird, UT. **Anais** [...]. Snowbird, UT p. 10. DOI: 10.1115/JRC2019-1234.

SCHÖLER, Axel; LOTHENBACH, Barbara; WINNEFELD, Frank; HABA, Mohsen Ben; ZAJAC, Maciej; LUDWIG, Horst Michael. Early hydration of SCM-blended Portland cements: A pore solution and isothermal calorimetry study. **Cement and Concrete Research**, v. 93, p. 71-82, 2017. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2016.11.013.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track Geotechnology and Substructure Management**. Londres: Thomas Telford Services Ltd., 1994.

SHAFATIAN, Seyed M. H.; AKHAVAN, Alireza; MARAGHECHI, Hamed; RAJABIPOUR, Farshad. How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 143-153, 2013. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2012.11.004.

SHANG, Huai-Shuai; CAO, Wei-Qun; WANG, Bin. Effect of Fast Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Properties of Ordinary-Air-Entrained Concrete. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014. DOI: 10.1155/2014/923032. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/923032>. Acesso em: 4 set. 2021.

SHANG, Huaishuai; SONG, Yupu; OU, Jinping. Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles. **Acta Mechanica Sinica**, v. 22, n. 3, p. 261-266, 2009. DOI: 10.1016/S0894-9166(09)60273-1.

SHAYAN, A. Field evidence for inability of ASTM C 1260 limits to detect slowly reactive Australian aggregates. **Australian Journal of Civil Engineering**, v. 3, n. 1, p. 13-26, 2007. DOI: 10.1080/14488353.2007.11463917.

SHAYAN, A.; QUICK, G. W. Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 4, p. 348-361, 1992. DOI: 10.14359/2560.

SHAYAN, A.; QUICK, G. W. Alkali-aggregate reaction in concrete railway sleepers from Finland. *In: CSIRO. Division of Building, Construction and Engineering*, editor/s. 16th International Conference on Cement Microscopy; 11-14 April, 1994; Richmond, U.S.A., 1994.

SHIN, Moochul; YU, Hailing. A Parametric Study on the Splitting/Bursting Damage of Prestressed Concrete Prisms. **Science in the age of experience**, Boston, MA, p. 1-10, June, 2018.

SHURPALI, Amogh A.; EDWARDS, J. Riley; KERNES, Ryan G.; LANGE, David A.; BARKAN, Christopher P. L. Investigation of material improvements to mitigate the effects of the abrasion mechanism of concrete crosstie rail seat deterioration. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 2, p. 1-6, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000616.

SHURPALI, Amogh A.; EDWARDS, J. Riley; KERNES, Ryan G.; LANGE, David A.; BARKAN, Christopher P. L.; BARKAN, Christopher P. L.; SEAT, Rail; RSD, Deterioration. Improving the Abrasion Resistance of Concrete to Mitigate Concrete Crosstie Rail Seat Deterioration (RSD). **Materials Performance and Characterization**, v. 6, n. 1, 2017. DOI: 10.1520/MPC20170051.

SIDDIQUE, Rafat; KLAUS, Juvas. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 3-4, p. 392-400, 2009. DOI: 10.1016/j.clay.2008.11.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>.

SILVA, A. Santos; GONÇALVES, Arlindo F.; PIPA, Manuel. Diagnosis and Prognosis of Portuguese Concrete Railway Sleepers Degradation – a Combination of Asr and Def. In: 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE 2008, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1240-1249.

SILVA, A. Santos; SALTA, M.; JORGE, M. E. Melo; RODRIGUES, M. P.; CRISTINO, A. F.; GRANDE, Campo. Research on the Suppression Expansion Due To Asr . Effect of Coatings and Lithium Nitrate. **13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, p. 1250-1259, 2008.

SILVA, Bárbara Elis Pereira. **Utilização do lastro ferroviário degradado como material de pavimentação**. 2015a. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015a.

SILVA, C. F. C. **Contribuição para Eficácia da Mitigação da Reação Álcali-Agregado: Influência de Aditivos Superplastificantes nas Expansões ao Utilizar Adições Minerais**. 2015b. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015b.

SILVA, D. L.; FONSECA, J. M. M.; BENTO, A. J.; MONTEIRO, E. C. B. Considerações sobre a Formação da Etringita Tardia (DEF) – Brasil. **Revista Construindo**, v. 9, n. 2, p. 36-46, 2017.

SILVA, Iara; DE OLIVEIRA, Luciano; CORREIA, Conceição; RAFFUL, Kelyane. Recovery of Cracks in Concrete Railroad Sleepers: Procedure and Case Study. **Procedia Structural Integrity**, v. 11, p. 130-137, 2018. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.018>.

SILVA, P. B.; RIBEIRO, R. L.; VIEIRA, F. A.; BRASIL, A. C. M.; RIBEIRO, R. P. Potencial de redução de emissão de CO₂ pelo uso de transporte ferroviário : um estudo de caso no Brasil. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia (RIPE)**, p. 1-17, 2020a.

SILVA, Ramon; SILVA, Welington V; FARIAS, Jonas Yamashita De; SANTOS, Marcos Aires A.; NEIVA, Leonardo O. Experimental and Numerical Analyses of the Failure of Prestressed Concrete Railway Sleepers. **Materials**, v. 13, n. 7, p. 1704, 2020 b.

SILVA, Romerson Serejo; OLIVEIRA, Andrielli Morais De. Falha de um dormente de concreto por deterioração da região de apoio dos trilhos - causas e consequências. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 29. , 2015, Ouro Preto. **Anais [...]**. Ouro Preto: ANPET, 2015. p. 265-275.

SILVEIRA, Paula Helene Toraldo Teixeira. **Estudo do concreto reforçado com fibras de aço e sua aplicação em dormentes ferroviários**. 2018. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SIQUEIRA, Tagore Villarim De. As Primeiras Ferrovias do Nordeste Brasileiro: Processo de Implantação e o Caso da Great Western Railway. **Revista do BNDES**, v. 9, n. 17, p. 169-220, 2002.

SMIRNOVA, Olga. Obtaining the High-performance Concrete for Railway Sleepers in Russia. **Procedia Engineering**, v. 172, n. December, p. 1039-1043, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.158. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.158>.

SMITH, Scott H.; QIAO, Chunyu; SURANENI, Prannoy; KURTIS, Kimberly E.; WEISS, William J. Service-life of concrete in freeze-thaw environments: Critical degree of saturation and calcium oxychloride formation. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 93-106, 2019. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2019.04.014.

SONG, Weimin; HUANG, Baoshan; PH, D.; ASCE, M.; SHU, Xiang; PH, D.; ASCE, A. M.; STRÁNSKÝ, Jan; PH, D. Interaction between Railroad Ballast and Sleeper: A DEM-FEM Approach. **International Journal of Geomechanics**, v. 19, n. 5, p. 1-10, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001388.

STEFFLER, Fabio. **Via Permanente Aplicada: Guia Teórico e Prático**. [s.l.] : LTC Editora, 2013.

STOPATTO, S. **Via Permanente Ferroviária: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1987.

SUNDARAM, Rajamurugan; MATSUMOTO, Koji; NAGAI, Kohei; AWASTHI, Anupam. Visual investigation method and structural performance evaluation for DEF induced damaged Indian Railway PC sleepers. **Journal of Asian Concrete Federation**, v. 4, n. 2, p. 103-115, 2018. DOI: 10.18702/acf.2019.1.4.2.103.

SURESH KUMAR, A.; MUTHUKANNAN, M. An Examination on Performance of Railway Sleepers. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 8, n. 4S2, p. 37-44, 2019. DOI: 10.35940/ijrte.d1010.1284s219.

SUSSMANN, Theodore R.; STARK, Timothy D.; WILK, Stephen T.; THOMPSON II, Hugh B. Track Support Measurements for Improved Resiliency of Railway Infrastructure. **Transportation Research Record**, n. 2607, p. 54-61, 2017.

SYSYN, Mykola; PRZYBYLOWICZ, Michal; NABOCHENKO, Olga; KOU, Lei. Identification of Sleeper Support Conditions Using Mechanical Model Supported Data-Driven Approach. **Sensors**, v. 21, n. 11, p. 3609, 2021.

TABATABAEI, Hossein; DELFOROUZI, Ahmad; KHAN, Hassan; WESENER, Tim; GRZEGORZEK, Marcin. Automatic Detection of the Cracks on the Concrete Railway Sleepers. **International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence**, v. 33, n. 9, p. 1-20, 2019. DOI: 10.1142/S0218001419550103.

TAHERINEZHAD, J.; SOFI, M.; MENDIS, P. A.; NGO, T. A review of behaviour of Prestressed concrete sleepers. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 13, n. 1, p. 1-16, 2013.

TANTIPIDOK, Patarapol; MCLAUGHLIN, Dinara; ŠTEMBERK, Petr. Study of accelerated production of prestressed concrete sleepers using strut-and-tie model. **Advanced Materials Research**, v. 1054, p. 122-127, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.122.

TATARINOV, Alexey; RUMJANCEVS, Aleksandrs; MIRONOV, Viktors. Assessment of cracks in pre-stressed concrete railway sleepers by ultrasonic testing. **Procedia Computer Science**, v. 149, n. April, p. 324-330, 2019. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.143. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.143>.

TAVARES, Pedro Americo Curvelo. **Influência do teor de álcalis do cimento na interação cimento-adjuvante**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Évora, 2011.

TAYLOR, Harry F. W. **Cement chemistry**. London: Thomas Telford London, 1997. v. 2

TAYLOR, H. F.W. **Cement chemistry**. 2nd. ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

TEIXEIRA, Nuno Miguel Guedes. **Sistemas de Transporte Ferroviário: Evolução e perspectivas de desenvolvimento**. 2016. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

TEPPONEN, Pirjo; ERIKSSON, Bo Erik. Damages in concrete railway sleepers in Finland. **Nordic concrete research**, n. 6, p. 199-209, 1987.

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, 2011. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2010.11.003.

THOMAS, Michael; FOLLIARD, Kevin; DRIMALAS, Thanos; RAMLOCHAN, Terry. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 841-847, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.01.003.

TROUAN, V.; SOVA, N. Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkalisilica reaction, and electric corrosion. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 6, n. 6-102, p. 13-19, 2019. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185613.

TSOUKANTAS, S.; TZANAKAKIS, K.; SPYROPOULOU, D.; PANOPOULOS, P.; MINTZIA, M. Investigation on the Causes of Longitudinal Cracks on Prestressed Monoblock Railway Sleepers of Metric Gauge of. **Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, v. 1, n. 8, p. 1-6, 2008.

TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. [s.l.]: IBRACON, 2011. p. 44.

UEHARA, Motoki. New concrete with low environmental load using the geopolymer method. **Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)**, v. 51, n. 1, p. 1-7, 2010. DOI: 10.2219/rtriqr.51.1.

UIC. **Design of Monoblock Concrete Sleepers (UIC CODE 713 R)**. [s.l.: s.n.].2014a. Disponível em: <https://books.google.com.tr/books?id=n989AwEACAAJ>.

UIC. **Design of Monoblock Concrete Sleepers (UIC CODE 713 R)**. [s.l.: s.n.]. 2014b.

VALE. **Manual Técnico da Via Permanente**. Belo Horizonte: Vale S.A, 2009.

VAN DAM, J. Emily. **Abrasion Resistance of Concrete and the Use of High Performance**. 2014. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 2014.

VAN DYK, Brandon J.; DERSCH, Marcus S.; EDWARDS, J. Riley. **International Concrete Crosstie and Fastening System Survey – Final Results**. Philadelphia, PA 17-19, 2012.

VENUTI, W. J. The Status of Concrete Railroad Ties in North America. In: PROCEEDINGS OF AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION 1980, Wshington, DC. **Anais [...]**. Wshington, DC: American Railway Engineering Association, 1980. p. 131-149.

VIZCARRA, Gino Omar Calderón. **Efeito da Granulometria no Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2015.

WATANABE, Tsutomu; GOTO, Keiichi; MATSUOKA, Kodai; MINOURA, Shintaro. Validation of a dynamic wheel load factor and the influence of various track irregularities on the dynamic response of prestressed concrete sleepers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. **Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 234, n. 10, p. 1275-1284, 2020. DOI: 10.1177/0954409719891655.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **A iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento**. [s.l.]: WBCSD, 2012. Disponível em: [http://csiprogress2012.org/CSI Progress Report - summary version \(Portuguese\)_for web.pdf](http://csiprogress2012.org/CSI Progress Report - summary version (Portuguese)_for web.pdf).

WOLF, Henry E. **Flexural behavior of prestressed concrete monoblock crossties**. 2015. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 2015.

WU, Hao; HUANG, Baoshan; ASCE, M.; SHU, Xiang; DONG, Qiao. Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete. **Materials in Civil Engineering**, n. may, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.

WU, Ke Ru; CHEN, Bing; YAO, Wu; ZHANG, Dong. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1421-1425, 2001. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00588-9.

XU, Lihua; WU, Fanghong; CHI, Yin; CHENG, Peng; ZENG, Yanqin; CHEN, Qian. Effects of coarse aggregate and steel fibre contents on mechanical properties of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 97-110, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.190. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.190>.

YANG, Jun Mo; SHIN, Hyun Oh; YOON, Young Soo; MITCHELL, Denis. Benefits of blast furnace slag and steel fibers on the static and fatigue performance of prestressed concrete sleepers. **Engineering Structures**, v. 134, p. 317-333, 2017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.045. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.045>.

YE, 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. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90113-9.

YOO, Doo Yeol; LEE, Jin Young; SHIN, Hyun Oh; YANG, Jun Mo; YOON, Young Soo. Effects of blast furnace slag and steel fiber on the impact resistance of railway prestressed concrete sleepers. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, n. march, p. 151-164, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.015>.

YOU, Ruilin; GOTO, Keiichi; NGAMKHANONG, Chayut; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Nonlinear finite element analysis for structural capacity of railway prestressed concrete sleepers with rail seat abrasion. **Engineering Failure Analysis**, v. 95, p. 47-65, 2019. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.08.026.

YOU, Ruilin; LI, Dan; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Fatigue life losses of railway concrete sleepers due to surface abrasions. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD AND RAIL INFRASTRUCTURE CETRA 2018, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.5592/CO/CETRA.2018.668.

YU, Hailing. Causes and Prevention of Splitting / Bursting Failure of Concrete Crossties : A Computational Study. In: AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (AREMA) ANNUAL CONFERENCE 2017, Indianapolis, Indiana, United States. **Anais [...]**. Indianapolis, Indiana, United States

YU, Hailing; JEONG, David; MARQUIS, Brian; COLTMAN, Michael; MARQUIS, Brian. Railroad Concrete Tie Failure Modes and Research Needs. **Transportation Research Board 94th Annual Meeting**, [S. l.], 2015.

ZAKERI, Jabbar-ali; REZVANI, Farshad Hashemi. Failures of Railway Concrete Sleepers During Service Life. **International Journal of Construction Engineering and Management**, v. 1, n. 1, p. 1-5, 2012. DOI: 10.5923/j.ijcem.20120101.01.

ZAKERI, Jabbar Ali; ESMAEILI, Morteza; MOSAYEBI, Seyed Ali; SAYADI, Omid. Experimental investigation of the production of sleepers from concrete that contains blast furnace slag. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 230, n. 1, p. 77-84, 2016. DOI: 10.1177/0954409714527928.

ZAREMBSKI, A. Assessment of Concrete Tie Life on US Freight Railroads. **Report Submitted to the Railway Tie Association**, [S. l.], 2010.

ZEMAN, John C. Hydraulic Mechanisms of Concrete-Tie Rail-Seat Deterioration. In: WILLIAM W. HAY SEMINAR 2010, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.]. p. 1-45.

ZEMAN, John C.; RILEY EDWARDS, J.; BARKAN, Christopher P. L.; LANGE, David A. Failure mode and effect analysis of concrete ties in North America. **Proceedings - 9th International Heavy Haul Conference: "Heavy Haul and Innovation Development"**, n. january 2009, p. 270-277, 2009.

ZOVKIĆ, Ivan; LAKUŠIĆ, Stjepan. **Trajnost armiranobetonskih željezničkih pragova Durability of reinforced-concrete track sleepers**. p. 151-162, 2019.

APÊNDICE A – TRABALHOS EXPERIMENTAIS ACERCA DE DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO

Referência	tipo de cimento	consumo ligante (kg/m ³)	Relação água/ligante	resistência aos 28 dias (MPa)	Agregado miúdo	agregado graúdo	fibra	aditivo	Adições
(BASTOS, 1999)	CP ARI	500	0,39-0,41	58-63	areia	brita de origem basáltica	fibra de aço	Superplastificante	-
(UEHARA, 2010)	-	480	0,23	85MPa	areia	brita	-	-	Cinza volante/escoria de alto forno
(HWANG et al., 2011)	CP comum	562	0,23	92	Areia	Brita	fibra de aço	Plastificante	Escoria de Alto Forno/ Cinza Volante / Silica Ativa
(KOH; HWANG, 2013)	CP ARI	<440	<0,35	72.8MPa	Escória de Alto Forno		-	Superplastificante (policarboxilato)	Escoria de alto-forno
(VAN DAM, 2014)	CP comum	400	0,3	60-80	areia natural	brita (dolomita calcaria)	-	Superplastificante / Incorporador de Ar	Escoria de Alto Forno/ Cinza Volante / Silica Ativa
(SHURPALI et al., 2014)	-	350-370	0,4	50-75	areia	brita	fibra de aço	superplastificante/ incorporador de ar	-
(KOH; HWANG, 2015)	CP ARI	<440	<0,35	72.8MPa	Escória de alto-forno			Superplastificante (policarboxilato)	Escoria de alto-forno
(HAMEED; SHASHIKALA, 2016)	CP comum	-	-	-	areia + borracha triturada	brita	-	Superplastificante (Polímero de naftaleno sulfonado)	Silica Ativa
(ZAKERI et al., 2016)	CP tipo II (Resistente a Sulfato)	400	0,34	80MPa	areia natural	escória de alto forno	-	Plastificante	-
(KOH et al., 2016)	CP ARI	<440	<0,35	72,8	Escória de Alto Forno		-	Superplastificante (policarboxilato)	Escoria de alto-forno

(MEESIT; KAEWUNRUEN, 2017)	CP comum	530	0,44	39-56	areia + borracha triturada	brita	-	-	Sílica Ativa
(GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA; FERNANDEZ, 2017)	CP ARI	380	0,29	100MPa	areia de rio (silicatos)	brita de rio + agregado reciclado	-	Superplastificante (policarboxilato)	-
(BEZGIN, 2017)	CP comum	375	0,4	60-80	areia (calcário)	brita (calcário)	-	Superplastificante (policarboxilato)	-
(YANG et al., 2017)	CP ARI	415-490	0,3-0,33	52-60	areia	brita	Fibra de aço	Superplastificante (policarboxilato)	Escoria de alto- forno
(PARVEZ; FOSTER, 2017)	-	-	-	85-95 MPa	-	-	fibra de aço	-	-
(SHURPALI et al., 2017)	-	358	0,4	40-60MPa	areia	brita	polímero/aço	superplastificante/ incorporador de ar	Sílica Ativa/ Cinza Volante
(KAEWUNRUEN et al., 2018)	CP comum	530	0,44	30-50	areia + borracha triturada	brita	-	Superplastificante	Sílica Ativa
(SILVEIRA, 2018)	CP ARI	410	0,44	60MPa	areia natural	Brita (Gnaiss)	Fibra de aço	Superplastificante (policarboxilato)	-
(YOO et al., 2019)	CP ARI	415 -490	0,30-0,32	52-61	areia	brita	-	Superplastificante (policarboxilato)	escória de alto forno
(TROUAN; SOVA, 2019)	CP ARI	350-400	0,3-0,38	-	areia (granito)	brita	-	Plastificante	Sílica Ativa / Metakaolin
(RAJ; NAGARAJAN; SHASHIKALA, 2020)	CP comum	550	0,4	63-75	areia + borracha triturada	Brita	-	Superplastificante (policarboxilato)	Metakaolin
(BAE; PYO, 2020b)	CP comum	-	0,17	149-169	areia (sílica)	brita (dolomita)	fibra de aço	Superplastificante	Sílica Ativa
(HASNAT; GHAFOORI, 2021)	CP ASTM tipo 5 (Resistente a Sulfato)	1101	0,21	120-140 MPa	areia	brita	fibra de aço (2-3%)	Superplastificante (policarboxilato)	Sílica Ativa/Cinza Volante