

NORMA

INFRA S.A.
SUP-00034

rev 0
13.09.2023

**Patologias em dormentes – Diretrizes para
identificação, avaliação e tratamento**

*Pathologies in sleepers – Guidance for identification, assessment
and treatment*

INFRA S.A.

© INFRA S.A. 2023

Todos os direitos reservados. A menos que especificado de outro modo, nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida ou utilizada em qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e microfilme, sem permissão por escrito da INFRA S.A.

Sede da INFRA S.A.

SAUS, Quadra 01, Bloco 'G', Lotes 3 e 5. - CEP: 70.070-010

Asa Sul Brasília - DF

Telefone:+55 61 2029-6100

<https://www.infrasa.gov.br>

Sumário

Prefácio	vi
Introdução	vii
1 Objetivo	1
2 Referências normativas	1
3 Termos e definições	1
4 Considerações gerais sobre os tipos de patologias	3
5 Patologias estruturais internas.....	4
5.1 Fissuras originadas durante o processo de construção	4
5.1.1 Aspectos de carácter geral	4
5.1.2 Causas.....	6
5.1.3 Medidas preventivas e corretivas.....	8
5.2 Reação álcali agregado (RAA)	11
5.2.1 Aspectos de carácter geral	11
5.2.2 Medidas preventivas e corretivas.....	13
5.3 Formação de etringita tardia (DEF)	13
5.3.1 Aspectos de carácter geral	13
5.3.2 Medidas preventivas e corretivas.....	14
6 Patologias estruturais externas.....	15
6.1 Deterioração do assento do trilho (<i>rail seat deterioration</i> – RSD).....	15
6.1.1 Aspectos de carácter geral	15
6.1.2 Medidas preventivas e corretivas.....	17
6.2 Erosão e abrasão em dormentes de concreto	18
6.2.1 Principais causas da erosão em dormentes de concreto.....	18
6.2.2 Principais causas da abrasão em dormentes de concreto	19
6.2.3 Outras causas da erosão e abrasão em dormentes de concreto	19
6.3 Fissuras na parte central do vão do dormente	20
6.3.1 Fissuras verticais	20
6.3.2 Fissuras longitudinais	21
6.4 Fissuras verticais no meio do vão do dormente.....	21
6.5 Trincas por flexão – Carregamento de alto impacto	22
6.6 Corrosão da armadura	23
6.7 Desgaste aparente na superfície do dormente	23
6.8 Formação de gelo no dormente.....	24
6.9 Danos decorrentes de ciclos de congelamento e degelo	25
6.9.1 Aspectos de carácter geral	25
6.9.2 Medidas preventivas e corretivas.....	25
7 Patologias superficiais	26

7.1	Descoloração	26
7.2	Manchas	26
7.3	Pequenas imperfeições:	26
8	Considerações gerais sobre reparo e manutenção de dormentes	26
8.1	Inspeção Regular.....	26
8.2	Limpeza	27
8.3	Preenchimento de rachaduras	28
8.4	Reparos estruturais.....	29
8.4.1	Reparo com concreto ou morteiro	29
8.4.2	Reforço com polímeros (como epóxi).....	29
8.4.3	Reforço externo	29
8.4.4	Encapsulamento.....	29
8.4.5	Reparo eletroquímico	29
8.4.6	Substituição completa	29
8.4.7	Reparo com compósitos de fibra de carbono.....	29
8.4.8	Reparo por jateamento	30
8.4.9	<i>Grout</i> e ancoragem:	30
8.5	Proteção contra a corrosão.....	30
8.5.1	Concreto de qualidade e recobrimento adequado	30
8.5.2	Inibidores de corrosão.....	30
8.5.3	Uso de aço inoxidável ou galvanizado.....	30
8.5.4	Proteção catódica.....	30
8.5.5	Revestimentos e membranas.....	30
8.5.6	Proteção durante a construção	31
8.5.7	Manutenção e inspeções regulares.....	31
8.5.8	Considerações especiais no desenho	31
8.6	Considerações adicionais sobre reparos em dormentes	31
8.6.1	Melhoria da drenagem	31
8.6.2	Técnicas de reforço.....	31
8.6.3	Monitoramento contínuo	31
8.6.4	Atualização tecnológica	31
8.6.5	Treinamento e capacitação	31
9	Detecção e monitoramento de trincas e fissuras	32
9.1	Inspeção visual.....	32
9.1.1	Gestão da inspeção visual	32
9.1.2	Planejamento das vistorias	32
9.1.3	<i>Checklist</i> para inspeção visual.....	32
9.2	Ultrassom	33
9.3	Ensaio de penetração de água.....	34
10	Fatores para avaliação do descarte de dormente de concreto em ferrovias.....	34

11	Consequências imediatas e futuras do não tratamento de patologias em dormentes de concreto.....	35
11.1	Curto prazo	35
11.2	Longo prazo	36
	Bibliografia	37

Prefácio

A Valec – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. (nome fantasia – “INFRA S.A.”), empresa pública de capital fechado, é uma sociedade por ações controlada pela União e vinculada ao Ministério dos Transportes, regida por seu Estatuto Social e, especialmente, pelas Leis nº 6.404, de 15 de dezembro de 1976, nº 11.772, de 17 de setembro de 2008, nº 12.404, de 04 de maio de 2011, nº 12.743, de 19 de dezembro de 2012 e nº 13.303, de 30 de junho de 2016, e pelos Decretos nº 8.945, de 27 de dezembro de 2016 e nº 11.081, de 24 de maio de 2022.

A INFRA S.A. tem por objeto social prestar serviços na área de projetos, estudos e pesquisas, destinados a subsidiar o planejamento da logística e dos transportes no País, considerando as infraestruturas, as plataformas e os serviços pertinentes aos modos rodoviário, ferroviário, dutoviário, aquaviário e aeroaviário.

A Superintendência de Projetos e Custos (SUPRO) da INFRA S.A. tem por objetivo criar, revisar, zelar e organizar o acervo de Normas Técnicas de engenharia, com o intuito de melhorar os procedimentos da empresa. Ainda que a responsabilidade do conteúdo das normas seja de todo o corpo técnico da INFRA S.A., a SUPRO é a responsável pela gestão do processo de manutenção do acervo de Normas Técnicas de engenharia.

Para estabelecer a estrutura técnica aplicada à infraestrutura de logísticas de transporte nacional, foi elaborada a Norma Técnica INFRA SUP-00034 – Patologias em dormentes – Manual básico para identificação, prevenção e estratégias de recuperação, para regulamentação dos requisitos para a definição de patologias em dormentes a ser utilizado em obra ferroviária, juntamente com os requisitos concernentes às características dos materiais, controle de qualidade e critério de medição.

Introdução

O sistema ferroviário é uma infraestrutura crítica que desempenha um papel vital na mobilidade e no transporte de mercadorias em muitas regiões do mundo. A eficiência, a segurança e a durabilidade deste sistema dependem, em grande parte, da integridade e confiabilidade de seus componentes. Entre esses componentes, os dormentes de concreto são elementos essenciais que suportam os trilhos e distribuem as cargas dos trens para o lastro e o subleito. Dada a sua importância, qualquer falha ou deterioração nos dormentes pode ter implicações significativas para a segurança operacional e a eficiência do sistema ferroviário.

Em um panorama global, observa-se que o concreto se estabelece como o principal material utilizado na fabricação de dormentes em diversos países. Atualmente, estima-se que as redes ferroviárias ao redor do mundo comportem aproximadamente três bilhões de dormentes. Deste total, mais de 400 milhões são confeccionados em concreto, e entre 2 % e 5 % necessitam de substituição anual em virtude de falhas prematuras.

Nos últimos anos, tem-se observado um aumento na incidência de patologias em dormentes de concreto. Estas patologias podem ser atribuídas a uma grande variedade de fatores, que inclui fatores como condições ambientais adversas, cargas de impacto, qualidade do material e práticas de manutenção inadequadas, entre outros. Em particular, os ciclos de congelamento e degelo, a penetração de íons cloreto, a abrasão causada pelo atrito com a brita do lastro e a ação da água são algumas das principais causas de deterioração dos dormentes de concreto.

A deterioração do dormente não se manifesta apenas como uma redução em sua resistência estrutural, mas também pode levar à contaminação do lastro ferroviário, afetando a qualidade da via permanente e resultando em altos custos de manutenção. Além disso, a presença de água e a consequente corrosão das barras de aço no concreto podem acelerar a falha do dormente.

Dada a complexidade e a variedade de fatores que podem levar à deterioração dos dormentes de concreto, torna-se imperativo compreender essas patologias, suas causas e efeitos. Esta compreensão é fundamental para desenvolver estratégias eficazes de prevenção, manutenção e reparo.

Neste contexto, a presente Norma tem por objeto apresentar as principais patologias em dormentes de concreto, com base em uma revisão abrangente da literatura e estudos de caso. Por meio desta análise, espera-se fornecer *insights* valiosos para profissionais da indústria ferroviária, engenheiros e pesquisadores, contribuindo para a melhoria contínua da infraestrutura ferroviária e garantindo sua operação segura e eficiente.

Patologias em dormentes – Diretrizes para identificação, avaliação e tratamento

1 Objetivo

Esta Norma estabelece diretrizes para a identificação, avaliação e tratamento das principais patologias que afetam os dormentes de concreto em sistemas ferroviários.

2 Referências normativas

Os documentos a seguir são citados no texto de tal forma que seus conteúdos, totais ou parciais, constituem requisitos para este Documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 11709, *Dormente de concreto – Projeto, materiais e componentes*;

ABNT NBR 16974, *Agregado graúdo – Ensaio de resistência e à abrasão Los Angeles*;

ABNT NBR 17054, *Agregados – Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio*;

BS EN 1504-2, *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity surface protection systems for concrete*; e

INFRA PRO-00002, *Estudos geotecnológicos — Especificação de projeto*.

3 Termos e definições

Para os efeitos desta Norma, aplicam-se os seguintes termos e definições:

3.1 abrasão

Desgaste que ocorre quando materiais mais duros entram em contato com a superfície dos dormentes de concreto e a desgastam.

3.2 ataque de sulfatos

Deterioração do concreto causada pela reação entre os sulfatos presentes no solo, na água ou no lastro e os componentes do cimento. O ataque de sulfatos pode levar à expansão, à desintegração e à perda de resistência do dormente de concreto.

3.3 corrosão da armadura

Deterioração das barras de aço (armadura) do dormente de concreto devido à ação de agentes corrosivos, como a umidade e os íons cloreto. Pode comprometer a capacidade de carga do dormente e provocar a fissuração e desagregação do concreto.

3.4 delaminação

Separação das camadas de concreto ao redor das armaduras, geralmente causada pela corrosão do aço e expansão do concreto. Pode comprometer a integridade estrutural do dormente de concreto e exigir intervenções de reparo.

3.5 desgaste abrasivo

Desgaste gradual da superfície do dormente de concreto devido ao contato constante com o lastro e os elementos de fixação dos trilhos. O desgaste abrasivo pode reduzir a vida útil do dormente e afetar a estabilidade da via.

3.6 dormente

Componente transversal da superestrutura da via permanente, cujas funções principais são manter os trilhos na bitola e inclinação especificada, além de transmitir as cargas do trilho para a plataforma ferroviária por intermédio do lastro ou outro meio similar.

Fonte: ABNT NBR 11709:2015, p.5.

3.7 dormente de concreto

Tipo de dormente fabricado em concreto armado ou protendido, com alta durabilidade e resistência, razão pela qual é amplamente utilizado.

3.8 erosão

Desgaste e perda de material do dormente de concreto, devido à ação de agentes erosivos, como a água, o vento ou o movimento do lastro. A erosão pode reduzir a vida útil e a capacidade de suporte do dormente.

3.9 espalhamento

Movimento lateral excessivo do dormente de concreto devido à falta de suporte adequado do lastro ou à aplicação de cargas desequilibradas. O espalhamento pode afetar o alinhamento e a estabilidade da via permanente.

3.10 fadiga

Deterioração progressiva do dormente de concreto devido à aplicação repetida de cargas e tensões. A fadiga pode levar ao surgimento de fissuras e redução da capacidade de suporte do dormente.

3.11 fissuração

Formação de fissuras no dormente de concreto, que pode ser causada por fatores como retração do concreto, carga excessiva, ataques químicos ou variações térmicas. Pode comprometer a integridade estrutural do dormente e facilitar a penetração de agentes agressivos.

3.12 injeção de resina

Técnica de reparação de dormentes de concreto que consiste na injeção de resinas epóxi ou de poliuretano nas fissuras ou cavidades para selar e estabilizar a estrutura do dormente.

3.13 patologia

Qualquer alteração ou desordem na condição normal de um material ou componente que possa afetar negativamente seu desempenho, durabilidade ou funcionalidade.

3.14 reação álcali-agregado

Reação química entre os íons alcalinos presentes no cimento e certos tipos de agregados reativos, causando expansão e fissuração do concreto. A reação álcali-agregado pode afetar a durabilidade dos dormentes de concreto e exigir intervenções de reparo.

3.15 reforço com fibras de carbono

Método de restauração que utiliza laminados ou tecidos de fibras de carbono impregnados com resina para aumentar a resistência e rigidez de dormentes de concreto danificados.

3.16 restauração

Processo de reparação e reabilitação de um dormente de concreto danificado, com o objetivo de recuperar sua funcionalidade, estabilidade e durabilidade originais.

4 Considerações gerais sobre os tipos de patologias

4.1 Estima-se que cerca de 400 milhões de dormentes em ferrovias ao redor do mundo são confeccionados em concreto protendido. Esta escolha de material representa uma tendência crescente, visto que, anualmente, a demanda por dormentes de concreto protendido supera mais da metade da demanda global.

4.2 Existe uma categorização das falhas mais frequentes em dormentes de concreto, a qual tem como base pesquisas realizadas em diversas regiões do mundo, porém predominantemente na América do Norte. Uma representação visual dessas falhas pode ser observada na Figura 1.

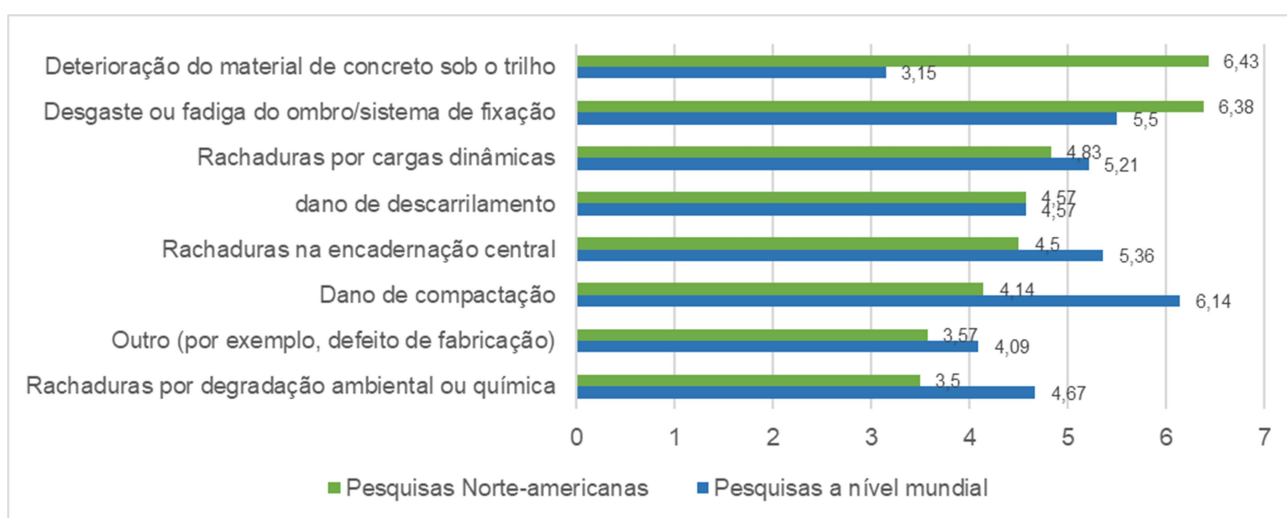


Figura 1 — Falhas mais críticas de dormentes de concreto

(Fonte: Ferdus & Manalo, 2014)

4.3 A principal causa de falha nos dormentes de concreto está diretamente relacionada à deterioração do material de concreto sob o trilho na América do Norte e danos na instalação ou compactação em outros países em nível mundial. No entanto, esses modos de falha podem variar de país para país, pois a geometria e as práticas de operação são diferentes.

4.4 As manifestações patológicas em dormentes de concreto protendido são variadas e as causas dessas patologias provêm de origens distintas, em sua maior parte, devido a um decréscimo na capacidade estrutural dos dormentes.

4.5 Das patologias apresentadas na Figura 1, as mais comuns estão relacionadas à deterioração dos dormentes de concreto protendido, e estão categorizadas em dois grupos: de origem interna e de origem externa. As patologias de origem interna referem-se às questões que surgem diretamente da estrutura do dormente, englobando problemas originados dos materiais e componentes estruturais durante a construção e/ou uso do dormente. Do outro lado, as patologias de origem externa referem-se a danos ou deteriorações originados por fatores externos ao próprio dormente. Em outros termos, estas patologias não são causadas por falhas inerentes ao material ou ao processo de fabricação do dormente, mas sim por influências ambientais, operacionais ou mecânicas que atuam sobre ele após

sua instalação.

4.6 As patologias internas incluem, mas não estão limitadas a:

- a) fissuras originadas durante o processo de produção;
- b) formação retardada de etringita (DEF); e
- c) reação álcali-agregado (RAA).

4.7 As patologias externas incluem, mas não estão limitadas a:

- a) fissuras na parte central do vão do dormente;
- b) desgaste aparente na superfície do dormente;
- c) deterioração do assento do trilho;
- d) carregamento de alto impacto;
- e) fissuras verticais na área de suporte dos trilhos;
- f) corrosão da armadura;
- g) danos decorrentes de ciclos de congelamento e degelo; e
- h) formação de gelo no dormente.

Embora essas falhas sejam detalhadas individualmente, raramente ocorrem de forma isolada. Portanto, os dormentes podem ser afetados por múltiplas falhas simultaneamente e, frequentemente, os mecanismos de ocorrência dessas falhas estão inter-relacionados.

5 Patologias estruturais internas

5.1 Fissuras originadas durante o processo de construção

5.1.1 Aspectos de caráter geral

Os principais tipos de fissuras que ocorrem nos dormentes de concreto protendido são mostrados na Figura 2.

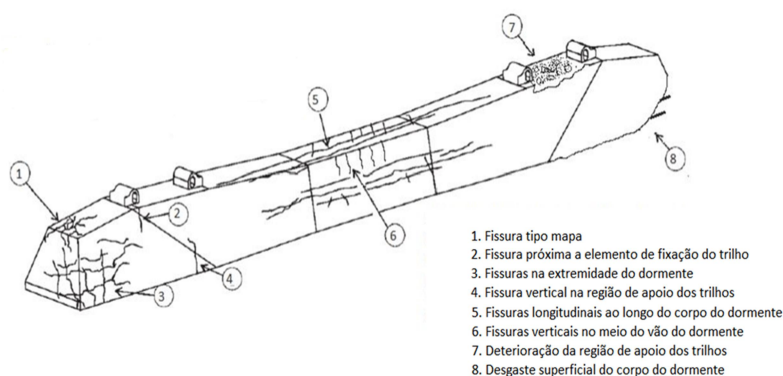


Figura 2 — Categorias mais comuns de fissuras identificadas em dormentes de concreto protendido
(Fonte: Taherinezhad et al, 2013)

As fissuras nos dormentes de concreto representam interrupções ou aberturas que podem comprometer a estabilidade da via férrea, afetando a segurança operacional, a durabilidade, a resistência (impermeabilidade) à água e outros padrões estabelecidos no projeto da ferrovia.

As fissuras que surgem durante a produção dos dormentes estão frequentemente associadas à força de protensão exercida sobre o concreto ou ao excessivo torque aplicado ao sistema de fixação dos dormentes.

Em elementos como os dormentes de concreto, que normalmente não possuem armadura transversal, as fissuras têm potencial para se estenderem longitudinalmente (Figura 3), o que pode resultar na degradação estrutural do dormente e na diminuição considerável de sua capacidade de suporte de carga.



Figura 3 — Fissuras visíveis longitudinais em um dormente de concreto, destacando a necessidade de manutenção e reparo

(Fonte: INFRA S.A.)

As fissuras situadas na área de ancoragem de dormentes protendidos são habitualmente induzidas por tensões de tração, nomeadamente "*bursting*" e "*splitting*":

- a) a tensão "*bursting*" (explosão) origina-se do escorregamento do fio/cordoalha no término do dormente, resultando em fissuras quando a quantia de concreto circundante à armadura é insuficiente para assimilar as tensões radiais derivadas desse deslizamento da armadura; e
- b) a tensão denominada "*splitting*" (divisão) é originada pela transposição da força de protensão no interior do comprimento de ancoragem que, ao ultrapassar a resistência à tração do concreto, pode originar fissuras que se estendem de uma cordoalha para outra.

A gradação das fissuras é determinada pela dimensão de sua abertura média na superfície de concreto. A faixa de variação padrão das aberturas de fissuras compreende:

- a) gradação 01: abertura $\leq 0,40\text{mm}$;
- b) gradação 02: abertura $> 0,40\text{mm}$ a $\leq 1,00\text{mm}$; e

- c) gradação 03: abertura > 1,00mm.

5.1.2 Causas

Cargas excessivas como o tráfego de trens pesados ou cargas pontuais, podem levar ao desenvolvimento de fissuras e trincas nos dormentes de concreto.

- a) tráfego de trens pesados: a circulação de trens de carga com peso elevado ou a passagem frequente de trens pesados, pode impor uma carga maior sobre os dormentes de concreto, gerando tensões que ultrapassam a capacidade de resistência do dormente; e
- b) cargas pontuais, como a queda de objetos pesados sobre os dormentes ou impactos causados por choques mecânicos, podem provocar tensões localizadas que excedem a capacidade de resistência do concreto.

O aumento da velocidade dos trens pode gerar cargas dinâmicas maiores sobre os dormentes de concreto. Essas cargas, combinadas com a frequência e a duração da exposição, podem levar ao desenvolvimento de fissuras e trincas.

A distribuição inadequada das cargas sobre os dormentes, como a concentração de peso em áreas específicas, pode resultar em tensões localizadas e cargas excessivas.

Falhas na infraestrutura ferroviária, como assentamentos diferenciais, compactação inadequada do lastro ou desgaste dos trilhos, podem levar a uma distribuição desigual das cargas sobre os dormentes de concreto. Essas condições podem provocar cargas excessivas e causar fissuras e trincas nos dormentes.

Em relação às fissuras que se originam da aplicação de torque excessivo no sistema de fixação dos dormentes, podem surgir grandes fissuras longitudinais (Figura 4).

Aspectos como a presença de água e partículas finas no interior da bucha de fixação do dormente, assim como deformações plásticas nos parafusos ferroviários e buchas, podem intensificar a tensão transversal na região de fixação do dormente, gerando potencialmente o surgimento de fissuras.



Figura 4 — Trinca Longitudinal
(Fonte: INFRA S.A)

As falhas na fabricação são uma das causas que podem levar ao desenvolvimento de fissuras e trincas

nos dormentes de concreto. As principais falhas na fabricação que podem provocar fissuras em dormentes de concreto incluem:

- a) a utilização de concreto de baixa qualidade, com baixa resistência à compressão, tração ou aderência inadequada, pode resultar em dormentes mais suscetíveis a fissuras e trincas. É crucial garantir que o concreto usado atenda aos requisitos de resistência e durabilidade;
- b) a proporção correta de água e cimento é fundamental para a resistência e durabilidade do concreto. Se a quantidade de água for muito alta, o concreto terá maior porosidade e menor resistência, aumentando a probabilidade de fissuras e trincas;
- c) a cura inadequada do concreto que pode resultar em concreto mais fraco e propenso a fissuras e trincas;
- d) compactação inadequada do concreto para eliminar bolhas de ar e garantir a densidade e homogeneidade do concreto. Se o concreto não for devidamente compactado, podem ocorrer vazios e heterogeneidades que enfraquecem a estrutura e aumentam a suscetibilidade a fissuras e trincas; e
- e) colocação incorreta das armaduras de aço, que pode resultar em uma distribuição desigual das tensões no dormente de concreto. Isso pode levar a um aumento da probabilidade de fissuras e trincas, especialmente se as armaduras estiverem próximas demais à superfície ou mal posicionadas.

A contração térmica e a retração do concreto, são fenômenos naturais que podem causar tensões internas no dormente de concreto e levar ao desenvolvimento de fissuras e trincas.

A retração do concreto é um processo de encolhimento que ocorre à medida que o concreto perde água e seca ao longo do tempo. A retração pode ser dividida em duas categorias principais:

- a) retração autógena: ocorre devido à auto dessecação do concreto, ou seja, a perda de água interna durante o processo de hidratação do cimento. A retração autógena é mais significativa em concretos de baixa relação água-cimento e alta resistência; e
- b) retração por secagem: ocorre quando o concreto perde umidade para o ambiente externo. A velocidade e magnitude da retração por secagem dependem de fatores como a relação água-cimento, o tamanho e a forma dos dormentes, a temperatura e a umidade relativa do ar.

As variações sazonais de temperatura e, em alguns casos, mudanças diárias significativas de temperatura podem causar a expansão e contração do concreto, gerando tensões que resultam em fissuras e trincas.

Outra causa que pode gerar fissuras é a corrosão das armaduras, quando em contato com um ambiente corrosivo, geralmente caracterizada pela presença de umidade e agentes agressivos, como cloretos ou dióxido de carbono. Isto pode ser gerado por:

- a) recobrimento insuficiente pela camada de concreto, que pode permitir a penetração de agentes agressivos, como umidade, cloretos e dióxido de carbono, levando à corrosão das armaduras;
- b) fissuras e trincas no concreto, que podem facilitar a entrada de agentes agressivos e umidade no interior dos dormentes, aumentando o risco de corrosão das armaduras;
- c) baixa qualidade do concreto, com alta porosidade ou baixa resistência à carbonatação, que podem

permitir a entrada de agentes agressivos e aumentar o risco de corrosão das armaduras; e

- d) exposição a ambientes agressivos: dormentes de concreto expostos a ambientes agressivos, como áreas costeiras, industriais ou com alto teor de sais no solo, podem estar sujeitos a um maior risco de corrosão das armaduras.

A movimentação do solo pode ser uma causa importante de fissuras e trincas em dormentes de concreto, uma vez que pode levar a deformações e tensões na estrutura dos dormentes. Existem vários fatores relacionados à movimentação do solo que podem impactar os dormentes de concreto:

- a) assentamentos diferenciais;
- b) expansão e contração do solo, podem ocorrer devido às variações de umidade e temperatura, um exemplo típico são os solos expansivos, como as argilas, que podem apresentar grandes variações volumétricas quando absorvem água e quando secam;
- c) erosão do solo sob ou ao redor dos dormentes de concreto, a qual pode levar à formação de vazios e resultar em perda de suporte adequado, podendo causar deformações e tensões nos dormentes, levando ao desenvolvimento de fissuras e trincas; e
- d) movimentos sísmicos que podem causar vibrações e deslocamentos significativos do solo e podem induzir tensões e deformações nos dormentes de concreto, aumentando o risco de fissuras e trincas.

5.1.3 Medidas preventivas e corretivas

Existem diversas razões para a ocorrência de fissuras, e cada motivo geralmente resulta em padrões característicos de fissuração. Ao identificar a origem de uma fissura específica em um elemento, pode-se antecipar o cenário que se desenhará, esboçar o comportamento e avaliar as potenciais repercussões.

5.1.3.1 Medidas preventivas

São consideradas medidas preventivas, as seguintes:

- a) a formação de fissuras ocorre geralmente quando a liberação da força de protensão acontece antes que o concreto atinja a resistência suficiente estipulada no projeto. Contudo, para verificação de fissuras, devem ser analisados outros fatores como a espessura de concreto que recobre a armadura, o tipo de agregado conforme a ABNT NBR 17054, e a natureza da superfície da armadura, os quais também podem influenciar na geração de fissuras;
- b) deve ser verificado o surgimento de fissuras em diferentes estágios, pois, é comum que fissuras surjam logo após a concretagem, em dias, semanas ou até anos após a instalação na linha férrea;
- c) deve-se identificar corretamente a origem e o tamanho da fissura para determinar o método e os materiais mais adequados para sua correção, garantindo a segurança das operações ferroviárias;
- d) deve ser registrada a localização, a largura, a forma e a distância entre as fissuras, pois, podem indicar a causa ou as razões de sua ocorrência, especialmente em relação às cargas e tensões que os trilhos e dormentes enfrentam;
- e) uma vez identificada a existência de uma fissura, deve-se realizar um registro com seu avanço no tempo, uma vez que pode se expandir devido ao tráfego contínuo de trens (fissuras progressivas) ou permanecer estável (fissuras estáticas e inalteradas);

- f) deve ser avaliado o impacto da granulometria e da forma dos agregados graúdos do concreto na resistência dos dormentes às fissuras derivadas da protensão, conforme a ABNT NBR 16974;
- g) deve-se estabelecer e seguir um plano de manutenção preventiva e inspeções regulares para detectar precocemente possíveis fissuras e trincas nos dormentes de concreto. Isso permite a realização de reparos ou substituições a tempo, garantindo a segurança e a durabilidade da infraestrutura ferroviária;
- h) deve ser verificada a existência de falhas na infraestrutura da via permanente que possam afetar a distribuição, o alinhamento e a distribuição de cargas nos dormentes;
- i) aumentar o diâmetro médio do agregado, diminui a probabilidade de ocorrência de fissuras após a protensão, devido ao aumento da resistência à fratura do concreto;
- j) devem-se usar agregados de forma angular, pois apresentam uma resistência à fratura 50% superior em comparação com os agregados arredondados, reduzindo significativamente a possibilidade de formação de fissuras;
- k) deve ser garantido o recobrimento da armadura e aprimorar a resistência à compressão simples do concreto, pois, são fatores que minimizam consideravelmente a incidência de fissuras devido à protensão;
- l) o dormente deve possuir uma resistência que garanta suportar o peso e a velocidade dos trens;
- m) a fabricação de dormentes de concreto com alta resistência e capacidade de carga, bem como a utilização de técnicas de projeto e materiais adequados, pode contribuir para reduzir o risco de fissuras e trincas devido a cargas excessivas;
- n) devem-se seguir as práticas recomendadas e os padrões de qualidade do fabricante;
- o) deve-se utilizar concreto de alta qualidade, com resistência e durabilidade adequadas às exigências do projeto;
- p) um processo de cura adequado deve ser adotado, mantendo a umidade e a temperatura corretas durante o período de cura;
- q) é necessário garantir a compactação adequada do concreto para eliminar bolhas de ar e alcançar a densidade e homogeneidade desejadas;
- r) a colocação correta das armaduras de aço deve ser assegurada, respeitando as distâncias de cobertura e o posicionamento adequado;
- s) um rigoroso controle de qualidade deve ser implementado durante o processo de fabricação dos dormentes de concreto. Isso inclui a inspeção das matérias-primas, o monitoramento das etapas de produção e a realização de testes não destrutivos e destrutivos para verificar a conformidade com as especificações e normas aplicáveis;
- t) os profissionais envolvidos na fabricação dos dormentes de concreto devem ser adequadamente treinados; e
- u) para minimizar o risco de fissuras e trincas devido à contração térmica e retração do concreto, algumas medidas preventivas e de controle podem ser adotadas:

- 1) controle da relação água-cimento;
- 2) cura adequada mediante a manutenção das condições adequadas de umidade e temperatura durante o processo de cura;
- 3) utilização de aditivos redutores de retração e adições minerais, como a sílica ativa, podem ajudar a minimizar a retração do concreto e reduzir o risco de fissuras;
- 4) uso de juntas de controle: a incorporação de juntas de controle nos dormentes de concreto pode ajudar a acomodar a contração térmica e a retração do concreto, direcionando as tensões para áreas específicas e reduzindo a probabilidade de fissuras e trincas em outras áreas dos dormentes;
- 5) realizar adequado procedimento de protensão;
- 6) controle da temperatura durante a fabricação e cura dos dormentes de concreto pode ajudar a minimizar a contração térmica e reduzir o risco de fissuras. Isso pode incluir o uso de técnicas de resfriamento ou aquecimento, dependendo das condições ambientais; e
- 7) proteção contra variações extremas de temperatura: Durante a vida útil dos dormentes de concreto, é importante protegê-los de variações extremas de temperatura, especialmente em regiões com grandes flutuações sazonais ou diárias. Isso pode incluir medidas como a aplicação de isolamento térmico ou a utilização de barreiras com pintura branca nos dormentes.

5.1.3.2 Medidas corretivas

São consideradas medidas preventivas, as seguintes:

- a) em caso de identificar concreto deteriorado ou contaminado ao redor das armaduras comprometidas pela corrosão, esse concreto deve ser removido cautelosamente, para prevenir danos às armaduras, e substituído por material de reparo apropriado, como concreto ou argamassa de elevada resistência. Deve-se garantir que novo revestimento tenha espessura correta para resguardar armaduras;
- b) remover e limpar ferrugem e subprodutos da corrosão das armaduras corroídas utilizando escovas de aço, jateamento abrasivo ou outros métodos apropriados;
- c) aplicar revestimento anticorrosivo nas armaduras após limpeza;
- d) utilizar tintas à base de zinco, epóxi ou outros materiais designados para proteção anticorrosiva;
- e) adotar medidas preventivas para minimizar risco de corrosão futura;
- f) otimizar sistema de drenagem; e
- g) mitigar o impacto da movimentação do solo nos dormentes de concreto, mediante a implementação de algumas medidas preventivas e de controle como:
 - 1) estudo geotécnico: deve ser realizado um estudo geotécnico adequado antes da construção da ferrovia, conforme a INFRA PRO-00002, para identificar as condições do solo e prever possíveis problemas de movimentação do solo;

- 2) preparação adequada do subleito: o subleito deve ser preparado de forma adequada para garantir um suporte uniforme e estável para a superestrutura da via férrea e dos dormentes de concreto, utilizando materiais apropriados;
- 3) controle de umidade: devem ser implementados sistemas de drenagem e controle de umidade para reduzir a variação de umidade no solo e minimizar a expansão e contração do solo;
- 4) proteção contra erosão: devem ser adotadas medidas para prevenir a erosão do solo, como a instalação de canais de drenagem, barreiras de contenção ou revegetação das áreas próximas à ferrovia;
- 5) manutenção e inspeção regular: devem ser realizadas campanhas de manutenção e inspeção regulares, tanto dos dormentes de concreto, quanto, da infraestrutura ferroviária para identificar e corrigir problemas relacionados à movimentação do solo antes que causem danos significativos aos dormentes;
- 6) reforço estrutural: em casos de movimentação do solo significativa ou contínua, pode ser necessário considerar o reforço estrutural dos dormentes de concreto ou da infraestrutura ferroviária como um todo. Isso pode incluir a adição de reforços externos, como placas ou faixas de aço, fibra de carbono ou outros materiais compósitos;
- 7) projeto adaptativo: em áreas com histórico de movimentação do solo significativa, deve-se considerar dormentes de concreto ou sistemas ferroviários adaptativos que possam acomodar melhor as tensões e deformações causadas pela movimentação do solo. Isso pode incluir o uso de juntas de dilatação, sistemas de apoio flexíveis ou materiais com maior resistência à tração; e
- 8) monitoramento contínuo: devem ser utilizados sistemas de monitoramento contínuo, como sensores de deslocamento ou inclinômetros, para acompanhar a movimentação do solo e a resposta dos dormentes de concreto a essas mudanças. O monitoramento contínuo pode ajudar a identificar problemas potenciais e permitir intervenções oportunas para evitar danos aos dormentes e à infraestrutura ferroviária.

5.2 Reação álcali agregado (RAA)

5.2.1 Aspectos de caráter geral

Uma distinção notável entre os ataques por sulfato e álcali reside na substância reativa. No ataque por sulfato, o cimento é a substância reativa, enquanto nos ataques por álcali, são os agregados.

O cimento *portland* é a principal fonte de álcalis no concreto. No entanto, em algumas situações, a areia não lavada contendo cloreto de sódio pode ser uma fonte adicional.

A reação entre álcalis e agregados acontece quando a solução intersticial do concreto, que é altamente básica e rica em álcalis, interage com determinados minerais silicosos reativos presentes nos agregados. O resultado dessa interação é a formação de um gel álcali-silica, que ao absorver água pode expandir, gerando uma pressão interna dentro do concreto e, quando essa pressão ultrapassa a capacidade de resistência à tração do concreto, pode levar à formação de fissuras.

Para que essa reação ocorra, três fatores precisam estar presentes ao mesmo tempo: a presença de agregados reativos, uma alta concentração de álcalis no concreto e a disponibilidade de água.

Outras fontes internas incluem aditivos, como superplastificantes. Além disso, agregados com sílica, como sílex e quartzito, podem reagir em soluções alcalinas do cimento, resultando em uma expansão potencialmente prejudicial.

Visualmente, a RAA pode ser identificada pela expansão do concreto e pela presença de fissuras superficiais (Figura 5). Essas fissuras podem facilitar a entrada de substâncias nocivas, como cloretos, sulfatos e carbonatos, que têm o potencial de corroer as armaduras de aço. Devido à sua exposição direta a fatores ambientais, os dormentes de concreto são particularmente vulneráveis a essa condição.



Figura 5 — Fissuras superficiais em dormente de concreto protendido
(Fonte – Shayan, 2007)

A RAA é reconhecida como um elemento causador de falhas do dormente, devido à consequente degradação que causam as fissuras produzidas pela reação. Destaca-se que as fissuras oriundas da expansão causada pelo RAA podem criar locais propícios para a cristalização da etringita. A Figura 6 apresenta a falha de um dormente devido a RAA.



Figura 6 — Fissura em dormente de concreto devido a RAA
(Fonte: Fournier et al. 2004)

Embora os ensaios de reatividade dos agregados sejam importantes para minimizar a probabilidade de manifestação do RAA, não asseguram a total ausência de reatividade entre o cimento e os agregados, especialmente quando tal reatividade se manifesta de maneira mais gradual.

A geração do gel álcali-sílica reduz a concentração alcalina da solução porosa, promovendo a formação de etringita, uma vez que esta é mais propensa em soluções com baixa alcalinidade, surgindo em regiões próximas ao gel de sílica alcalina.

Temperaturas elevadas em estágios iniciais do concreto podem ativar tanto o RAA quanto a formação de etringita tardia (*Delayed Etringite Formation* – DEF).

Pesquisas mais recente sugerem que os impactos negativos do RAA podem não ser tão pronunciados nos primeiros anos de vida do dormente. No entanto, com o passar do tempo, pode haver uma diminuição significativa na capacidade de carga do componente afetado.

5.2.2 Medidas preventivas e corretivas

Em caso de prever a RAA e a formação de etringita tardia (DEF), deve-se aplicar um revestimento para proteger a superfície do dormente, como é o uso de nitrato de lítio.

O revestimento da superfície do dormente de concreto deve seguir as diretrizes da BS EN 1504-2, que considera a utilização de cimentos poliméricos, revestimentos epóxi, acrílicos e impregnação hidrofóbica.

Pode ser considerado o uso de adições minerais pozolânicas, como cinza de casca de arroz, cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim. Essas adições diminuem a concentração de álcalis no concreto, melhoram a textura dos poros e reduzem a permeabilidade, impedindo a entrada de umidade e aumentando a durabilidade do concreto.

5.3 Formação de etringita tardia (DEF)

5.3.1 Aspectos de caráter geral

Solos, águas subterrâneas e ocasionalmente, agregadas podem conter sulfatos de diversos elementos, como sódio, potássio, magnésio e cálcio. Quando dissolvidos, esses sulfatos podem reagir com componentes da pasta de cimento, como o aluminato tricálcico ou o hidróxido de cálcio. Essas reações resultam em expansões que causam fissuras e, eventualmente, a degradação do concreto do dormente.

A DEF (Figura 7) pode gerar deterioração dos dormentes de concreto a causa da reação interna de sulfato, atribuída à formação de microfissuras devido ao tratamento térmico aplicado durante a pré-fabricação.



Figura 7 — Dormente com fissuração longitudinal decorrente de DEF
(Fonte: Sundaram et al, 2018)

A expansão da DEF, embora ainda seja objeto de discussão entre especialistas, é entendida como um processo em que a etringita primária, formada nas fases iniciais do concreto, pode se decompor em temperaturas superiores a 65°C. Em estágios mais avançados, na presença de umidade, a etringita pode se recompor, gerando pressões internas que podem levar à fissuração e desagregação do concreto.

O fissuramento em dormentes de concreto protendido, a causa de DEF, pode ocorrer após vários anos de serviço, sendo influenciado pela temperatura de cura e, também, por fatores como a composição e a finura do cimento. Em certas combinações desfavoráveis desses parâmetros, a DEF pode ocorrer mesmo em temperaturas abaixo de 60°C.

É importante notar que os dormentes ferroviários são particularmente suscetíveis à DEF. O processo de produção desses dormentes exige que alcancem alta resistência em um curto período, muitas vezes necessitando de cura térmica. Além disso, a exposição constante à umidade seja por chuvas ou outras condições ambientais torna-os mais propensos a desenvolver esta patologia.

A manifestação da DEF no concreto é caracterizada por fissuras multidirecionais. Estas fissuras, embora semelhantes às causadas pela reação álcali-agregado têm mecanismos subjacentes distintos.

Deve-se considerar, no projeto do dormente, a composição do cimento, o processo de cura e as condições ambientais a que o dormente de concreto vai estar exposto. A formação de etringita tardia, pode ser influenciada por uma combinação desses fatores.

5.3.2 Medidas preventivas e corretivas

Para garantir a integridade e durabilidade dos dormentes de concreto e prevenir a formação de etringita tardia, devem ser consideradas as seguintes diretrizes:

- a) tratamento térmico do concreto, que deve considerar os seguintes aspectos:
 - 1) definir um período de espera adequado entre a aplicação do concreto fresco e o início do aumento da temperatura;
 - 2) controlar a taxa de aumento da temperatura; e

- 3) limitar a temperatura máxima no interior do concreto, geralmente não excedendo 70°C.
- b) seleção de cimento: deve-se trabalhar com cimentos com baixos teores de álcalis, sulfatos e C3A. A escolha do cimento adequado é fundamental para minimizar os riscos associados à formação de etringita tardia;
- c) refinamento dos poros da matriz cimentícia: o refinamento dos poros é uma estratégia eficaz para melhorar a resistência do concreto e prevenir a DEF. Isso pode ser alcançado por meio da incorporação de adições minerais; e
- d) uso de adições minerais: adições minerais, como cinzas volantes e sílica ativa, como substitutos parciais do cimento. Estas adições não só melhoram as propriedades do concreto, mas também ajudam a mitigar o risco de DEF. No entanto, é importante ter cautela ao considerar o uso de metacaulim. Embora seja uma adição mineral valiosa, seu alto teor de alumina pode não ser eficaz na mitigação da DEF.

6 Patologias estruturais externas

6.1 Deterioração do assento do trilho (*rail seat deterioration* – RSD)

6.1.1 Aspectos de caráter geral

A deterioração da região de apoio dos trilhos é identificada como uma patologia comum em dormentes de concreto protendido. Esta condição manifesta-se pelo desgaste da superfície do concreto na interface entre o dormente e a palmilha do trilho (Figura 8).



Figura 8 — Deterioração da região do apoio dos trilhos (RSD)
(Fonte: INFRA S.A.)

Embora o mecanismo exato pelo qual o RSD ocorre não seja consensual entre os especialistas, diversos fatores são reconhecidos como potenciais causadores dessa patologia. Existem cinco mecanismos principais que contribuem para o RSD:

- a) abrasão, resultante do movimento relativo entre o coxim do trilho e o assento de concreto, provocando o desgaste da pasta de cimento devido à fricção. A interação de partículas abrasivas finas e água na interface trilho-assento amplifica as condições para a ocorrência de abrasão, este mecanismo se destaca como o mais crítico (Figura 9);
- b) esmagamento, ocorre devido às altas cargas de impacto durante a passagem do material rodante;
- c) fissuras devido a ciclos de congelamento e degelo, em regiões onde acontece esse fenômeno;
- d) fissuras devido à pressão hidráulica; e
- e) erosão hidroabrasiva.



Figura 9 — Desgaste de dormente de concreto devido à abrasão do assento do trilho
(Fonte: Zeman et al, 2009)

Diversos elementos são reconhecidos como contribuintes para a abrasão do assento do trilho, incluindo a presença de água, cargas pesadas por eixo, falhas em fixadores, ombreiras ou dormentes, declives íngremes e, notadamente, curvas com inclinação superior a dois graus.

A água desempenha um papel crucial na deterioração, seja por meio da fissuração por pressão hidráulica, erosão hidroabrasiva ou ciclos de congelamento e degelo.

A ausência ou desgaste significativo da palmilha amortecedora sob o trilho também é um fator contribuinte, pois permite que o trilho entre em contato direto com o concreto.

As falhas nos materiais de fixação do trilho no dormente podem resultar em maior solicitação da área sob o trilho.

O RSD pode se manifestar de duas formas principais:

- a) desgaste superficial uniforme; e
- b) desgaste superficial irregular.

Entre as consequências do RSD estão o desgaste prematuro do concreto, redução da vida útil e potencial abertura de bitola, que representa um risco significativo de descarrilamento do trem.

6.1.2 Medidas preventivas e corretivas

Verificar periodicamente o material rodante para mitigar a formação de rachaduras na área de suporte dos trilhos, pois podem gerar impactos intensos, uma vez que são as principais causas de cargas de alta magnitude na via permanente. Para isso, recomenda-se o uso do *Wheel Impactor Load Detector* (WILD), o qual é uma ferramenta eficaz para identificar tais problemas, pois é um dispositivo instalado na via para avaliar o impacto das rodas dos trens, sinalizando as que precisam de manutenção.

Verificar as faces inferiores do dormente, que se encontra em contato com o lastro, pois, muitas das patologias deste grupo podem se manifestar nessa região do dormente.

Realizar rotinas de manutenção que priorizem a avaliação regular das condições do lastro. Atualmente, existem equipamentos ferroviários especializados que permitem a inspeção da via, verificando o suporte adequado dos dormentes e detectando possíveis espaços vazios no lastro.

Recomenda-se a adoção de palmilhas amortecedoras robustas, pois elas atenuam melhor os impactos dinâmicos e diminuem a deflexão causada pela flexão do dormente. A implementação de palmilhas poliméricas sob o dormente é recomendada para aumentar a área de contato entre o lastro e o dormente, amortecer cargas de impacto e reduzir deformações e movimentos do lastro.

Recomenda-se a utilização de concretos reforçados com fibras metálicas e concretos com baixa relação água/cimento.

Para o concreto, devem ser usados agregados resistentes.

Pode ser adotada a incorporação de aditivos superplastificantes ao concreto do dormente.

Recomenda-se usar ferramentas e veículos ferroviários equipados para avaliar a condição dos dormentes, seja manualmente ou de forma automatizada, usando técnicas não invasivas como análise de imagem automática, emissões sonoras e métodos de ondas de tensão e ultrassom. Dentre eles, a técnica de eco impacto tem se destacado, utilizando reflexões de ondas no concreto para detectar irregularidades, como rachaduras, espaços vazios e concreto frágil. Equipamentos modernos que empregam essa técnica podem avaliar dormentes de concreto protendido em uma taxa de um dormente por segundo.

A aplicação de uma camada de poliuretano na região de apoio dos trilhos também pode aumentar significativamente a resistência do concreto contra o RSD.

Utilização de placas de aço moldadas no local, cobrindo a área do assento do trilho (Figura 10). Contudo, a adição dessa placa de aço pode elevar consideravelmente os custos de produção dos dormentes.



Figura 10 — Chapa de aço cobrindo o assento do trilho após 10 milhões de ciclos a uma taxa de 2,5 ciclos por segundo
(Fonte: Peters, 2004)

Deve ser verificada a possibilidade de infiltração de água sob a placa, pois, pode acelerar a deterioração do concreto na área do assento do trilho, sendo um aspecto que necessita de análise cautelosa.

Podem ser adotadas outras medidas para prevenção da abrasão do dormente como:

- a) aplicação de um revestimento epóxi sobre a região do assento do trilho. No entanto, essa solução precisa de mão de obra constante (durante a obra e manutenção), interrupção das operações ferroviárias durante a aplicação e cura do epóxi, e o potencial desgaste do epóxi ao longo do tempo são altos;
- b) incorporação de cinzas volantes e sílica ativa ao concreto na área do assento do trilho;
- c) utilização de rejunte reforçado com fibra de aço na região do assento durante a fabricação;
- d) implementação de um conjunto de pastilhas multicamadas resistentes à abrasão, e
- e) adição de agregados metálicos na área do assento do trilho.

NOTA: A ideia de aprimorar os materiais de concreto na região do assento do trilho tem como objetivo limitar a fissuração e a permeabilidade do concreto, evitando a infiltração de água através de canais fissurados na estrutura porosa da pasta de cimento do dormente. No entanto, mesmo que a melhoria dos materiais de concreto na área do assento do trilho possa ampliar as resistências à compressão e à tração do concreto do dormente, sua eficácia contra a abrasão ainda é questionável, e outras soluções alternativas devem ser avaliadas.

Com frequência é necessária à interrupção da operação da ferrovia em casos de inspeções detalhadas ou manutenção corretiva.

6.2 Erosão e abrasão em dormentes de concreto

6.2.1 Principais causas da erosão em dormentes de concreto

A erosão em dormentes de concreto pode ser causada por fatores como:

- a) desgaste por água ou outros líquidos (como óleos e produtos químicos), que podem gradualmente corroer a superfície do dormente de concreto; e
- b) a exposição a condições climáticas adversas, como chuvas fortes, inundações, geadas e calor intenso.

6.2.2 Principais causas da abrasão em dormentes de concreto

A abrasão em dormentes de concreto pode ocorrer por causa de:

- a) atrito entre os dormentes e os trilhos;
- b) atrito entre os dormentes e o lastro;
- c) presença de detritos transportados pelo vento ou pela água;
- d) tráfego de veículos de manutenção, e
- e) movimentação de equipamentos pesados sobre os dormentes.

6.2.3 Outras causas da erosão e abrasão em dormentes de concreto

Outras causas da erosão e abrasão em dormentes de concreto são:

- a) deterioração química: o concreto é um material alcalino e pode reagir com substâncias ácidas. Se ácidos (por exemplo, de poluentes atmosféricos, ácidos industriais ou águas ácidas) entrarem em contato com a superfície dos dormentes, podem ocorrer reações químicas que resultem na dissolução e erosão do material do dormente;
- b) corrosão devido à reação álcali-agregado (RAA);
- c) biodegradação: certos microrganismos, como bactérias e fungos, podem metabolizar os componentes do concreto, levando à sua deterioração e eventual erosão. Este é um processo mais lento e menos comum, mas pode ocorrer sob condições específicas, por exemplo, em ambientes muito úmidos e ricos em nutrientes; e
- d) condições climáticas extremas:
 - 1) calor intenso, podendo gerar as seguintes condições:
 - a) expansão térmica: em climas extremamente quentes, a expansão térmica do concreto pode causar fissuras e fendas na superfície dos dormentes, o que pode facilitar a entrada de água e acelerar a erosão;
 - b) secagem e umidificação cíclica: em climas onde há alternância entre condições quentes e secas e chuvas intensas, o ciclo de umedecimento e secagem pode causar erosão. Quando o concreto seca, ele pode retrair e desenvolver fissuras. Se a água entrar nessas fissuras durante um período de chuva, ela pode causar mais danos ao se expandir e contrair com as mudanças de temperatura; e
 - c) degradação química: o calor pode acelerar certas reações químicas que causam a deterioração do concreto, como a reação álcali-agregado (RAA), mencionada anteriormente.

- 2) frio intenso, podendo ocasionar os seguintes problemas:
 - a) ciclos de congelamento e descongelamento: em climas extremamente frios, a água que se infiltra nas fissuras do concreto pode congelar. Quando a água congela, ela se expande, o que pode causar mais fissuras ou alargar as fissuras existentes. Com o tempo, esse ciclo de congelamento e descongelamento pode levar à erosão do concreto; e
 - b) corrosão por cloretos: em áreas onde o sal é usado para derreter a neve e o gelo nas estradas, os dormentes de concreto podem ser expostos a cloretos, que podem acelerar a corrosão do concreto.
- 3) em ambos os climas, a ação mecânica, como o movimento dos trilhos e o peso dos trens, pode acelerar a erosão do concreto. Mudanças extremas de temperatura podem tornar o concreto mais suscetível a danos causados por tensões mecânicas.

6.3 Fissuras na parte central do vão do dormente

As fissuras no vão central podem ser de dois tipos, como descrito em 6.3.1 e 6.3.2.

6.3.1 Fissuras verticais

São um tipo de falha comum que pode comprometer a eficiência dos dormentes de concreto protendido. Correspondem à formação de fissuras verticais na área do dormente que sustenta os trilhos. Comumente, essas fissuras começam na base do dormente e avançam em direção à superfície onde os trilhos estão apoiados.

Esse fenômeno é frequentemente resultado das intensas forças de impacto experimentadas pela estrutura da via durante a circulação dos trens. Essas forças podem criar um momento significativo na área de suporte dos trilhos, excedendo a capacidade de resistência à tração do concreto, levando ao aparecimento de fissuras verticais, originadas de fraturas por tração na região central do dormente (Figura 11a), podendo se expandir e evoluir a uma condição crítica (Figura 11b).

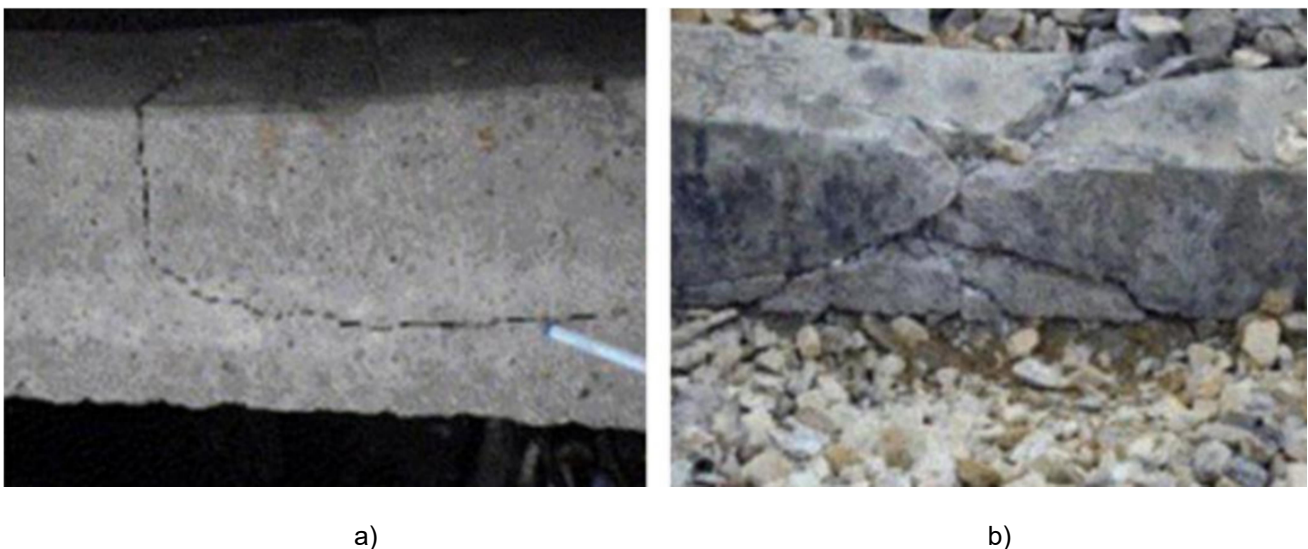


Figura 11 — Danos no dormente de concreto devido à fratura por tração
(Fonte: González et al, 2008)

6.3.2 Fissuras longitudinais

O surgimento de fissuras longitudinais é atribuído principalmente à elevada tensão de cisalhamento na margem do orifício do dispositivo de fixação do dormente. Sendo a máxima tensão de tração entre os dispositivos de fixação, um fator determinante para a fissuração longitudinal.

Um exemplo típico de fissuras longitudinais, atribuídas à localização do dispositivo de fixação (*rawlplug*) e às forças de protensão que geram tensões significativas ao redor do orifício do dispositivo na direção transversal, pode ser observado na Figura 12a. Ao longo da operação, fatores como congelamento de água e presença de detritos nos dispositivos de fixação podem intensificar a tensão transversal no dormente, resultando em trincas longitudinais adicionais (Figura 12b).



Figura 12 — Fissura longitudinal devido a tensão de tração entre dispositivos de fixação
(Fonte: Rezaie et al, 2012)

6.4 Fissuras verticais no meio do vão do dormente

Estes defeitos tendem a se originar na parte superior do dormente, progredindo verticalmente até a base à medida que o material se deteriora (Figura 13). É consequência de um momento de flexão negativo na região central do dormente. Esse fenômeno pode ser atribuído à combinação de forças dinâmicas intensas e a um suporte inadequado ao dormente, muitas vezes devido à condição comprometida ou ausência do lastro que deveria sustentá-lo.



Figura 13 — Dormentes fissurados no meio do vão
(Fonte: NTSB, 2014)

Em investigações sobre ferrovias que transportam cargas pesadas, foi observado que dormentes recém-instalados apresentavam rachaduras verticais na região central do vão.

Em alguns casos, essas rachaduras eram tão severas que levavam ao rompimento completo do dormente. Após uma análise detalhada, determinou-se que as principais razões para essas falhas eram o dimensionamento inadequado do dormente e irregularidades no sistema de lastro e sublastro. O lastro, em particular, não possuía a granulometria correta e uma capacidade de carga suficiente, falhando em sua principal função de sustentar adequadamente o dormente.

6.5 Trincas por flexão – Carregamento de alto impacto

Este tipo de patologia se encontra frequentemente na região central do vão do dormente e pode comprometer a rigidez flexural do dormente (Figura 14). Uma das causas predominantes para este fenômeno é a ação de cargas de roda esporádicas, porém, de alta intensidade e curta duração. Essas cargas são frequentemente originadas de irregularidades nas rodas ou trilhos, como rodas deformadas e trilhos desgastados.

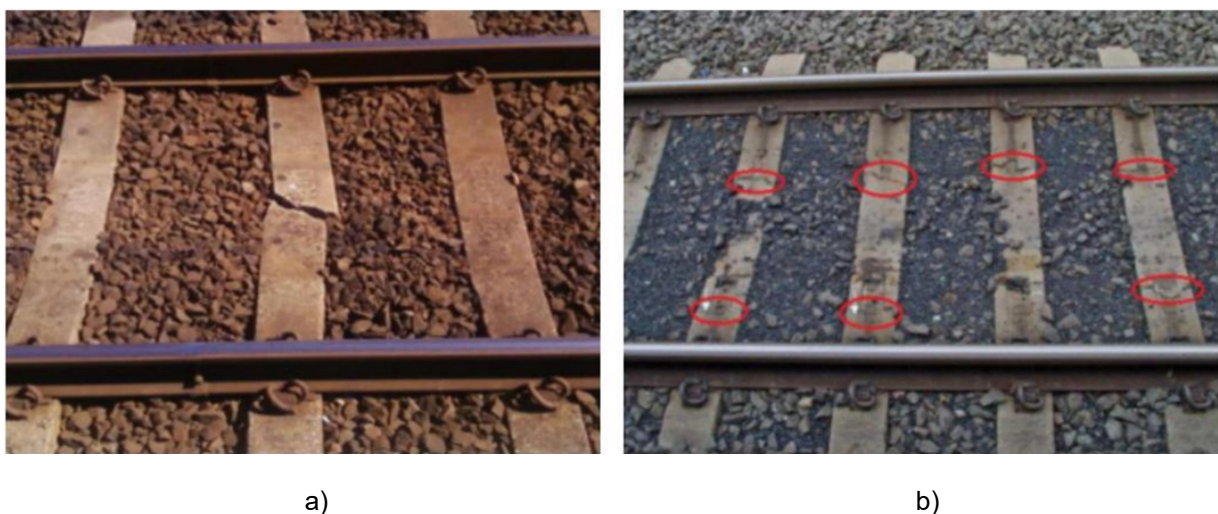


Figura 14 — Fissuras em dormentes de concreto devido à carga de impacto
(Fonte: Kaewunruen et al, 2008)

Vale destacar que as diretrizes de projeto atuais para dormentes de concreto protendido são focadas em condições de carga estática, não considerando adequadamente o impacto de cargas de alta intensidade. Investigações em campo, tanto em linhas de passageiros quanto em rotas de transporte de minérios, confirmam que o impacto é um fator significativo na formação de rachaduras nos dormentes.

6.6 Corrosão da armadura

A corrosão da armadura do dormente é causada principalmente pela deterioração do concreto, comprometendo a integridade e o desempenho do dormente (Figura 15).



Figura 15 — Ruptura do dormente de concreto como resultado da corrosão da armadura

(Fonte: Mohammadzadeh et al, 2011)

Alguns fatores que favorecem a deterioração da armadura:

- penetração de íons cloreto no concreto pode quebrar o filme protetor de óxido de ferro, levando à corrosão da armadura;
- presença de íons cloreto, identificada como o principal fator para a falha de um dormente devido à corrosão da armadura;
- a falha é mais provável de ocorrer no meio do dormente do que no assento do trilho;
- a presença de solo de granulometria fina na área do dormente pode ser indicativa de um ambiente adverso que favoreça a corrosão da armadura;
- umidade relativa de 30% ou mais pode proporcionar condições favoráveis para a corrosão da armadura no concreto; e
- a umidade e a chuva, ao longo do tempo, podem acelerar o processo de corrosão.

6.7 Desgaste aparente na superfície do dormente

6.7.1 O contato direto do dormente de concreto com a brita do lastro pode resultar em atrito, levando ao desgaste da superfície de ambos os materiais. Vale destacar que um desgaste intenso pode reduzir a seção transversal do dormente, arredondando suas extremidades, caracterizando o fenômeno da

abrasão do concreto. Este fenômeno pode comprometer a durabilidade e desempenho estrutural do dormente e gerar finos que contribuem para a contaminação do lastro ferroviário, conhecido como "colmatação do lastro", como pode ser observado na Figura 16.



Figura 16 — Desgaste superficial do dormente de concreto e lastro contaminado
(Fonte - Riding et al, 2018)

6.7.2 As principais causas identificadas para o desgaste superficial acelerado do dormente incluem:

- a) altas cargas de impacto recorrentes;
- b) falta de manutenção adequada da via permanente;
- c) ação da água; e
- d) qualidade inadequada do material do concreto.

6.7.3 Outros fatores que podem favorecer o desgaste superficial do dormente:

- a) a presença de água, especialmente em regiões de alta precipitação e com drenagem ineficiente, pode ampliar o desgaste do dormente; e
- b) a qualidade do concreto, especificamente a dureza dos agregados e da pasta de cimento, influencia diretamente na resistência à abrasão.

6.7.4 A abrasão superficial pode contribuir para o desgaste precoce do trilho e para o surgimento de trincas no dormente, comprometendo a segurança operacional da ferrovia.

6.7.5 Dormentes com desgaste significativo em sua superfície podem apresentar redução na capacidade de carga e aumento nas deformações de fluência e retração.

6.8 Formação de gelo no dormente

Embora no Brasil seja difícil que este fenômeno de formação de gelo aconteça, alguns aspectos de caráter geral devem ser mencionados:

- a) as falhas por este fenômeno são produzidas devido ao congelamento da água infiltrada nos dormentes e podem acontecer em aproximadamente um dormente a cada 300 m de trilhos;

- b) observações de campo indicam que normalmente se cria uma rachadura originada na parte inferior do dormente, próximo ao parafuso de fixação, desenvolvendo-se em uma forma cônica (Figura 17); e
- c) a formação de gelo pode gerar uma pressão de até 40 MPa, dentro do concreto do dormente.



Figura 17 — Fissura cônica devido à formação de gelo na via da laje
(Fonte – Zi et al, 2012)

6.9 Danos decorrentes de ciclos de congelamento e degelo

6.9.1 Aspectos de caráter geral

Em regiões de clima frio, onde as temperaturas do ar oscilam próximas de zero, os dormentes de concreto podem apresentar danos devido à ação dos ciclos de congelamento e degelo.

Esses danos incluem a formação de trincas estruturais e o lascamento do concreto, resultando em uma redução significativa da resistência à compressão e à tração do material devido à presença de microfissuras em sua matriz.

O efeito do congelamento e degelo nos dormentes de concreto também é identificado como uma das causas de deterioração na região de apoio dos trilhos. Nesse contexto, a falha ocorre quando uma quantidade significativa de água se acumula entre o concreto e a palmilha de suporte do trilho. Isso faz com que o concreto atinja a saturação crítica, levando à fissuração da pasta de cimento.

Em regiões de clima frio, os dormentes podem apresentar uma redução na resistência à compressão e um aumento nas deformações, devido à fluência e retração. Isso pode levar à fissuração e à redução da vida útil do dormente.

6.9.2 Medidas preventivas e corretivas

Para mitigar o problema de congelamento e degelo, pode-se utilizar aditivos incorporadores de ar, pois as pequenas bolhas de ar no concreto ajudam a aliviar a pressão hidráulica gerada pelo congelamento da água.

Durante a produção dos dormentes, é essencial garantir que a vibração do concreto não seja excessiva, evitando a redução do teor de ar na mistura.

Adicionalmente, a utilização de adições minerais, fibras e a produção de concretos hidrofóbicos são abordagens que podem aumentar a resistência do concreto aos ciclos de congelamento e degelo.

7 Patologias superficiais

7.1 Descoloração

A mudança de cor na superfície do dormente de concreto pode ser devido à exposição ao sol, à chuva ou à poluição. Embora possa afetar a aparência do dormente, a descoloração geralmente não compromete sua integridade estrutural.

7.2 Manchas

Manchas superficiais podem ocorrer devido a derramamentos de líquidos, acúmulo de sujeira ou deposição de sais. Essas manchas não afetam a funcionalidade do dormente e são consideradas problemas estéticos.

7.3 Pequenas imperfeições:

Imperfeições como bolhas de ar, pequenos orifícios ou irregularidades na superfície podem ocorrer durante o processo de fabricação. Esses problemas não têm impacto significativo na resistência e durabilidade do dormente e são considerados apenas estéticos.

8 Considerações gerais sobre reparo e manutenção de dormentes

O reparo e manutenção de dormentes de concreto são cruciais para garantir a segurança e a longevidade de vias férreas. Os dormentes de concreto, em comparação com os de madeira, tendem a ter uma vida útil mais longa e requerem menos manutenção. No entanto, eles não são imunes a danos, especialmente em condições adversas ou sob cargas pesadas. A seguir, se apresentam algumas práticas mundiais reconhecidas para o reparo de dormentes de concreto.

8.1 Inspeção regular

Antes de iniciar qualquer procedimento de reparo, é fundamental realizar inspeções regulares. As inspeções podem identificar rachaduras, desgaste ou outros danos nos dormentes.

Esta é a forma mais básica de inspeção e envolve avaliar visualmente os dormentes em busca de defeitos visíveis, como rachaduras, lascas, erosões ou desgastes.

Inspeções visuais frequentemente usam veículos de manutenção que percorrem os trilhos a velocidades reduzidas, permitindo que os inspetores verifiquem cada dormente.

Ferramentas como trenas e calibradores são frequentemente usadas para medir a integridade física e dimensional dos dormentes.

Estas medições ajudam a determinar se os dormentes estão se desgastando de forma uniforme e se estão dentro das especificações.

Uma técnica comum para detectar defeitos internos em dormentes de concreto é a inspeção ultrassônica ou acústica. Neste método, ondas sonoras são enviadas através do dormente e os ecos são analisados para detectar inconsistências internas, como bolhas ou rachaduras.

Equipamentos especializados, como o *Ground Penetrating Radar* (GPR) ou o *Ultrasonic Rail Flaw Detection Vehicle*, também são usados em algumas regiões.

Em alguns sistemas ferroviários avançados, sensores permanentes são instalados em seções críticas da via para monitorar constantemente a saúde dos dormentes. Estes sensores podem detectar alterações no alinhamento, carga ou outras propriedades físicas.

Câmeras termográficas são usadas para detectar variações de temperatura na superfície dos dormentes. Diferenças de temperatura podem indicar defeitos ou áreas comprometidas no material.

Alguns sistemas ferroviários usam veículos de inspeção especializados equipados com uma variedade de sensores para realizar inspeções automatizadas. Estes veículos podem cobrir longas distâncias rapidamente e são capazes de detectar uma ampla gama de defeitos.

Em áreas de particular preocupação ou após a detecção de potenciais defeitos, uma inspeção manual detalhada pode ser realizada. Isso geralmente envolve equipes de inspeção que verificam fisicamente os dormentes, frequentemente usando ferramentas ou equipamentos especializados.

A frequência da inspeção varia com base no volume de tráfego, idade da via, condições ambientais e histórico de problemas. Em áreas de alto tráfego ou sob condições adversas, as inspeções podem ser mais frequentes.

8.2 Limpeza

O primeiro passo no reparo é limpar o local danificado. Isso pode ser feito com escovas, ar comprimido ou jatos de água. É essencial remover quaisquer contaminações ou detritos antes do reparo.

Antes de iniciar a limpeza, realiza-se uma inspeção visual para identificar áreas que necessitam de atenção especial. Isso ajuda a determinar o tipo de limpeza necessária e os equipamentos a serem utilizados.

Inicia-se removendo detritos visíveis, como pedras, folhas, galhos e outros objetos maiores, usando ferramentas manuais, como pás ou escovas.

Utilizam-se escovas de cerdas duras para esfregar a superfície dos dormentes. Isso ajuda a soltar sujeiras incrustadas, musgos e outros detritos menores.

Uma técnica comum adotada é o uso de ar comprimido. Ao soprar ar sob alta pressão sobre os dormentes, a sujeira acumulada em pequenas fissuras e poros é efetivamente removida.

Outra técnica que pode ser adotada é o emprego de jatos de água sob pressão. A qual é particularmente eficaz na remoção de lamas e contaminação aderida. Para contaminações mais persistentes, a água pode ser misturada com detergentes apropriados.

Manchas de óleo, graxa ou outros contaminantes podem exigir tratamentos específicos. Nesses casos, podem ser necessários agentes de limpeza especializados. É crucial seguir as instruções do fabricante ao usar produtos químicos e garantir que eles não causem danos ao concreto ou ao meio ambiente.

Para contaminações mais pesadas ou acúmulos persistentes, utilizam-se ferramentas de raspagem ou equipamentos de jateamento abrasivo. Isso é feito com cuidado para evitar danificar o concreto.

Após a limpeza, deve-se permitir que os dormentes secassem completamente, especialmente se estiver

planejada a realização de reparos. A presença de umidade pode interferir na aderência de materiais de reparo.

Após a limpeza, deve ser realizada uma inspeção visual final para garantir que todos os detritos e contaminações tenham sido removidos e que os dormentes estejam em boas condições.

Deve-se garantir que todos os resíduos, especialmente se forem produtos químicos ou contaminantes, sejam descartados de forma adequada, conforme as regulamentações locais.

8.3 Preenchimento de rachaduras

Rachaduras pequenas podem ser preenchidas com adesivo epóxi ou materiais de reparo à base de cimento. Estes materiais são fortes e duráveis, proporcionando uma boa aderência ao concreto existente.

O preenchimento de rachaduras em dormentes de concreto é uma etapa crítica para manter a integridade da infraestrutura ferroviária. As rachaduras, se não tratadas, podem crescer e comprometer a capacidade do dormente de suportar as cargas, levando a falhas potencialmente perigosas. Para preenchimento de rachaduras de dormentes, merecem destaque os aspectos apresentados em 8.3.1 a 8.3.11.

8.3.1 Antes de qualquer trabalho de reparo, as rachaduras devem ser identificadas e avaliadas quanto à sua profundidade, largura e extensão. Esta etapa determina o método e os materiais a serem utilizados no reparo.

8.3.2 Toda a sujeira, detritos ou material solto deve ser removido da rachadura. Isso pode ser realizado usando-se escovas, ar comprimido ou aspiradores.

8.3.3 Em alguns casos, é necessário alargar a rachadura usando uma ferramenta como um cinzel para criar uma forma de "V", facilitando o preenchimento da rachadura.

8.3.4 O epóxi é comumente usado devido à sua força, aderência e capacidade de cura. O tipo de epóxi a ser escolhido depende das condições e do tipo de rachadura.

8.3.5 Muitos epóxios são fornecidos em duas partes que devem ser misturadas antes da aplicação. A mistura deve ser executada de acordo com as instruções do fabricante para garantir a proporção correta e a consistência adequada.

8.3.6 A aplicação do epóxi na rachadura deve ser realizada utilizando ferramentas apropriadas, como espátulas ou pistolas de calafetagem, assegurando-se de que preencha completamente o espaço. Em algumas situações, podem ser necessárias várias aplicações.

8.3.7 Uma vez que o epóxi tenha sido aplicado, ele deve ser nivelado com a superfície do dormente para garantir uma transição suave e evitar pontos altos ou irregulares.

8.3.8 O epóxi precisa de tempo para curar e alcançar sua força total. O tempo de cura varia de acordo com o produto específico e as condições ambientais. Durante esse período, a área reparada não deve ser submetida a cargas pesadas.

8.3.9 Após a cura, uma inspeção final é realizada para garantir que a rachadura tenha sido adequadamente preenchida e que o reparo seja durável.

8.3.10 Mesmo após o reparo, é essencial monitorar regularmente os dormentes para identificar e

abordar quaisquer novas rachaduras ou problemas.

8.3.11 A seleção do produto mais adequado depende das especificidades do projeto, das condições locais e das regulamentações locais. Sempre é recomendável consultar um especialista antes de escolher um produto.

8.4 Reparos estruturais

Para danos maiores, pode ser necessário remover e substituir parte do dormente de concreto. Nesses casos, o dormente danificado é removido e um novo é colocado em seu lugar.

Os reparos estruturais em dormentes de concreto vão além do simples preenchimento de rachaduras. Trata-se de medidas tomadas para restaurar a capacidade de carga do dormente ou para corrigir defeitos que possam comprometer sua integridade estrutural.

Dependendo da gravidade do dano, deve ser escolhido o método de reparo mais adequado. Isso pode incluir o reforço com materiais adicionais, o uso de resinas de alta resistência ou até mesmo a substituição completa do dormente. Em 8.5.1 a 8.5.9, são apresentados os métodos mais comuns para reparos estruturais em dormentes de concreto protendido.

8.4.1 Reparo com concreto ou morteiro

Este é um dos métodos mais comuns. Envolve a remoção do concreto deteriorado, a preparação da área (como a limpeza e a aplicação de um agente de ligação) e, em seguida, a aplicação de novo concreto ou morteiro.

8.4.2 Reforço com polímeros (como epóxi)

Conforme apresentado em 8.3.

8.4.3 Reforço externo

Este método envolve a adição de materiais externos, como chapas de aço, malhas metálicas ou fibras de carbono, ao concreto existente. Esses materiais são frequentemente colados ao concreto com resinas epóxi especiais.

8.4.4 Encapsulamento

Em situações em que o concreto esteja severamente deteriorado, ele pode ser encapsulado com uma nova camada de concreto ou outro material.

8.4.5 Reparo eletroquímico

Este método é usado principalmente para tratar a corrosão das armaduras em concreto armado. Inclui técnicas como a migração de íons e a re-alkalinização para restaurar o pH do concreto e proteger a armadura da corrosão.

8.4.6 Substituição completa

Em alguns casos, o dano ao concreto é tão severo que a melhor ação é remover e substituir o dormente danificado.

8.4.7 Reparo com compósitos de fibra de carbono

Os laminados ou tecidos de fibra de carbono impregnados com resina epóxi podem ser usados para envolver ou cobrir áreas danificadas, proporcionando reforço estrutural.

8.4.8 Reparo por jateamento

É um método utilizado para remover concreto deteriorado ou para preparar a superfície para outros métodos de reparo. O jateamento pode ser realizado com água, areia ou outros meios abrasivos.

8.4.9 Grout e ancoragem:

Grouts de alta resistência podem ser usados para preencher vazios ou reforçar áreas danificadas. Podem ser utilizadas ancoragens em conjunto com *grouts* ou outros métodos para proporcionar fixação adicional ou reforço.

8.5 Proteção contra a corrosão

Em áreas onde os dormentes estão sujeitos à corrosão, principalmente devido à água salgada ou a produtos químicos, pode ser útil aplicar revestimentos protetores ou usar aditivos de concreto que resistam à corrosão. Em 8.6.1 a 8.6.8 são apresentadas algumas técnicas de uso comum para proteger o concreto dos dormentes contra a corrosão.

8.5.1 Concreto de qualidade e recobrimento adequado

O uso de concreto de alta qualidade com baixa permeabilidade é vital para proteger a armadura de aço contra agentes corrosivos. É importante ressaltar que o concreto deve fornecer um recobrimento adequado do aço, pois, é essencial para fornecer uma barreira física contra a entrada de água e íons cloreto.

8.5.2 Inibidores de corrosão

São aditivos que podem ser incluídos na mistura do concreto. Eles funcionam formando uma camada protetora sobre a armadura ou alterando o ambiente químico dentro do concreto, tornando-o menos propício à corrosão.

8.5.3 Uso de aço inoxidável ou galvanizado

Em ambientes altamente corrosivos, como regiões costeiras, pode ser benéfico usar aço inoxidável ou galvanizado para a armadura dos dormentes, pois esses materiais têm uma resistência inerente à corrosão.

8.5.4 Proteção catódica

Embora mais comum em tubulações e estruturas submersas, a proteção catódica também pode ser uma opção para dormentes de concreto em ambientes particularmente agressivos. Envolve fazer da armadura do dormente o cátodo de uma célula eletroquímica, prevenindo a corrosão. Pode ser realizada no momento da fabricação do dormente, como medida preventiva, ou após a sua construção, como medida mitigadora da corrosão.

8.5.5 Revestimentos e membranas

Revestimentos impermeabilizantes ou membranas podem ser aplicados à superfície dos dormentes para reduzir a infiltração de água e agentes corrosivos.

8.5.6 Proteção durante a construção

Durante a construção e instalação dos dormentes, deve-se evitar o contato direto com solos agressivos ou água salgada, mediante medidas como, por exemplo, a colocação de uma camada de material isolante ou a utilização de barreiras geotêxteis.

8.5.7 Manutenção e inspeções regulares

Sempre deve-se implementar um programa de inspeção regular para verificar sinais de corrosão ou deterioração nos dormentes de concreto. A detecção precoce permite intervenções antes que o dano se torne extensivo. Destaca-se que é indispensável realizar uma verificação e seguimento do histórico dos registros das inspeções regulares, para verificar a evolução dos dormentes durante a sua operação.

8.5.8 Considerações especiais no desenho

Em áreas propensas à corrosão, como zonas costeiras, os dormentes podem ser projetados com características que minimizem o risco de corrosão, como um aumento no recobrimento do aço ou a inclusão de drenagem eficaz.

8.6 Considerações adicionais sobre reparos em dormentes

Algumas considerações adicionais sobre reparos em dormentes são apresentadas em 8.6.1 a 8.6.5.

8.6.1 Melhoria da drenagem

A má drenagem pode ser uma das causas de danos aos dormentes de concreto. Melhorar o sistema de drenagem ao redor dos trilhos pode ajudar a prolongar a vida útil dos dormentes.

8.6.2 Técnicas de reforço

Em alguns casos, pode ser benéfico reforçar os dormentes de concreto com materiais como fibras de carbono. Isso pode ser particularmente útil em áreas com cargas pesadas ou onde os dormentes são regularmente submetidos a estresses elevados.

8.6.3 Monitoramento contínuo

Após o reparo, é vital continuar monitorando os dormentes para garantir que os reparos sejam eficazes e que novos problemas não surjam. Na Seção 9 são descritos os principais métodos de monitoramento para detectar trincas e fissuras em dormentes de concreto.

8.6.4 Atualização tecnológica

Conforme a tecnologia avança, novos materiais e técnicas estarão disponíveis para o reparo de dormentes de concreto. Manter-se atualizado sobre esses avanços pode oferecer soluções mais eficazes e duradouras.

8.6.5 Treinamento e capacitação

É fundamental assegurar que o pessoal envolvido no reparo e manutenção dos dormentes de concreto esteja devidamente treinado para garantir que os reparos sejam realizados corretamente.

9 Detecção e monitoramento de trincas e fissuras

A identificação e monitoramento de fissuras e trincas nos dormentes de concreto é fundamental para garantir a segurança e durabilidade da infraestrutura da ferrovia. Algumas técnicas de inspeção e monitoramento estão descritas em 9.1 a 9.3.

9.1 Inspeção visual

A inspeção visual regular deve ser realizada por profissionais capacitados. É a forma mais simples e comum de detectar fissuras e trincas nos dormentes de concreto. Atualmente a inspeção visual pode ser realizada com o auxílio de filmagens e fotografias, as quais permitem caracterizar melhor qualquer trinca e fissura que for identificada no dormente.

Vale destacar que é indispensável realizar um registro detalhado da inspeção com dados como: data, funcionário que fez a inspeção, trecho, número do dormente, localização e características da trinca ou fissura, condições ambientais, registro fotográfico, entre outros.

A inspeção visual em dormentes de concreto é uma prática fundamental para identificar patologias e garantir a integridade da infraestrutura ferroviária. Além de realizar as inspeções em si, é crucial implementar ferramentas de gestão eficazes para otimizar essa atividade.

9.1.1 Gestão da inspeção visual

A gestão eficaz da inspeção visual em dormentes de concreto envolve planejamento cuidadoso e a aplicação de *checklists* específicos. Para otimizar essa atividade, é fundamental estabelecer um plano de inspeção que defina a frequência das vistorias, o escopo das verificações e os critérios de aceitação. Considerando a importância da detecção precoce de problemas, a possibilidade de vistorias trimestrais pode ser vantajosa, especialmente em regiões com condições ambientais desafiadoras.

9.1.2 Planejamento das vistorias

O planejamento das vistorias deve considerar fatores como a quilometragem da via, o histórico de problemas anteriores e as recomendações de órgãos reguladores. Além disso, é importante alocar recursos adequados, incluindo pessoal treinado e equipamentos de inspeção. A implementação de um sistema de gestão de ativos ferroviários pode ajudar a programar inspeções de forma eficiente, considerando a vida útil esperada dos dormentes e os padrões de manutenção.

9.1.3 Checklist para inspeção visual

A criação de *checklists* específicos é uma prática valiosa para garantir que todas as áreas críticas sejam abordadas durante as inspeções. Alguns dos pontos mais importantes a serem observados em um *checklist* podem incluir:

- a) estado geral do dormente: verificar se há rachaduras, fissuras ou desgaste excessivo;
- b) superfície superior: avaliar a presença de elementos estranhos, trincas ou deterioração do concreto;
- c) superfície inferior: observar a integridade das sapatas de fixação e a aderência do dormente ao lastro;
- d) sistema de fixação: verificar a condição dos parafusos, grampos e placas de fixação;
- e) presença de corrosão: avaliar se há sinais de corrosão nas armaduras de aço;

- f) alinhamento e nivelamento: verificar se o dormente está alinhado corretamente e nivelado;
- g) espaçamento entre dormentes: observar se há variações no espaçamento que possam indicar movimentação ou assentamento inadequado;
- h) drenagem: verificar se os sistemas de drenagem estão funcionando corretamente para evitar acúmulo de água; e
- i) danos causados por carga: procurar por evidências de danos causados por cargas pesadas ou acidentes.

A implementação de *checklists* estruturados e a padronização dos procedimentos de inspeção visual podem melhorar a consistência das vistorias e garantir que nenhum aspecto crítico seja negligenciado. Além disso, a documentação cuidadosa das observações feitas durante as inspeções é essencial para rastrear o estado dos dormentes ao longo do tempo e tomar decisões sobre a manutenção necessária.

9.2 Ultrassom

9.2.1 A técnica de ultrassom permite a detecção de fissuras e trincas internas no dormente de concreto, fornecendo informações mais detalhadas sobre a extensão e profundidade dos danos. É um método não destrutivo amplamente utilizado para a detecção de fissuras e defeitos em materiais sólidos, incluindo dormentes de concreto.

9.2.2 O ultrassom utiliza ondas sonoras de alta frequência que se propagam através do material e são refletidas ou refratadas por descontinuidades, como fissuras, vazios ou inclusões no interior do material. O princípio básico da técnica de ultrassom envolve a emissão de ondas ultrassônicas por um transdutor, que também funciona como receptor das ondas refletidas. As ondas ultrassônicas viajam através do dormente de concreto e são refletidas quando encontram uma descontinuidade, como uma fissura. A onda refletida é então captada pelo transdutor e convertida em um sinal elétrico. O tempo decorrido entre a emissão da onda e a recepção da onda refletida é medido e utilizado para determinar a localização e a profundidade da descontinuidade.

9.2.3 A técnica de ultrassom pode ser utilizada para inspecionar dormentes de concreto de várias maneiras:

- a) inspeção manual: neste método, um operador treinado utiliza um transdutor portátil que é colocado diretamente sobre a superfície do dormente de concreto. O operador move o transdutor ao longo da superfície do dormente, enquanto monitora um *display* que mostra a amplitude e o tempo de voo das ondas refletidas. A presença de fissuras ou outros defeitos é indicada por alterações na amplitude e no tempo de voo das ondas refletidas; e
- b) inspeção automatizada: sistemas de inspeção automatizados utilizam múltiplos transdutores montados em dispositivos de varredura ou veículos de inspeção ferroviária. Estes sistemas automatizados são capazes de inspecionar grandes áreas de dormentes de concreto de forma rápida e consistente, reduzindo a dependência da habilidade do operador e aumentando a eficiência do processo de inspeção.

9.2.4 A técnica de ultrassom tem várias vantagens para a inspeção de dormentes de concreto:

- a) técnica não destrutiva: é um método não destrutivo, o que significa que não causa danos ao dormente de concreto durante a inspeção. Isso permite que a inspeção seja realizada sem interrupção da operação ferroviária e sem a necessidade de remover os dormentes para inspeção;
- b) sensibilidade: a técnica de ultrassom é sensível a descontinuidades e defeitos de pequeno

tamanho e pode detectar fissuras e outros problemas em dormentes de concreto antes que se tornem críticos;

- c) profundidade de penetração: o ultrassom pode penetrar profundamente no concreto, permitindo a detecção de fissuras e defeitos em todo o volume do dormente, e não apenas na superfície; e
- d) repetibilidade e precisão: a técnica de ultrassom fornece resultados consistentes e precisos, especialmente quando utilizada em conjunto com sistemas de inspeção automatizados.

9.2.5 Apesar de suas vantagens, a técnica de ultrassom também apresenta algumas limitações na inspeção de dormentes de concreto:

- a) acoplamento: um bom acoplamento entre o transdutor e a superfície do dormente de concreto é essencial para obter resultados confiáveis. Superfícies irregulares ou ásperas podem dificultar o acoplamento e comprometer a qualidade dos resultados. Geralmente, utiliza-se um acoplante, como um gel, para melhorar o contato entre o transdutor e a superfície do dormente;
- b) interpretação dos dados: a interpretação dos dados de ultrassom pode ser complexa e requer um operador experiente ou um sistema automatizado de análise de dados. Descontinuidades naturais, como agregados no concreto ou variações na densidade, podem gerar sinais semelhantes aos de fissuras e defeitos, tornando a interpretação dos resultados um desafio;
- c) geometria complexa: a geometria complexa dos dormentes de concreto pode dificultar a inspeção por ultrassom, uma vez que a propagação das ondas ultrassônicas pode ser afetada por mudanças na espessura, curvaturas ou interfaces entre diferentes materiais; e
- d) presença de armaduras: as armaduras de aço nos dormentes de concreto podem dificultar a propagação das ondas ultrassônicas e gerar sinais de reflexão que podem ser confundidos com fissuras ou defeitos.

9.2.6 Apesar das limitações, a técnica de ultrassom é uma ferramenta valiosa na detecção de fissuras e outros defeitos em dormentes de concreto. O uso de ultrassom em combinação com outras técnicas de inspeção não destrutivas, como a termografia infravermelha ou a radiografia, pode aumentar a confiabilidade e a precisão dos resultados e ajudar a garantir a segurança e a durabilidade dos dormentes de concreto na infraestrutura ferroviária.

9.3 Ensaio de penetração de água

Este ensaio é realizado para verificar a permeabilidade do concreto e identificar a presença de fissuras e trincas.

10 Fatores para avaliação do descarte de dormente de concreto em ferrovias

Decidir se os dormentes de concreto devem ser descartados ou reparados pode depender de várias considerações. Em 10.1 a 10.7 se listam alguns fatores importantes a considerar.

10.1 Extensão dos danos: é provavelmente o fator mais importante, se os danos são extensos e irreparáveis, a substituição é geralmente a melhor opção.

10.2 Custo do reparo versus substituição: em alguns casos, pode ser mais barato substituir um dormente danificado do que repará-lo. Isso pode depender de vários fatores, incluindo a natureza dos danos e o custo dos materiais e mão de obra necessária para o reparo.

10.3 Impacto na segurança: se um dormente danificado representa um risco de segurança, deve ser substituído o mais rápido possível, independentemente do custo.

10.4 Disponibilidade de dormentes de substituição: se existir estoque suficiente de dormentes de substituição, pode ser mais fácil simplesmente substituir os danificados. No entanto, se os dormentes de substituição são escassos ou caros, pode valer a pena tentar reparar os danificados.

10.5 Impacto ambiental: o descarte de dormentes de concreto pode ter um impacto significativo no meio ambiente, pois eles podem levar centenas de anos para se decompor em um aterro. O descarte deve ser realizado em um local apropriado, em conformidade, no que couber com as disposições das Normas Ambientais e da Política Ambiental e Territorial da INFRA S.A., nas suas edições mais recentes. Deve-se atender também às legislações ambientais federal, estadual e/ou municipal, bem como às condicionantes do licenciamento aplicáveis à situação. Por outro lado, a produção de novos dormentes também tem um impacto ambiental. Portanto, pode ser útil considerar esses fatores ao tomar uma decisão.

10.6 Durabilidade do reparo: em alguns casos, um reparo pode ser apenas uma solução temporária, e o dormente pode precisar ser substituído em um futuro próximo. Nesses casos, pode ser mais eficiente em termos de custos substituir o dormente imediatamente.

10.7 Tempo e recursos disponíveis para reparo: se a equipe de manutenção estiver sobrecarregada, pode ser mais eficiente em termos de tempo simplesmente substituir o dormente danificado.

11 Consequências imediatas e futuras do não tratamento de patologias em dormentes de concreto.

O não tratamento das patologias nos dormentes de concreto pode levar a consequências graves, tanto a curto como em longo prazo. Algumas das potenciais consequências podem ser as apresentadas em 11.1 a 11.2.9.

11.1 Curto prazo

Riscos de segurança: a principal preocupação ao negligenciar patologias em dormentes de concreto é a segurança. Dormentes danificados podem causar descarrilamentos ou outros acidentes, colocando em risco vidas, propriedades e o meio ambiente.

Interrupções no serviço: o tráfego pode precisar ser interrompido para avaliações e reparos emergenciais, afetando a eficiência e a capacidade de carga da via.

Custos aumentados: reparos emergenciais geralmente são mais caros do que manutenções programadas ou prevenções.

Redução na qualidade do passeio: os impactos na operação, resultantes das falhas identificadas, exigirão que os trens reduzam a velocidade programada durante suas viagens, afetando diretamente o planejamento logístico do operador ferroviário.

Risco de descarrilamento: fissuras, deslocamentos ou desnivelamentos podem levar a uma situação de instabilidade da linha férrea, aumentando o risco de descarrilamento.

Maior necessidade de manutenção: patologias não tratadas geralmente pioram com o tempo, o que pode aumentar a necessidade e o custo da manutenção.

11.2 Longo prazo

Quando gestores e operadoras de infraestruturas ferroviárias negligenciam o tratamento de patologias em dormentes de concreto, diversas repercussões podem ocorrer em longo prazo.

Uma vez que um dormente se degrada além de certo ponto, reparos podem tornar-se inviáveis, sendo a substituição completa necessária. O custo de substituição não engloba apenas o preço do novo dormente, mas também os custos de mão de obra, interrupção do tráfego, e logística associada ao processo.

Dormentes com patologias podem necessitar de manutenções corretivas com frequência. Ainda que cada intervenção possa ter um custo individual relativamente baixo, ao longo do tempo, a frequência dessas intervenções pode resultar em custos acumulados significativos.

Dormentes defeituosos podem causar desalinhamento dos trilhos, pressões desiguais no lastro e problemas na fixação. Estes problemas, por sua vez, podem acelerar o desgaste de trilhos, fixadores e até do próprio lastro, levando a um aumento na frequência e no custo das manutenções desses componentes.

Patologias em dormentes podem exigir interrupções no serviço para que sejam feitos reparos ou substituições. Estas interrupções podem acarretar atrasos, multas contratuais, perda de receitas e, em alguns casos, compensações aos usuários.

Dormentes danificados elevam o risco de falhas na via e de potenciais descarrilamentos. Além dos riscos à segurança e dos custos humanos, os custos financeiros associados a acidentes podem ser muito altos, abrangendo danos à infraestrutura, indenizações, reparos emergenciais e danos à reputação da operadora.

Uma vida útil reduzida da infraestrutura resulta em necessidades mais frequentes de investimentos de capital para renovação. Em vez de realizar investimentos em intervalos mais longos, a organização pode encontrar-se na posição de precisar de infusões regulares de capital para manter a via em operação.

Uma infraestrutura ferroviária mal mantida pode ser vista como um ativo desvalorizado, afetando negativamente o valor de uma empresa ou organização no mercado.

Embora o investimento inicial em manutenção proativa e tratamento de patologias possa parecer oneroso, ele é frequentemente justificado pelos custos financeiros potencialmente elevados a longo prazo associados à negligência desses problemas. Uma abordagem proativa não apenas mantém a infraestrutura em bom estado, mas também maximiza sua vida útil e minimiza interrupções, proporcionando uma operação mais eficiente e rentável.

Bibliografia

- [1] AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (AREMA). **AREMA Manual of Railway Engineering**. 2022.
- [2] FERDUS, W; MANALO, A. Failures of Mainline Railway Sleepers and Suggested Remedies - Review of Current Practice. **Engineering Failure Analysis**, Australia v. 44, 2014.
- [3] FOURNIER B, BÉRUBÉ MA, THOMAS MDA, SMAOUI N, FOLLIARD KJ. Evaluation and management of concrete structures affected by alkali–silica reaction – a review. In: **Seventh CANMET/ACI international conference on recent advances in concrete technology**. Farmington Hills, Michigan; 2004.
- [4] GONZÁLEZ-NICIEZA C, ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ MI, MENÉNDEZ-DÍAZ A, ÁLVAREZ-VIGIL AE, ARIZNAVARRETA-FERNÁNDEZ F. Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks. **Eng Failure Anal** 2008; 15:90–117.
- [5] GOWRIPALAN, N; CAO, J. 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 Sydney p, 2019. p. 3088-3099.
- [6] KAEWUNRUEN S; REMENNIKOV AM. Effect of a large asymmetrical wheel burden on flexural response and failure of railway concrete sleepers in track systems. **Eng Failure Anal** 2008; 15:1065–75.
- [7] KAEWUNRUEN S; REMENNIKOV AM. Dynamic flexural influence on a railway concrete sleeper in track system due to a single wheel impact. **Eng Failure Anal** 2009; 16:705–12.
- [8] MOHAMMADZADEH S; VAHABI E. Time-dependent reliability analysis of B70 pre-stressed concrete sleeper subject to deterioration. **Eng Failure Anal** 2011; 18:421–32.
- [9] MORRIS A; BLAND S; MONDAY I. Bureau of Industry Economics. Rail freight 1995: **international benchmarking Canberra**, Australia; 1995.
- [10] MURRAY M; CAI Z. **Australasian Railway Association, Inc**. Prestressed concrete sleepers – literature review. December 1998.
- [11] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD (NTSB). **Railroad Accident Brief - Amtrak passenger train derailment**. Washington, D.C. DOI: 10.5749/j.ctvthhd 37.29.
- [12] PETERS N; MATTSON SR. CN 60E Concrete tie development. In: **AREMA conference proc**. Landover, Maryland; 2004.
- [13] QIAO P; DAVALOS JF; ZIPFEL MG. Modeling and optimal design of composite-reinforced wood railroad crosstie. **Compos Struct** 1998; 41:87–96.
- [14] QINHUA J; MIN D; SUFEN H. Investigation of deteriorated concrete railway ties. **Cem Concr Res**

1996; 26:999–1006.

- [15] REZAIE F; SHIRI MR; FARNAM SM. Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre-stressed concrete sleepers. **Eng Failure Anal** 2012; 26:21–30.
- [16] REZAIE F; SHIRI MR; FARNAM SM. Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre-stressed concrete sleepers. **Eng Failure Anal** 2012; 26:21–30.
- [17] RIDING, K A; PETERMAN, R J.; GUTHRIE, S; BRUESEKE, M; MOSAVI, H; DAILY, K; RISOVHENDRICKSON, W. 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.
- [18] 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.
- [19] SILVA, A. S; SALTA, M.; JORGE, M. E. MELO; RODRIGUES, M. P.; CRISTINO, A. F.; GRANDE, C. 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.
- [20] SUNDARAM, R; MATSUMOTO, K; NAGAI, K; AWASTHI, A. 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.
- [21] TAHERINEZHAD, J; SOFI, M; MENDIS, P A; NGO, T A. Review of behavior of prestressed concrete sleepers. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 13, n. 1, p.1-16, 2013.
- [22] ZEMAN, J C; EDWARDS, J R; LANGE, D A; BARKAN, C P L. Investigation of potential concrete tie rail seat deterioration mechanisms: cavitation erosion and hydraulic pressure cracking. **Transportation Research Board 89th Annual Meeting**; 2009.
- [21] ZI, G; MOON, DY; LEE, S-J; JANG, SY, YANG, SC; KIM, S-S. Investigation of a concrete railway sleeper failed by ice expansion. **Eng Failure Anal** 2012; 26:151–63.