

**ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres**  
**RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico**

## **PLANO DE TRABALHO**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE DORMENTES DE  
CONCRETO COM FOCO NA GESTÃO DE RISCO E VIDA ÚTIL**

*TEMAS PRIORITÁRIOS:*

***PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA AUMENTO DA  
SEGURANÇA FERROVIÁRIA, COM FOCO PRINCIPAL EM PASSAGENS DE NÍVEL  
E LOCAIS CRÍTICOS;***

***OPERAÇÃO E INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA SUSTENTÁVEIS, COM FOCO  
PRINCIPAL NA DESCARBONIZAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA, NAS  
SOLUÇÕES BIODEGRADÁVEIS E DE MATERIAIS RECICLADOS, ASSIM COMO  
NA RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA;***

***APRIMORAMENTO DA MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA, INCLUSIVE COM A  
INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL.***

VALE S.A. – Estrada de Ferro Carajás

17/06/2025

## **Sumário**

1.	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	3
1.1.	Título .....	3
1.2.	Objetivos.....	3
1.2.1.	Objetivo Geral .....	3
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	3
2.	JUSTIFICATIVA .....	4
3.	METODOLOGIA.....	9
3.1.	Métodos e técnicas utilizadas .....	9
3.2.	Etapas .....	10
4.	PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL .....	29
5.	LOCAL DE EXECUÇÃO.....	30
6.	ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA .....	30
6.1.	Identificação de entidade .....	30
6.2.	Identificação da equipe executora .....	31
7.	PRODUTOS .....	32
8.	BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS E NORMATIVOS APLICÁVEIS .....	32
9.	ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO.....	37

## **1. DESCRIÇÃO DO PROJETO**

### **1.1. Título**

Metodologia para avaliação estrutural de dormentes de concreto com foco na gestão de risco e vida útil.

#### **1.1.1 - Linha de inovação e desenvolvimento**

Em consonância com a Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, este projeto se enquadra prioritariamente na diretriz descrita nos incisos I, II, IV e V do artigo 3º, que estabelece como objetivo a "modernização da infraestrutura integrante do Subsistema Ferroviário Federal", a "melhoria da qualidade dos serviços objeto da concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas" o "desenvolvimento de novos centros de pesquisas tecnológicas na área ferroviária" e a "melhoria da infraestrutura laboratorial das instituições de ensino técnico e superior, com foco ferroviário, cujo laboratório esteja vinculado a projetos de pesquisa em ferrovias".

Também em consonância com a Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, este projeto possui como objetivo a inovação no desenvolvimento de estruturação de centros de pesquisas tecnológicos na área ferroviária, conforme descrito nos incisos I, II, III, VII e VIII do artigo 4º, que prevê "métodos e técnicas construtivas", "tecnologia básica e aplicada", "soluções técnicas para problemas específicos", "estruturação de centros de pesquisas tecnológicos na área ferroviária" e "formação e aperfeiçoamento profissional".

#### **1.1.2 - Temas**

Dormente, concreto, comportamento estrutural, mecanismos expansivos.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo Geral**

Desenvolver metodologia para realizar a avaliação estrutural de dormentes de concreto utilizando técnicas inovadoras quanto à resposta estrutural, incluindo mecanismos expansivos, a fim de gerar conhecimento para atualizar normas e procedimentos para projeto, fabricação e manutenção dos dormentes de concreto no Brasil, com foco na vida útil de projeto.

#### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Produzir em laboratório, ou sob condições controladas, dormentes de concreto cujas características químicas, físicas e mecânicas sejam conhecidas para elaboração da metodologia;
- Gerar e monitorar em laboratório mecanismos expansivos em dormentes de concreto protendido em escala real e corpos de prova;
- Realizar ensaios estáticos e dinâmicos em dormentes de concreto simulando várias ações de serviço não previstas durante o uso;

- Obter dados experimentais (ensaios estáticos e dinâmicos) do comportamento de dormentes com níveis distintos de danos estruturais;
- Estudar os efeitos dos mecanismos expansivos e ações de serviço não previstas na resposta estrutural e vida útil do dormente de concreto;
- Desenvolver, com base nos dados experimentais, modelagem numérica dos dormentes em distintas condições de laboratório e em campo;
- Elaborar e disseminar para o meio ferroviário o conhecimento adquirido na pesquisa por meio vídeos e demais materiais informacionais;
- Elaborar e disseminar para o meio ferroviário o conhecimento adquirido na pesquisa por meio de, no mínimo, 1 workshop e 1 minicurso;
- Propor metodologia de aplicação prática na fabricação e manutenção de dormentes de concreto para as ferrovias brasileiras, considerando danos oriundos de patologias e uso.

## 2. JUSTIFICATIVA

O presente projeto foi elaborado em consonância com o disposto no inciso I, do artigo 8º, da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023 e não se destinam ao cumprimento das obrigações contratuais regulares atribuídas à concessionária. O objetivo primordial reside no desenvolvimento e implementação de estudos, bem como de soluções tecnológicas e/ou inovadoras, direcionadas para atender às demandas do setor ferroviário, proporcionando, assim, suporte técnico e científico que favoreça o aprimoramento do posicionamento estratégico e competitivo do setor logístico ferroviário. Além disso, busca-se agregar valor à comunidade e à gestão pública vinculada ao setor, por meio de iniciativas inovadoras e proativas, com foco na modernização e na sustentabilidade das ferrovias. Sendo assim, o projeto visa contribuir, de maneira efetiva, para o progresso e a evolução contínua do sistema ferroviário, alinhando-se aos melhores interesses do setor e da sociedade como um todo.

O uso de dormentes de concreto nas ferrovias brasileiras começou por volta de 1960, intensificando-se a partir da década de 90 com a construção da FERRONORTE, seguida por outras ferrovias, como a Estrada de Ferro Carajás, a Ferrovia Norte-Sul, a RUMO e a Ferrovia de Integração Oeste-Leste. Neste contexto, nota-se que os dormentes de concreto fabricados no Brasil apresentam anomalias que comprometem sua vida útil estimada e podem ocasionar ocorrências ferroviárias. Problemas semelhantes estão sendo observados atualmente em ferrovias consideradas referência mundial, como a Deutsche Bahn, na Alemanha, onde foram identificadas falhas nas propriedades do material, atribuídas ao fabricante. Como consequência, a Deutsche Bahn impôs restrições de velocidade, desviou trens e interditou trechos de ferrovia temporariamente. Essas falhas afetam principalmente regiões como a Baviera e a Saxônia. A substituição dos dormentes está em andamento, mas a conclusão deve ocorrer em 2024. A DB estima danos financeiros significativos e estuda ações legais contra o fabricante.

Os dormentes que apresentam anomalias oriundas de mecanismos patológicos, como a expansão do concreto, ou que sofrem uso inadequado, provocando fissuras do tipo center bound, podem ocasionar desde restrições de velocidade dos trens até ocorrências ferroviárias graves, como o tombamento de trens e a perda de carga transportada, comprometendo, assim, a vida útil estimada em projeto. As normas técnicas internacionais e brasileiras sobre o projeto, bem como a fabricação e a manutenção de dormentes de concreto possuem lacunas em relação à identificação e ao tratamento das

diversas anomalias encontradas atualmente em dormentes instalados em algumas ferrovias brasileiras.

Em consonância com a Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, este projeto se enquadra prioritariamente na diretriz descrita nos incisos I, II, IV e V do artigo 3º, que estabelece como objetivo a "modernização da infraestrutura integrante do Subsistema Ferroviário Federal", a "melhoria da qualidade dos serviços objeto da concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas", o "desenvolvimento de novos centros de pesquisas tecnológicas na área ferroviária" e a "melhoria da infraestrutura laboratorial das instituições de ensino técnico e superior, com foco ferroviário, cujo laboratório esteja vinculado a projetos de pesquisa em ferrovias". Tal enquadramento leva em consideração que os ensaios laboratoriais propostos envolvem a produção e avaliação de dormentes de concreto protendido com diferentes níveis de degradação, sob condições de controle de expansão do concreto ensaiados isoladamente (apenas dormentes) e aplicados em simulador de via, dentro de condições laboratoriais (dormente, lastro e sublastro) que simulam condições mais próximas da realidade de campo. Após esta etapa os dormentes serão aplicados em via férrea para avaliação e monitoramento. Ao longo destas fases serão executadas a calibração de modelos numéricos e esse avanço tecnológico permitirá não apenas a obtenção de dados experimentais precisos, mas, também, aprimorará a infraestrutura laboratorial da instituição, tornando-a um centro de referência em pesquisa ferroviária. Dessa forma, o projeto contribui diretamente para o aprimoramento da capacidade técnica já existente nas instituições envolvidas, alinhando-se ao objetivo da Resolução que diz respeito a promover o desenvolvimento laboratorial focado na área ferroviária.

Também em consonância com a Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, este projeto possui como objetivo a inovação no desenvolvimento de estruturação de centros de pesquisas tecnológicos na área ferroviária, conforme descrito nos incisos I, II, III, VII e VIII do artigo 4º, que prevê "métodos e técnicas construtivas", "tecnologia básica e aplicada", "soluções técnicas para problemas específicos", "estruturação de centros de pesquisas tecnológicos na área ferroviária" e "formação e aperfeiçoamento profissional", pois propõe uma abordagem inédita para a avaliação da integridade estrutural de dormentes ferroviários com vistas a transferência de tecnologias por meio, por exemplo, de capacitações técnicas. Além disso, por meio da correlação entre a degradação do material concreto e o comportamento estrutural dos dormentes, sob diversas condições de carregamento, buscar-se-á criar uma ferramenta de inspeção preditiva, que auxiliará na tomada de decisões acerca dos períodos ideais para substituição dos dormentes, com base em dados reais e simulações numéricas. Assim, esse projeto visa não só melhorar a segurança e a eficiência operacional das vias férreas, mas, também, impulsionar a inovação tecnológica no setor ferroviário, consolidando o Brasil como um importante polo de pesquisa e desenvolvimento nessa área.

Trata-se, também, de projeto que, ao propor avaliação de durabilidade dos dormentes conjuntamente com formas de inspeção e monitoramento da via, dialoga com temas prioritários definidos na Deliberação No 169, de 27 de junho de 2024, anexo I nos itens 4, 8 e 9.

Item	Contribuições do projeto
04	Avaliação experimental e numéricas do impacto do surgimento de mecanismos expansivos nos dormentes de concreto, que permitem uma maior previsibilidade

	das perdas de capacidade de suporte dos dormentes, aumentando assim a segurança da via.
08	Soluções que envolvam melhoras na durabilidade dos dormentes e/ou o uso de materiais de coprodutos que impactam diretamente e contribuem para a descarbonização da cadeia produtiva.
09	Conhecimento dos parâmetros de projetos afetados pelo dano gerado em dormentes, que permite a melhoria da manutenção e dos documentos técnicos e norteiam a confecção de novos projetos de dormentes.

Considerando o exposto, e conforme informado anteriormente, o projeto tem como objetivo (1) produzir dormentes de concreto em laboratório com propriedades físicas, químicas e mecânicas controladas e (2) monitorar mecanismos expansivos em condições reais e em corpos de prova. Além disso, visa (3) realizar ensaios estáticos e dinâmicos para simular condições críticas de uso e (4) obter dados experimentais sobre o comportamento dos dormentes com diferentes níveis de dano. Também pretende (5) estudar os efeitos dos mecanismos patológicos na resposta estrutural e na vida útil dos dormentes, (6) desenvolver modelagens numéricas para diversas situações e (7) disseminar o conhecimento por meio de vídeos e materiais informativos, além de (8) promover workshops e minicursos e (9) propor uma metodologia prática para procedimentos para projeto, fabricação brasileiras.

Este projeto contribui diretamente para o setor ferroviário ao possibilitar uma melhor gestão e otimização dos processos de manutenção dos dormentes, o que reduz o tempo de paralisação das vias, impactando positivamente na eficiência operacional. Para a gestão da ferrovia, isso significa ganhos em termos de segurança operacional, redução de custos e aprimoramento do planejamento de manutenção. Para a União, por sua vez, o projeto promove a melhoria da infraestrutura ferroviária, fundamental para o desenvolvimento econômico e logístico do país. Para os usuários do sistema, uma maior segurança e confiabilidade das operações resultam em menos interrupções e atrasos no transporte de cargas. E, por último, para a sociedade civil, o projeto oferece avanços em ciência e tecnologia, que poderão ser aplicados em outras áreas da engenharia civil e de transportes, além de contribuir para a geração de conhecimento e desenvolvimento de tecnologias de ponta no Brasil.

Por se tratar de um projeto inovador, é imprescindível conhecer o estado da arte associado à avaliação estrutural de dormentes de concreto utilizando técnicas inovadoras quanto à resposta estrutural, incluindo mecanismos expansivos, bem como, submeter o desenvolvimento que será realizado às análises e comentários de especialistas sobre o assunto. Assim, é extremamente importante que os membros da equipe possam participar de eventos especializados na área, como congressos, simpósios, feiras e outros, além de realizar visitas técnicas a centros e referências e para prospecção de novas tecnologias. Tal participação pode ocorrer visando a divulgação do trabalho realizado no projeto, com a proposição de artigos científicos e tecnológicos, mas também e visitá-los, para conhecer seus laboratórios, testes sites em campo e técnicas utilizadas para entender e solucionar problemas em dormentes de concreto, para posterior replicação no Brasil.

No cronograma físico financeiro estão apresentados alguns eventos recorrentes no meio ferroviário e de pesquisas em estruturas de concreto armado, ressalta-se, contudo que a depender dos resultados da pesquisa a lista poderá sofrer alterações. Os dados desta etapa serão demonstrados nos Relatórios de prestação de contas.

<b>Eventos internacionais de interesse/interface com o projeto:</b>	
1	Heavy Haul Conferente: Reúne especialistas em transporte ferroviário de cargas pesadas, permitindo compreender as exigências operacionais e os impactos estruturais nos dormentes de concreto.
2	International Conference on Experimental Vibration Analysis of Civil Engineering Structures: Apresenta avanços na análise de vibrações, essenciais para avaliar a integridade estrutural de dormentes sob cargas dinâmicas.
3	IALCCE –International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering: Explora análises de ciclo de vida e durabilidade de estruturas, diretamente ligadas à longevidade dos dormentes.
4	ACI – American Concrete Institute: Referência global em pesquisa e normatização para concreto, com aplicações práticas em dormentes.
5	World of concrete: Principal evento sobre concreto, trazendo novidades em materiais e tecnologias relevantes para dormentes.
6	ICCRRR 2024 - International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting: Focado em reparo e reabilitação, essencial para estudos sobre dormentes em fim de vida útil.
7	ACI (American Concrete Institute) - Concrete Convention : Aborda os últimos avanços em normas e práticas para concreto, incluindo infraestrutura ferroviária.
8	International Conference on Concrete Repair, Durability and Technology: Discussões sobre durabilidade e reparo, cruciais para dormentes deteriorados.
9	International Conference on Civil Engineering, Infrastructure and Environment – (RILEM): Eventos da RILEM incluem temas de durabilidade e sustentabilidade, essenciais para dormentes.
10	ICAAR - International Conference on Alkali-Concrete Reaction: Relevante para entender reações deletérias como RAA em dormentes de concreto.
11	International Conference on Durability of Concrete Structures (ICDCS): Aborda durabilidade de concreto, tema essencial para dormentes.
12	DSCS - International workshop on durability and sustainability of concrete structures: Traz novas perspectivas em durabilidade, com aplicação em dormentes ferroviários.

<b>Eventos nacionais de interesse/interface com o projeto:</b>	
1	IBRACON – Congresso Brasileiro do Concreto: Principal evento nacional sobre concreto, abrangendo pesquisa, tecnologia e aplicações práticas, incluindo infraestrutura ferroviária e dormentes de concreto.
2	Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural: Evento regional que promove a troca de conhecimento sobre estruturas de concreto, com foco em durabilidade e desempenho.

3	Congresso Brasileiro de Engenharia e Tecnologia Ferroviária (CBETF) : Evento especializado na engenharia ferroviária nacional, abordando tecnologias e desafios na aplicação de dormentes de concreto.
<b>Visitas Técnicas de interesse/interface com o projeto:</b>	
1	Centro de Pesquisa de Tecnologias Ferroviárias (CITEF) – Madrid/Espanha: Instituição de referência na Europa para tecnologias ferroviárias, oferece laboratórios avançados para o estudo de desempenho e durabilidade de dormentes.
2	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) - Madri/Espanha: Especializado em infraestrutura de transporte, fornece suporte técnico e pesquisas sobre materiais estruturais, incluindo concreto.
3	Centro de Pesquisa e Educação Ferroviária de Birmingham (BCRRE): Líder mundial em pesquisa ferroviária, oferece insights sobre inovação e manutenção de infraestruturas ferroviárias, com foco em dormentes.
4	Rail Transportation and Engineering Center (RailTEC): Reconhecido pela pesquisa avançada em engenharia ferroviária, com projetos aplicáveis ao desempenho estrutural e segurança de dormentes de concreto.
5	Université Gustave Eiffel: Centro de excelência em durabilidade de materiais e avaliação de infraestrutura, com abordagens inovadoras para o estudo de dormentes de concreto.
6	Transportation Technology Center (TTC)/Federal Railroad Administration US Department of Transportation: Instalação de classe mundial para testes e validação de sistemas ferroviários, com estudos aplicados à resistência e vida útil de dormentes.
7	Railway Engineering Research Institute (RRI)/ China Academy of Railway Sciences (CARS): Instituição líder em pesquisa ferroviária na China, com foco em novas tecnologias e materiais para melhorar a eficiência e durabilidade dos dormentes.
9	Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Porto e do Instituto Politécnico do Porto, em Porto – Portugal: Centros de pesquisa de destaque em concreto estrutural e durabilidade, relevantes para estudos de deterioração e reabilitação de dormentes.

A lista acima de eventos e visitas é uma representação de possibilidades compatíveis com o objeto do projeto, sendo que a participação dependerá da evolução da pesquisa e/ou aprovação de artigos. Tais eventos e visitas estarão limitados ao orçamento definido no cronograma físico-financeiro deste projeto. Não haverá remanejamento de orçamento entre viagens nacionais e internacionais. As alterações do escopo das viagens serão previamente justificadas e submetidas à aprovação pela concessionária com base na resolução nº 6.021.

Por fim, fica latente que este projeto atende ao tema prioritário de inovação tecnológica e será executado em 48 meses, conforme descrito no cronograma físico-financeiro anexo. Ao final, espera-se alcançar uma ferramenta de inspeção que otimize a manutenção de dormentes, gerar relatórios técnicos detalhados, desenvolver modelos numéricos preditivos e adquirir equipamentos laboratoriais específicos para a realização dos ensaios.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Métodos e técnicas utilizadas

O desenvolvimento do projeto terá como principais desafios: contribuir com o estado da arte sobre dormentes de concreto protendido e suas manifestações patológicas, seguido da produção de dormentes com e sem danos incorporando areia de rejeito de mineração, além de simulações numéricas e experimentais em laboratório. Para tanto, pretende-se utilizar dormentes de concreto instalados em simulador e visitá-los, para conhecer seus laboratórios, testes sites em campo e técnicas utilizadas para entender e solucionar problemas em dormentes de concreto, para posterior replicação no Brasil. como posicionados *in situ*. Esses dados serão base para calibrar o modelo numérico sobre o tema, além de embasarem a transferência de tecnologia e conhecimentos obtidos.

Na primeira etapa deste trabalho serão realizados os levantamento e atividades ligados ao estado da arte. A segunda etapa seguirá em paralelo com a primeira e consiste na adequação e melhoria da infraestrutura . necessária para a pesquisa, na qual está prevista a construção de galpão com hall tecnológico. Na nova edificação serão instalados os equipamentos descritos na atividade 2, para os ensaios experimentais de dormentes de concreto protendido estáticos e dinâmicos, conforme os ensaios citados nas normas da ABNT 11709 (2015) e da AREMA Capítulo 30. Os equipamentos a serem adquiridos são de suma importância para a montagem da infraestrutura e desenvolvimento do projeto.

Na terceira etapa serão produzidos dormentes de concreto protendido, utilizando areia proveniente de coprodutos de mineração, com e sem danos ocasionados por mecanismos expansivos. A concretização dessa etapa será possível devido a infraestrutura já existente na Universidade Federal de Uberlândia, com equipamentos como: o pórtico de protensão para a produção de dormentes, câmara e tanque de tratamento térmico, com temperatura e umidade controlada, possibilitando a indução e aceleração de danos por mecanismos expansivos como formação de etringita tardia (DEF) ou reação álcali agregado (RAA).

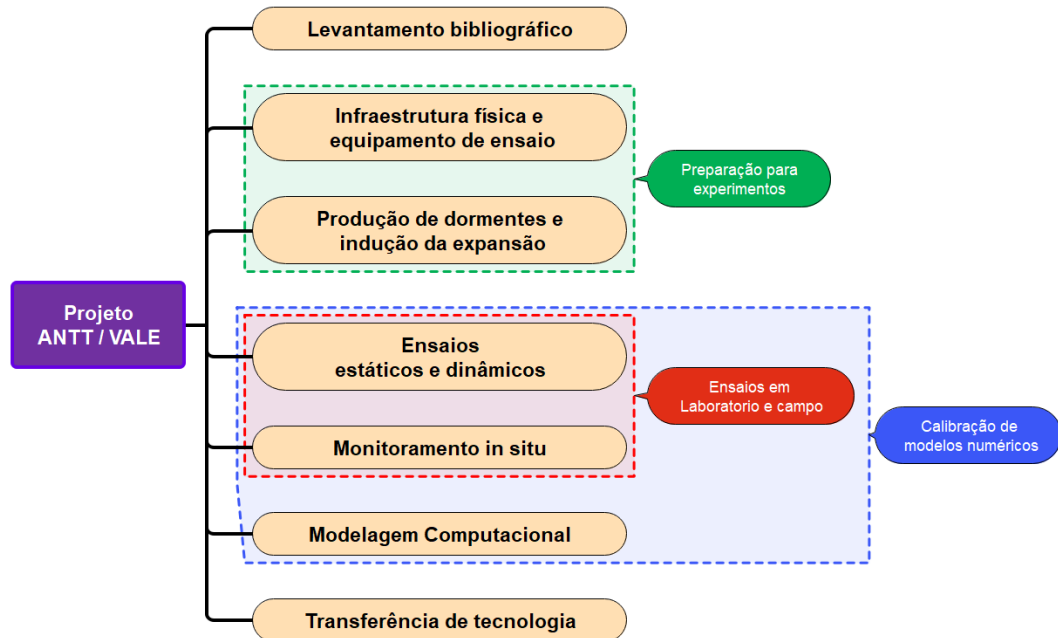
Na quarta etapa serão realizados os ensaios estáticos e dinâmicos em dormentes produzidos em laboratório, com distintos níveis de dano. Estes ensaios serão realizados em escala real de dormentes com distintas condições de suporte e carregamento, isto é, o elemento dormente isolado e, também, em simulador de via, com intuito de obter-se as correlações entre resultados caso existam. Nesta etapa será realizada também a análise modal nos dormentes isolados e em via, além de ensaios não destrutivos.

Na quinta etapa será realizado o monitoramento dos dormentes de concreto *in situ* empregando uma rede de sensores de aceleração e deformação, permitindo assim a avaliação de forma mais confiável do comportamento estrutural. Uma vez instalados os sensores e os sistemas de aquisição, é possível o acompanhamento contínuo dos dormentes por um período de interesse. Com os dados obtidos será possível a aferição e calibração do modelo numérico assim como a simulação de várias combinações de carregamento que serão realizados na sexta etapa desta proposta.

A transferência de tecnologia e disseminação dos conhecimentos especializados obtidos, acontecem de maneira distribuída em todas as etapas, seja como subatividades ou ações inseridas nestas. De forma simultâneas ou relacionadas com outras etapas, a transferência envolve encontros, capacitação de operadores do sistema ferroviários e pesquisadores envolvidos com o assunto. Por outro lado, o compartilhamento com a comunidade técnica, científica. Junto à sociedade civil tal transferência ocorrerá por diferentes meios, desde reuniões, congressos, visitas técnicas, além do uso de tecnologias audiovisuais

(como vídeos) para formação técnica e que abordarão as diversas patologias inerentes a vida útil de dormentes de concreto protendido.

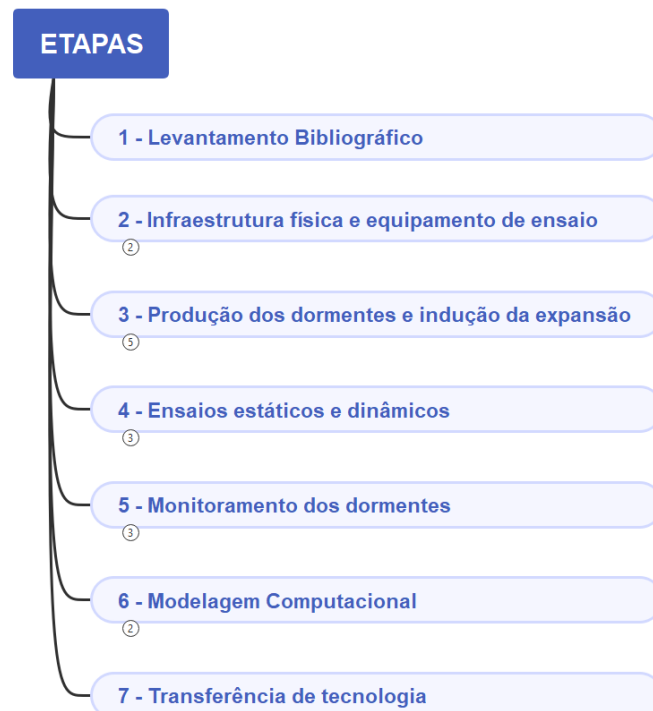
Figura 1: Planejamento do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2. Etapas

Figura 2: - Síntese das Etapas



Fonte: Elaborado pelo autor

## Etapa 1 - Levantamento bibliográfico

Essa etapa consiste em desenvolver um levantamento bibliográfico das pesquisas já realizadas tanto no país quanto no exterior, com o objetivo de resumir em um único documento o estado da arte sobre dormentes de concreto protendido, suas manifestações patológicas e inspeção e monitoramento nesses elementos estruturais.

Apresenta-se no tópico 8 uma relação das principais pesquisas produzidas até o ano de 2024, sendo que durante a vigência do projeto, outras referências bibliográficas poderão ser citadas e estudadas, assim como especificações vigentes, incluindo normativas nacionais e internacionais aplicadas ao tema deste projeto de pesquisa. O desenvolvimento desta etapa será demonstrado ao longo de todo projeto, pela equipe técnica, de acordo com o cronograma físico do projeto.

Síntese das atividades da Etapa 1 – Atividade 1
• <b>Atividades:</b>
Revisão do estado da arte via revisão bibliográfica
• <b>Metodologia:</b>
Leitura/compilação das pesquisas existentes e normas vigentes.
• <b>Resultados esperados:</b>
Estabelecimento do estado da arte do tema pesquisado
• <b>Aquisições:</b>
Livros, normas, manuais e demais materiais informacionais relacionados a pesquisa desenvolvida

## Etapa 2 - Infraestrutura física e equipamento de ensaio

O projeto prevê a aquisição de equipamento e componentes especializados para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos nos dormentes de concreto protendido de acordo com a norma brasileira da ABNT 11709 (2015) e AREMA Capítulo 30. A aquisição ocorrerá juntamente com a adequação da infraestrutura física necessária para o funcionamento dos equipamentos a serem adquiridos. Nesta infraestrutura está previsto um hall tecnológico, com aquisições de pórticos autoportantes, atuadores hidráulicos, células de carga, controladores, sistemas de arrefecimento, acessórios para os ensaios, além dos sensores como acelerômetros, transdutores de deslocamento, extensômetro etc.

### Atividade 1 - Adequação do espaço físico

Consiste na elaboração e aprovação de projetos de adequação da infraestrutura, essências para adaptar o espaço físico existente para instalação do equipamento e componentes, e posterior operação. Esta fase inclui também a adequação de áreas para as estações de trabalho dos pesquisadores, e principalmente para o armazenamento adequado dos dormentes de concreto a serem estudados.. Os projetos desenvolvidos serão submetidos às autoridades competentes, assegurando a conformidade com as normas técnicas e regulamentações vigentes. Após a aprovação dos projetos, será realizada a **contratação da obra**. Esta fase envolve a seleção de uma empresa de construção especializada, levando em consideração critérios técnicos (experiência, qualidade técnica) e financeiros (custos e prazo de execução). Serão estabelecidos contratos detalhados, garantindo o cumprimento das especificações técnicas e a segurança na obra, além de minimizar riscos

e atrasos na entrega. Por fim ter-se-á a **execução da obra**, onde será realizada a adequação e adaptação da edificação conforme os projetos aprovados. Durante essa etapa, haverá um acompanhamento contínuo para assegurar a conformidade com o projeto e as normas de segurança. Inspeções periódicas serão realizadas para garantir a qualidade dos trabalhos executados, resultando em um ambiente pronto para operar a máquina de ensaios, garantindo a integridade e funcionalidade dos testes propostos.

Síntese das atividades da Etapa 2 – Atividade 1
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Atividades:</b></li> </ul>
Adequação do espaço físico
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Metodologia:</b></li> </ul>
Aprovação e execução das obras segundo as normas vigentes no país
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Resultados esperados:</b></li> </ul>
Construção do Hall tecnológico para a instalação e operação dos ensaios estáticos e dinâmicos a serem realizados nos dormentes de concreto protendido
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Aquisições:</b></li> </ul>
Elaboração e aprovação de projetos, contratação da obra e execução da obra

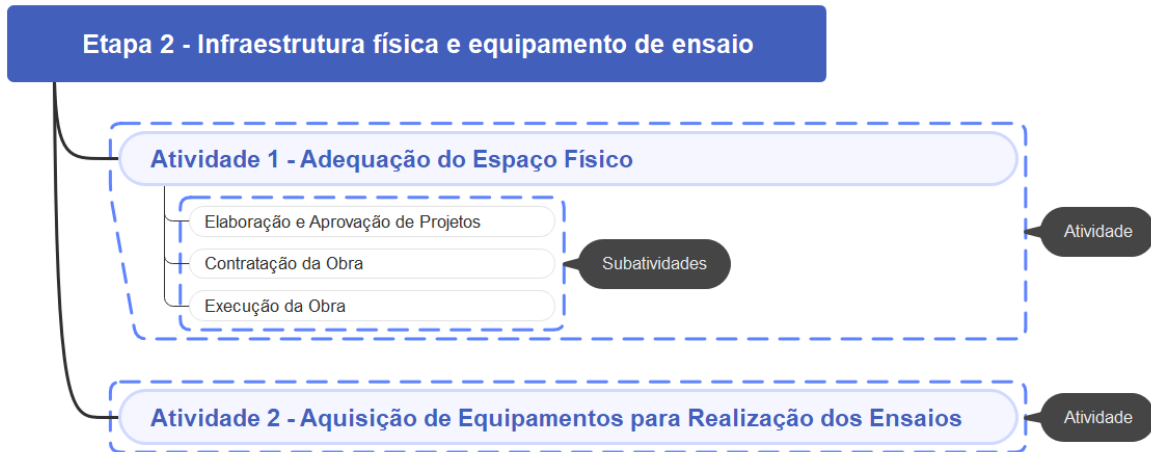
## Atividade 2 - Aquisição de equipamentos

A principal ferramenta do projeto está relacionada com a aquisição dos equipamentos para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos em dormentes ferroviários. O processo de aquisição inicia-se na avaliação dos fornecedores, considerando critérios técnicos como conformidade com as normas técnicas, suporte técnico e garantia, além de critérios financeiros. Em seguida, ocorre a negociação com o fornecedor escolhido e enfim a compra formal do equipamento. Em consonância com a adaptação do espaço físico, será realizado o recebimento do equipamento, seguida da inspeção técnica de conformidade e especificações contratadas, além de testes e calibrações iniciais para validação do funcionamento

Esta estrutura organizacional permite um controle eficiente sobre cada fase do projeto, assegurando que todas as etapas sejam cumpridas dentro das normas estabelecidas e em consonância com os objetivos do projeto.

Síntese das atividades da Etapa 2 – Atividade 2
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Atividades:</b></li> </ul>
Aquisição de equipamentos
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Metodologia:</b></li> </ul>
Licitação e contratação da compra dos equipamentos e certificação deles
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Resultados esperados:</b></li> </ul>
Equipamentos utilizados para a realização dos ensaios estáticos e dinâmicos de elementos (dormentes) isolados, bem como a certificação dos equipamentos e procedimentos para a devida homologação dos resultados a serem obtidos.
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Aquisições:</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Equipamento para realização de ensaios estáticos e dinâmicos de dormentes</li> <li>○ Certificação dos equipamentos e procedimentos conforme norma ISO 9000.</li> </ul>

Figura 3: - Síntese da etapa 2



Fonte: Elaborado pelo autor

### Etapa 3 - Produção dos dormentes e indução da expansão

Os dormentes de concreto serão produzidos em laboratório (moldados e protendidos) com a indução de mecanismo expansivo. O processo incluirá um tratamento térmico controlado em tanque de aquecimento para estimular a reação. Além disso, será realizado um monitoramento periódico das variações de massa e dimensão dos corpos de prova, utilizando balanças de alta precisão e micrômetros. Esse acompanhamento será fundamental para a caracterização inicial do comportamento expansivo

#### Atividade 1 - Produção do concreto

O concreto utilizado na moldagem dos dormentes seguirá os padrões de fabricação adotados pelas empresas de pré-moldados, com uma classe de resistência de 60 MPa. A produção de concreto de alta resistência é essencial para otimizar o processo de protensão e assegurar tanto a segurança quanto a eficiência estrutural. Isso se deve ao fato de que o concreto deve alcançar uma resistência mínima, em torno de 60 a 75% da sua resistência característica, antes que os cabos de aço possam ser tensionados e a força transferida ao elemento estrutural (Helene *et al*, 1992). Considerando a importância dessa resistência inicial, será utilizado preferencialmente o cimento CPV-ARI (Alta Resistência Inicial) adquirido em locais que comercializam este produto. Os agregados serão divididos em dois grupos: para o traço sem reação expansiva, serão utilizados areia média e brita 1 inerte. Para o traço destinado à indução de expansão, serão usados areia média da mesma região e reativa, adquirida em locais que comercializam este tipo de brita. Finalmente, o concreto será lançado nas formas com os cabos tracionados, seguido pelos processos de cura e desprotensão, que serão explicados detalhadamente nas próximas atividades.

Síntese das atividades da Etapa 3 – Atividade 1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Atividades:</b></li> </ul>
Produção do concreto
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Metodologia:</b></li> </ul>
Produção de concreto com as propriedades mecânicas necessárias para a produção dos dormentes a serem ensaiados.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Resultados esperados:</b></li> </ul>
Produção de concreto para moldagem dos dormentes.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aquisições:</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Transporte de agregados reativos para a universidade, sem o qual não se tem a expansão desejada.</li> <li>○ Misturador com capacidade de produzir volume de concreto suficiente para moldagem de pelo menos 3 dormentes por vez.</li> <li>○ Formas metálicas específicas para produção de dormentes protendidos</li> </ul>

### Atividade 2 - Protensão dos dormentes de concreto

A protensão de dormentes de concreto é uma técnica essencial na engenharia civil, fundamental para maximizar o desempenho estrutural dos elementos. O processo inicia-se com cálculos estruturais que determinam as forças que atuarão sobre os dormentes, além da necessidade de protensão. Em seguida, ocorre a seleção cuidadosa de materiais, que inclui a escolha do concreto, seu traço específico e os elementos de aço, como cordoalhas e feixes de cabos.

A preparação das formas metálicas é uma etapa crítica, que merece atenção especial, uma vez que a qualidade do produto final depende dessa fase. As formas devem ser limpas e tratadas com desmoldante a cada ciclo de concretagem para evitar a aderência do concreto. A instalação de acessórios de ancoragem, como desviadores, nas extremidades das formas é crucial para garantir a distribuição adequada das tensões.

Na instalação das cordoalhas ou cabos, é fundamental seguir rigorosamente as diretrizes do planejamento, considerando aspectos como posição, excentricidade e detalhes construtivos. Durante a protensão, a aplicação das forças em um dos lados dos cabos é realizada por meio de macacos hidráulicos, devendo respeitar o planejamento projetual para assegurar a eficácia do processo.

Após a protensão, o concreto deve ser aplicado de maneira a preencher completamente todos os vazios da forma, evitando bolhas ou falhas. A utilização de um vibrador do tipo agulha é imprescindível para garantir a compacidade e a correta consolidação do material. A cura do concreto precisa ser feita sob condições controladas, mantendo-o úmido e protegido com lona, o que é crucial para o desenvolvimento adequado da resistência do material.

Finalmente, após o período de cura e a obtenção da resistência desejada, realiza-se a desforma dos dormentes. Essa etapa deve ser conduzida com extremo cuidado para garantir a integridade estrutural dos elementos protendidos, minimizando o risco de danos. A desforma é, também, uma fase crítica que requer planejamento e execução de acordo com as especificações do projeto para garantir a qualidade final dos dormentes.

Síntese das atividades da Etapa 3 – Atividade 2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Atividades:</b></li> </ul>
Protensão dos dormentes de concreto
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Metodologia:</b></li> </ul>
Execução da protensão dos dormentes conforme as boas práticas de engenharia e normas técnica vigentes.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Resultados e produtos esperados:</b></li> </ul>
Produção dos dormentes protendidos.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aquisições:</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fios de protensão necessários para produzir o dormente protendido.</li> </ul>

### Atividade 3 - Indução da expansão do concreto utilizado

A formação de etringita tardia (DEF) e a reação álcali-agregado (RAA) apresentam efeitos semelhantes nos materiais cimentícios, dentre eles expansão, fissuração e redução nas propriedades mecânicas, apesar de apresentarem diferentes fatores causadores, tempos de indução e graus de degradação (Portella *et al.*, 2021). Por isso, a indução do mecanismo expansivo poderá ser realizada por meio da RAA ou da DEF.

A seguir são apresentados ambos os processos para a indução de RAA e DEF, respectivamente. No programa experimental a ser realizado, será adotado apenas um dos processos. O mecanismo a ser incorporado no presente projeto será definido com base em resultados preliminares de estudos que estão em andamento dentro do Grupo de Pesquisa sobre Durabilidade e Análise Estrutural (DurAE) ligado à Universidade Federal de Uberlândia, e que tenha maior representação de danos ao dormente de concreto.

#### Reação álcali-agregado (RAA)

A reação álcali-agregado (RAA) ocorre entre agregados reativos e hidróxidos alcalinos no concreto, podendo ser classificada em álcali-sílica (RAS) ou álcali-carbonato (RAC), sendo a RAS a mais comum. A interação resulta na formação de um gel expansivo, que pode fissuras nos dormentes de concreto, diminuindo consideravelmente a sua vida útil. Para sua ocorrência, são necessárias condições como agregados reativos, altos teores de álcalis e ambientes úmidos. Os ensaios para induzir a RAA são normatizados pela ABNT NBR 15577-7:2018 e ASTM C1293:2020, utilizando câmaras úmidas com temperatura controlada e umidade de 100%.

#### Formação de etringita tardia (DEF)

A formação de etringita tardia (DEF – Delayed Ettringite Formation) é uma reação interna no concreto endurecido, resultante da dissolução da etringita primária durante a cura do concreto e sua recristalização quando o concreto endurecido, causando fissuras longitudinais nos dormentes de concreto, tornando-os inservíveis.

Para a indução da DEF em laboratório, adota-se o procedimento de elevação da temperatura durante o processo de cura do concreto, conforme as fases estabelecidas pelos IFSTTAR (2018).

Figura 4: - Dormentes armazenados durante expansão em câmara apropriada



Fonte: Perin (2024)

Figura 5: – Câmara com controle de temperatura e umidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Síntese das atividades da Etapa 3 – Atividade 3	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Atividades:</b></li> </ul>	
Indução da expansão do concreto utilizado	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Metodologia:</b></li> </ul>	
Mediante procedimentos estabelecidos na literatura, será induzida a expansão do concreto utilizado por meio dos seguintes mecanismos: uso de agregado reativo ou surgimento de etringita tardia.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Resultados esperados:</b></li> </ul>	
Indução da expansão do concreto, sendo seu nível de dano uma das variáveis da pesquisa. Avaliação de como seus distintos níveis impactam a resposta estrutural do elemento.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aquisições:</b></li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Câmaras climatizadas que reproduzam condições específicas de temperatura e umidade para gerar as condições ambientais necessárias para acelerar a expansão.</li> <li>○ Sistema de aquecimento para cura térmica.</li> </ul>	

#### Atividade 4 - Monitoramento da expansão do concreto

O acompanhamento do desenvolvimento das reações expansivas no concreto será feito por meio do monitoramento da variação dimensional nos dormentes. Sendo que as medições serão mensais a partir dos 28 dias após a moldagem. As condições de confinamento do elemento proporcionam variações dimensionais distintas das observadas em amostras de concreto isolado. Visando criar correlações entre as expansões do elemento e do material (concreto), serão feitas medições de variação dimensional em corpos de prova cilíndricos, moldados juntamente com os dormentes.

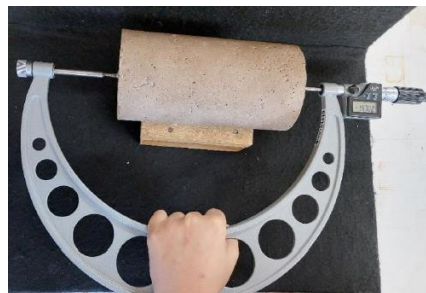
Síntese das atividades da Etapa 3 – Atividade 4	
• <b>Atividades:</b>	Monitoramento da expansão do concreto
• <b>Metodologia:</b>	Medição com o uso de equipamento da expansão (paquímetro ou micrometro)
• <b>Resultados esperados:</b>	Medição periódica e sistemática da expansão do concreto utilizado na moldagem.
• <b>Aquisições:</b>	○ Pinos de expansão que são utilizados como marcadores de posição

Figura 6: - Corpo de prova com pino para a medição das expansões



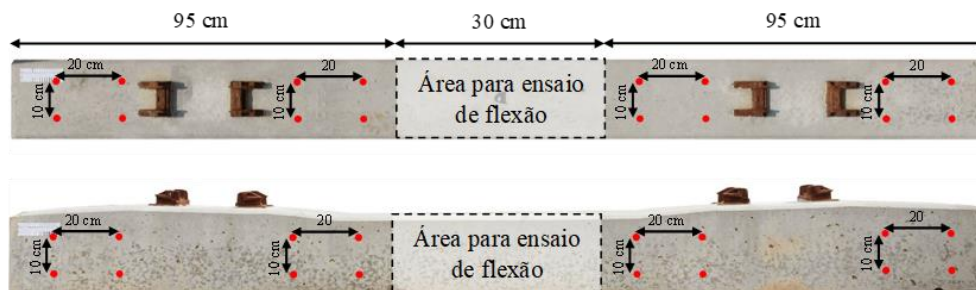
Fonte: Houna (2024)

Figura 7: – Medição da expansão de corpo de prova com micrômetro



Fonte: Leite (2023)

Figura 8: Posições de fixação dos pinos para medição de expansão nos dormentes



Fonte: Elaborado pelo autor

### Atividade 5 - Caracterização do concreto nos níveis de expansão.

Além do controle das variações dimensionais e de massa, as amostras de todos os mecanismos expansivos serão ensaiadas em distintas idades, visando a caracterização do concreto em diferentes estágios de degradação.

#### Ensaio não-destrutivo realizado nos dormentes

Os métodos de ensaios não destrutivos (END) desempenham um papel crucial na gestão de infraestruturas, permitindo a avaliação de estruturas sem causar danos. Essas técnicas possibilitam o monitoramento contínuo da qualidade durante e após a construção, além de fornecer informações sobre a degradação dos materiais ao longo do tempo. A principal vantagem dos END é a capacidade de inspecionar materiais sem comprometer sua integridade, o que os torna ideais para garantir a durabilidade e segurança de estruturas

em uso (Meierhofer *et al.*, 2010; Rucka, 2020; Tanta *et al.*, 2022). Abaixo a lista de ensaios a serem realizados:

- Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas;
- Módulo de elasticidade dinâmico - Via frequências de vibração;
- Resistividade elétrica volumétrica;
- Módulo dinâmico por ultrassom;
- Resistividade elétrica superficial;
- Potencial de corrosão;
- Tomografia por meio de ultrassom;
- Georadar (GPR).

### **Caracterização mecânica**

Conforme apresentado, as propriedades mecânicas dos elementos de concreto afetados por reações expansivas são negativamente impactadas. Por essa razão, serão conduzidos os ensaios mecânicos em diversos estágios de degradação, abaixo elencados, com o objetivo de analisar os impactos que esses mecanismos de degradação têm sobre as propriedades do concreto.

- Resistência à compressão axial;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Módulo de elasticidade estático à compressão;
- Energia de fraturamento pelo modo I (G<sub>I</sub>).

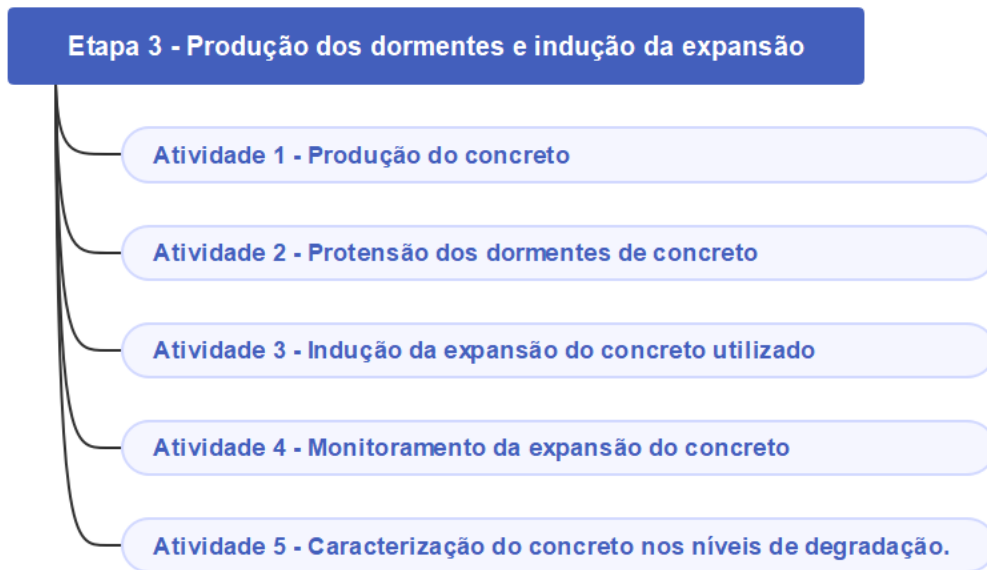
### **Caracterização química e microestrutural**

Visando confirmar a presença das reações expansivas no concreto, serão utilizadas as técnicas de análises químicas e microestruturais:

- Damage Rating Index (DRI);
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Difração de raios-X (DRX).

<b>Síntese das atividades da Etapa 3 – Atividade 5</b>
<b>• Atividades:</b>
Avaliação da progressão dos danos em distintos níveis de expansão
<b>• Metodologia:</b>
Por meio de ensaios não destrutivos caracterização mecânica, química e microestrutura se buscará monitorar e quantificar a progressão do nível de dano dos dormentes em distintos níveis de expansão, para avaliar seu impacto nas diversas propriedades do material concreto.
<b>• Resultados esperados:</b>
Acompanhamento das distintas propriedades do material diretamente nos dormentes produzidos e armazenados.
<b>• Aquisições:</b>
○ Aquisição de licenças de uso dos equipamentos (Tomógrafo e GPR) necessário para operação do equipamento

Figura 9: - Síntese da etapa 3



Fonte: Elaborado pelo autor

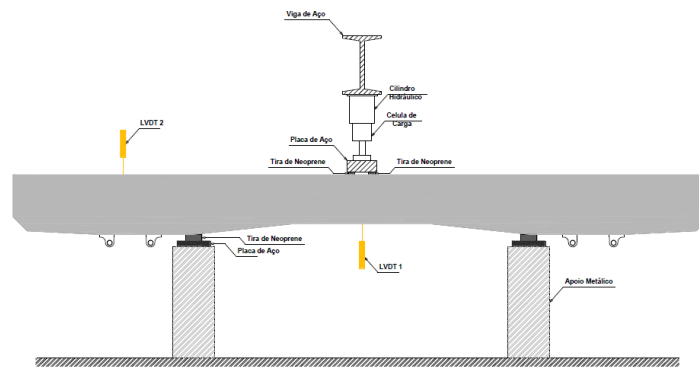
#### **Etapa 4 - Ensaios estáticos e dinâmicos**

Os ensaios laboratoriais estáticos e dinâmicos nos dormentes de concreto serão realizados de acordo com as recomendações normativas ABNT NBR 11709(2015) e AREMA (2022), com intuito de determinar os parâmetros de resistência, de durabilidade dos dormentes de concreto e de avaliar o comportamento à fadiga desses elementos, a partir da retirada de amostras. Estes ensaios serão realizados em dormentes isolados e, também, será realizada um ensaio em escala real no laboratório, simulando um segmento de ferrovia com as cargas reais atuantes.

##### **Atividade 1 - Realização do ensaio estático**

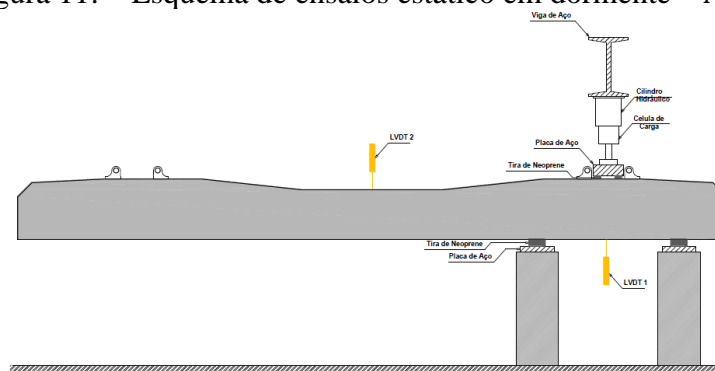
Para melhor entender como se dá o comportamento à flexão de um dormente protendido, o procedimento adotado consistirá realizar ensaios de flexão a quatro pontos, baseando-se nos ensaios de homologação da norma ABNT NBR 11709: 2015 e AREMA (2022). Os ensaios de flexão simples são em duas configurações: com carga aplicada no centro dos dormentes e com carga aplicada na seção de apoio do conforme norma de dormentes (NBR 11709):2015.

Figura 10: – Esquema de ensaios estático em dormente – Meio do vão



Fonte: Elaborado pelo autor com base na norma brasileira

Figura 11: – Esquema de ensaios estático em dormente – Apoio



Fonte: Elaborado pelo autor com base na norma brasileira

Baseando-se nesses ensaios de homologação (que preveem a aplicação de carga até o surgimento das primeiras fissuras), serão feitos os ensaios levando os dormentes à ruptura. Com isso, será possível elaborar gráficos da relação carga versus deslocamento e avaliar todo o processo de aplicação de carga e deflexão dos dormentes. Será utilizado LVTD (transdutor de deslocamento variável linear), posicionado abaixo da seção central, para registrar cada deslocamento milimétrico à medida que a carga era aplicada.

Síntese das atividades da Etapa 4 – Atividade 1	
• <b>Atividades:</b>	
Realização do ensaio estático	
• <b>Metodologia:</b>	
Ensaio à flexão de um dormente protendido baseando-se nos ensaios de homologação da norma ABNT NBR 11709: 2015 e AREMA (2022).	
• <b>Resultados esperados:</b>	
Avaliação da resposta estrutural sob condições de carga estática dos dormentes em diversos níveis de expansão (dano)	
• <b>Aquisições:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Software de análise estatística (MINITAB) utilizado para tratamento estatístico dos dados</li> <li>○ Gerador a diesel entre 50 e 55 KVA e Transformador trifásico 15KVA necessário por serem ensaios que demandam tempo, para garantir o fornecimento de energia adequado.</li> </ul>	

## Atividade 2 - Realização do ensaio dinâmico

A norma NBR 11709 (2015) descreve no item 12.5.2 o ensaio dinâmico. Esse ensaio deve ser realizado após concluído o ensaio estático de momento positivo no apoio do trilho (descrito no item anterior), a partir daí, deve-se aumentar progressivamente a carga vertical até que ocorra a fissuração do dormente desde a sua base até o nível da camada inferior da armadura de proteção. O dormente deve ser submetido a três milhões de ciclos de carregamento dinâmico com frequência de aplicação dinâmico entre 2Hz e 5Hz, não excedendo 10Hz. O dormente é considerado aprovado nesse ensaio se após a aplicação dos 3 milhões de ciclos de carregamento dinâmico for atendida a condição da abertura característica das fissuras deve ser menor ou igual a 0,05mm após o descarregamento.

Figura 12: – Ensaio dinâmico de momento apositivo no apoio do trilho



Fonte: IBERTEST (2024)

Síntese das atividades da Etapa 4 – Atividade 2	
• <b>Atividades:</b>	
Realização do ensaio dinâmico	
• <b>Metodologia:</b>	
Ensaio à flexão de um dormente protendido baseando-se nos ensaios de homologação da norma ABNT NBR 11709: 2015 e AREMA (2022).	
• <b>Resultados esperados:</b>	
Avaliação da resposta estrutural sob condições de carga dinâmica dos dormentes em diversos níveis de expansão (dano)	
• <b>Aquisições:</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Kit de revisão empilhadeira para manutenção do equipamento existente e que será utilizado no projeto.</li><li>○ Software para cálculos matemáticos de engenharia (MathCAD) para confecção de rotinas computacionais de análise e cálculo dos dormentes, ensaios etc.</li></ul>	

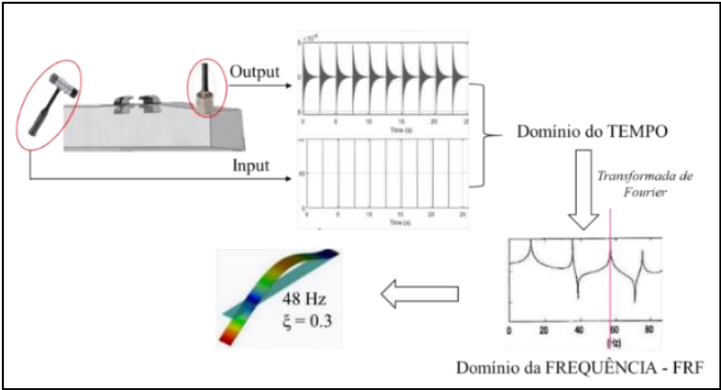
## Atividade 3 - Realização do ensaio de análise modal

Dentro das abordagens vibracionais de um elemento, está a análise de respostas da estrutura quando submetida a excitação conhecida e controlada. Essa abordagem, conjuntamente com a aquisição de dados e respectiva avaliação é definida como análise modal. A utilização desse tipo de ensaios dinâmicos em estruturas de concreto permite a avaliação do comportamento desses elementos através da determinação de suas frequências naturais de vibração. Além de se diferenciar dos ensaios estáticos por

mobilizar integralmente as 3 propriedades do elemento: massa, rigidez e amortecimento, esse tipo de ensaio é passível de repetição, sem causar danos a estrutura (não destrutivo) e pode ser comparado com resultados de modelos computacionais (Nóbrega,2004).

A NBR 6118:2023 determina que as características dinâmicas de uma estrutura devem ser avaliadas a partir da frequência natural de vibração, determinada por análise modal computacional ou experimental. Cabe ressaltar que a assinatura modal da estrutura obtida através das propriedades dinâmicas, se altera conforme o elemento é submetido a diferentes graus de deterioração (Kaewunruen E Remennikov,2008; Sadeghi,2010; Çecen *et al*, 2022; Choi *et al*, 2023). Dessa maneira, o monitoramento dessas características se faz necessário ao longo da vida útil de uma estrutura de concreto, seja para prever seu comportamento e até mesmo detectar e avaliar danos.

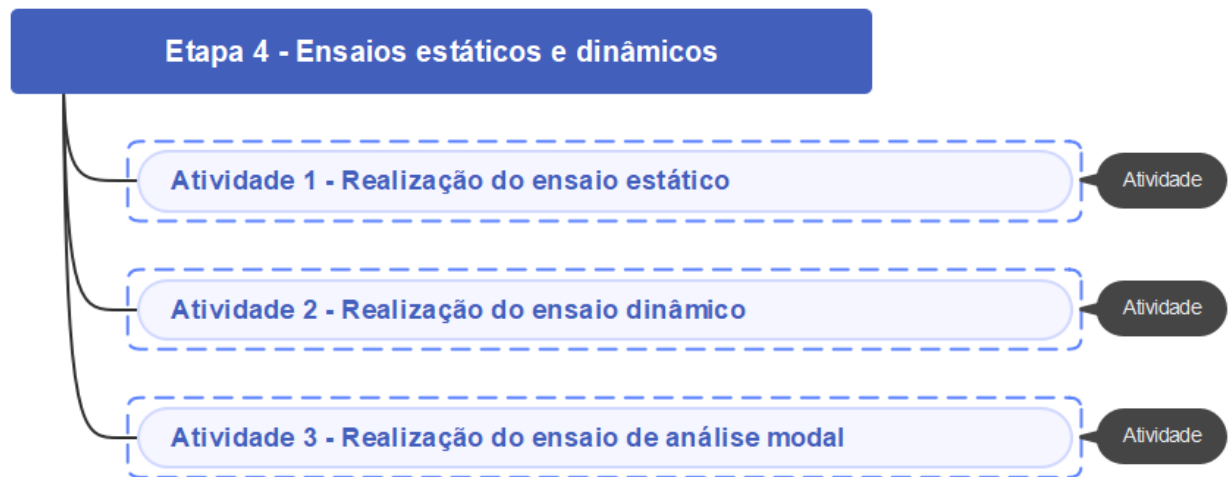
Figura 13: Etapas do processo de análise modal



Fonte: Elaborado pelo autor

Síntese das atividades da Etapa 4 – Atividade 3
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Atividades:</b></li> </ul>
Realização do ensaio de análise modal
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Metodologia:</b></li> </ul>
Indução de onda de choque em elemento estrutural por meio de martelo de impacto (input), ondas estas que se propagam pelo dormente e são captadas por acelerômetros fixados no mesmo (output). Tem-se, assim, uma assinatura de vibração que pode ser relacionada com distintas propriedades do dormente/material.
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Resultados esperados:</b></li> </ul>
Avaliação da resposta estrutural sob condições de vibração dos dormentes em diversos níveis de expansão (dano)
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Aquisições:</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Martelo de impacto, Acelerômetros, DAQ: Itens para realização do ensaio e análise dos sinais.</li> <li>○ Software de linguagem de programação (MATLAB) para confecção de rotinas computacionais de análise e cálculo dos dormentes, ensaios etc.</li> </ul>

Figura 14: - Síntese da etapa 4



Fonte: Elaborado pelo autor

### **Etapa 5 - Monitoramento dos dormentes**

O emprego da monitoração utilizando uma rede de sensores de deformação permitirá avaliar de forma mais confiável o comportamento estrutural, viabilizando a aferição e calibração do modelo numérico e a simulação de várias combinações de carregamento. Uma vez instalados os sensores e os sistemas de aquisição, é possível o acompanhamento contínuo dos dormentes por um período de interesse.

Na monitoração dos dormentes de concreto, usualmente pretende-se obter um perfil do comportamento desses elementos estruturais específicos, que pode ser alcançado a partir da execução de um plano de monitoração bem planejado e dimensionado. Nesse escopo, as atividades a desenvolver serão as seguintes:

- elaboração do plano de monitoração dos dormentes de concreto a monitorar, tendo em vista os interesses específicos relativos ao comportamento estrutural;
- instrumentação dos dormentes, utilizando os sensores mais apropriados e respeitando o cronograma de utilização da via permanente;
- programação e verificação do funcionamento adequado dos sistemas de aquisição de dados a serem empregados;
- aquisição dos dados coletados.

Para tanto serão realizadas as seguintes ações:

#### **Atividade 1 - Monitoramento do dormente isolado**

O monitoramento do elemento isolado será realizado juntamente com os ensaios dinâmicos descritos nas etapas anteriores. Ou seja, ao submeter o dormente a cargas cíclicas, ele também será instrumentado com extensômetros, acelerômetros e LVDTs, sendo avaliadas as respostas dos sensores e comparadas com os já existentes da estrutura construída para verificação estrutural desse elemento.

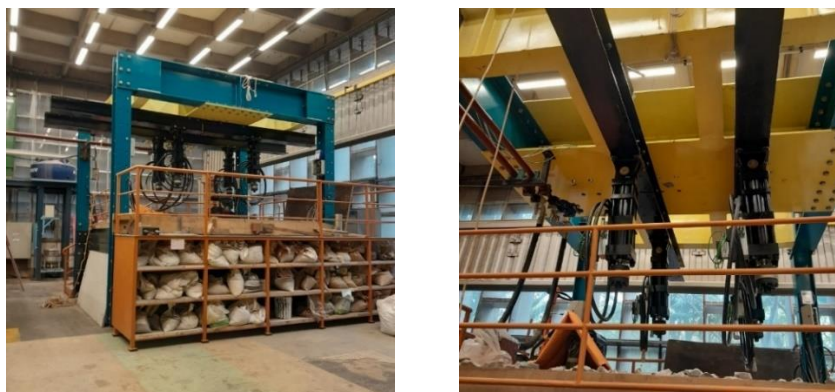
Síntese das atividades da Etapa 5 – Atividade 1
• <b>Atividades:</b>

Monitoramento do dormente isolado
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Metodologia:</b></li> </ul>
Será realizado com os ensaios dinâmicos, quando os dormentes também serão instrumentados com extensômetros, acelerômetros e LVDTs.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Resultados esperados:</b></li> </ul>
Avaliação das respostas estruturais dos dormentes em distintos níveis de dano e seus dados de reposta com os da via existente.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aquisições:</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Notebook com características que permitam adquirir os dados estáticos, dinâmicos e resposta modal em velocidade adequada aos fenômenos avaliados.</li> </ul>

## Atividade 2 - Monitoramento do dormente em um simulador de via

Essa etapa será realizada em um simulador de via em escala real, no qual é possível controlar as variáveis envolvidas em uma situação de campo, como lastro, sub lastro, trilhos, carga aplicada etc.

*Figura 15: Simulador de via*



Fonte: Elaborado pelo autor

Síntese das atividades da Etapa 5 – Atividade 2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Atividades:</b></li> </ul>
Monitoramento do dormente em um simulador de via
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Metodologia:</b></li> </ul>
Ensaio estáticos e dinâmicos em dormentes colocados em via simulada, na qual será aplicada carga semelhante às dos vagões em operação. Busca-se deste modo, sob condições controladas, avaliar a resposta do dormente no conjunto da instalação.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Resultados esperados:</b></li> </ul>
Obtenção da resposta estrutural dos dormentes em condições semelhantes às de operação.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aquisições:</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Realização do ensaio em laboratório externo.</li> <li>○ Transporte dos dormentes a serem ensaiados.</li> </ul>

### Atividade 3 - Monitoramento *in situ*

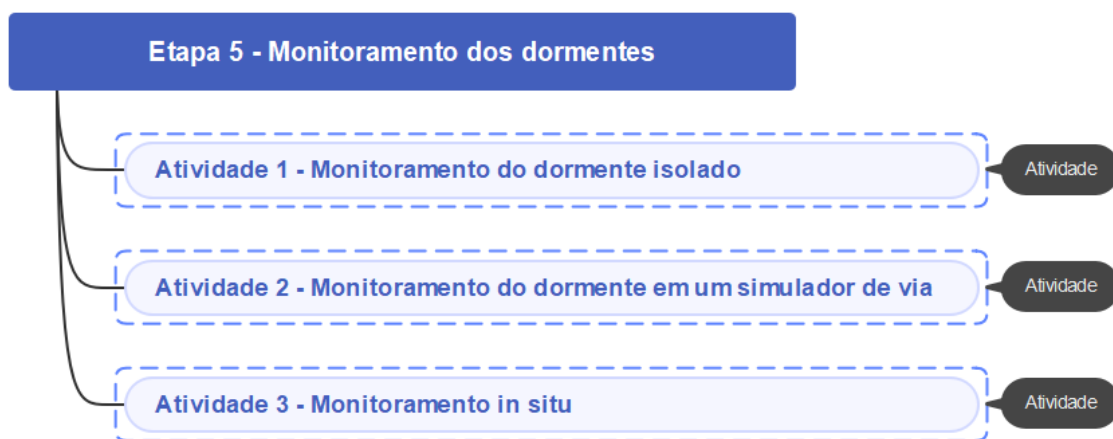
Ensaio *in situ* (monitoramentos) serão realizados em dois locais distintos da via férrea.

LOCAL 01: Instrumentação de dormentes novos a serem instalados em um segmento de linha férrea onde não foram detectadas anomalias durante uma inspeção preliminar, escolhendo-se o local ideal. LOCAL 02: Instrumentação de dormentes diretamente na via, em um trecho onde foram identificadas anomalias significativas (como reação álcali-agregado) durante a mesma inspeção preliminar.

Em ambos os casos, os sensores serão previamente fixados, colados e protegidos em ambiente laboratorial. No LOCAL 01, a instalação ocorrerá após a correção geométrica mecanizada, seguida de um monitoramento inicial e outro após alguns meses, para verificar a variação dos níveis de deformação (tensão) ao longo do tempo. No LOCAL 02, os dormentes com anomalias serão instrumentados *in loco*, sem necessidade de realizar correção geométrica mecanizada, com um monitoramento logo após a instalação e outro alguns meses depois, também para acompanhar a evolução das tensões nos pontos instrumentados.

Síntese das atividades da Etapa 5 – Atividade 3
• <b>Atividades:</b>
Monitoramento <i>in situ</i>
• <b>Metodologia:</b>
Monitoramento da resposta estrutural dos dormentes <i>in situ</i> , provavelmente no trecho Carajás – São Luiz
• <b>Resultados esperados:</b>
Dados para obtenção de parâmetros de comparação entre dormentes isolados, em mini via em condições controladas e semelhantes com dados reais de via.
• <b>Aquisições:</b>
○ Extensômetros para a coleta de dados

Figura 16: - Síntese da etapa 5



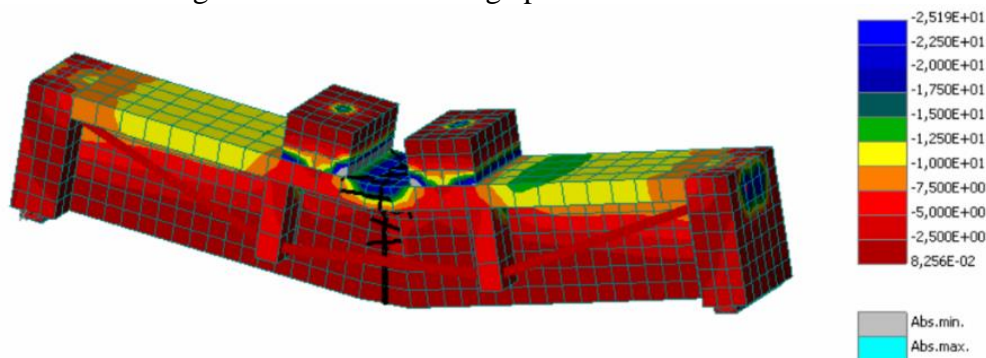
Fonte: Elaborado pelo autor

## Etapa 6 - Modelagem Computacional

### Atividade 1 - Modelagem em dormentes isolados e em situação real.

A análise numérica será realizada principalmente com o software **ATENA**, especializado em simulações não lineares de concreto e estruturas frágeis, incluindo concreto armado e protendido. O programa permite trabalhar com diversos tipos de materiais, realizar análises estáticas, dinâmicas, térmicas e de durabilidade, além de modelar e visualizar fissuras em 3D. Para tanto, o software **GiD** será utilizado como ferramenta de pré e pós-processamento, gerando modelos geométricos, malhas de elementos finitos e aplicando condições de contorno, com integração eficiente ao ATENA.

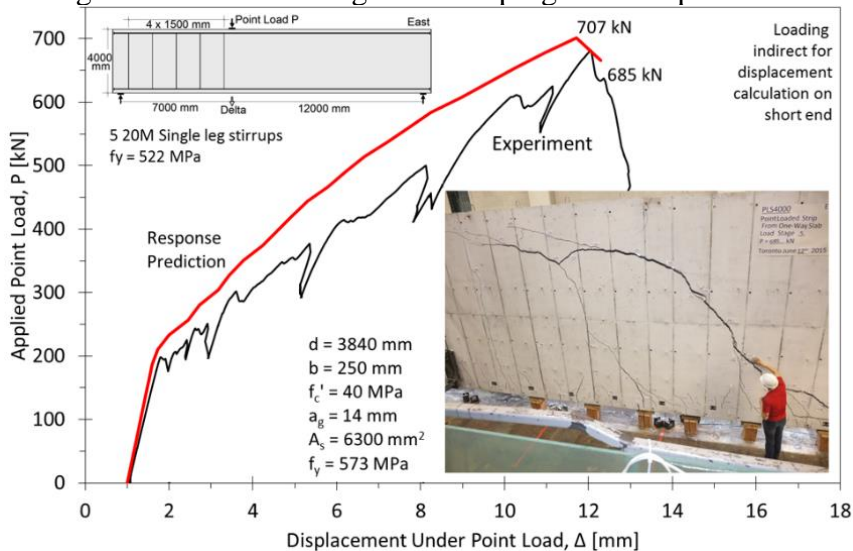
Figura 17: - análise de viga protendida no ATENA



Fonte: Elaborado pelos autores

Complementando as análises, será usado o Response2000, que permite análise seccional não linear de concreto armado e protendido. Ele oferece modelos simplificados com agilidade e precisão, sendo útil para verificar carregamentos normativos e apoiar análises mais complexas. O pacote inclui os módulos Membrane, Shell e Triax para análise de membranas, cascas e sólidos

Figura 18: – resultados gerados no programa Response2000.



Fonte: Elaborado pelos autores

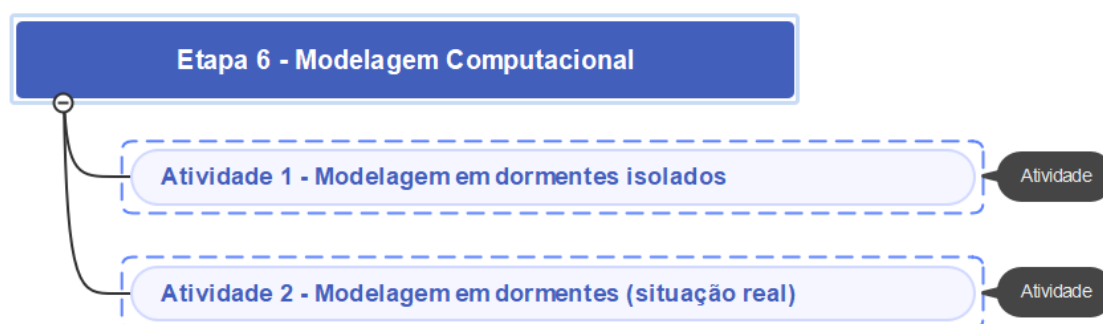
A modelagem tem como foco a criação e calibração de modelos numéricos para simular o comportamento dos dormentes de concreto sob diferentes condições de operação. O processo é dividido em duas abordagens complementares:

- **Simulador de via:** A modelagem inicial é baseada em dados experimentais obtidos em um simulador de linha férrea em escala real, onde, onde as condições de carga, vibração e deformação são reproduzidas de forma controlada. Isso permite gerar um modelo numérico preliminar da estrutura, essencial para compreender como os dormentes respondem aos esforços aplicados em laboratório e antecipar seu comportamento em campo.
- **Monitoramento *in situ*:** Na sequência, a calibração do modelo é realizada com base em dados coletados diretamente na linha férrea, por meio do monitoramento dos dormentes já instalados. Esse processo permite ajustar o modelo inicial considerando fatores reais que podem não ser reproduzidos em ambiente controlado, como a interação com o lastro, variações climáticas e efeitos de degradação ao longo do tempo.

A integração das duas abordagens – simulador e monitoramento *in situ* – garante uma representação mais fiel do comportamento estrutural dos dormentes. Com isso, é possível desenvolver previsões mais precisas de desempenho e orientar ações preventivas ou corretivas no sistema ferroviário.

Síntese das atividades da Etapa 6 – Atividade 1	
• <b>Atividades:</b>	Modelagem em dormentes isolados e em situação real
• <b>Metodologia:</b>	Análise numérica utilizando método dos elementos finitos
• <b>Resultados esperados:</b>	Desenvolvimento de previsões mais precisas de desempenho e orientar ações preventivas ou corretivas no sistema ferroviário.
• <b>Aquisições:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Software ATENA especializado em simulações não lineares de concreto e estruturas frágeis como dormentes.</li> <li>○ Notebook</li> </ul>

Figura 19: - Síntese da etapa 6



Fonte: Elaborado pelo autor

## **Etapa 7 - Transferência de tecnologia**

### **Atividade 1 - Elaboração de produtos e divulgação de resultados**

Os resultados obtidos receberão o tratamento estatístico apropriado e suas análises serão sistematizadas e condensadas na forma de gráficos, tabelas, ábacos etc. com suas respectivas análises. Especificamente acerca da transferência de tecnologia, será necessário, além de relatórios técnicos, materiais para os diferentes atores envolvidos como, por exemplo, a realização de workshops, cursos e vídeos para discussões presenciais sobre os avanços obtidos no conhecimento sobre a temática, voltado para as ferrovias brasileiras, instituições fiscalizadoras e normativas, comunidade acadêmica e à sociedade, em diferentes eventos voltados para ações de capacitação, extensão e transferência de tecnologia e inovação.

*Produção de materiais:* Produção de material a ser utilizado para transferência de tecnologia de conteúdo complexo, em diferentes plataformas tecnológicas, envolvendo da ideação à prototipagem, com posterior veiculação.

*Divulgação e veiculação:* Veiculação e acompanhamento do material em plataformas digitais, com posterior monitoramento do engajamento alcançado com a divulgação acerca das tecnologias transferidas.

*Produção de material técnico-científico:* Envolve a produção e submissão de artigos e material técnico científico com resultados dos trabalhos nas diferentes áreas e suas especificidades envolvidas.

*Interações institucionais:* Visitas técnicas ou participação em eventos nacionais ou internacionais, conforme detalhado anteriormente, para apresentação de resultados, prospecção de equipamentos ou perspectivas inovadoras ou capacitação da equipe.

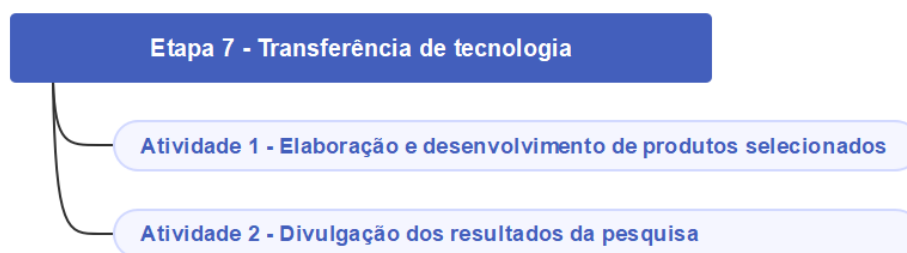
*Workshops e capacitações:* Organização de quatro eventos, em locais como São Luís, Brasília e Belo Horizonte, com, com participação do setor para ações de capacitação e de transferência de tecnologias, voltado para comunidade técnica e científica, operadores do sistema ferroviário e sociedade civil organizada.

*Publicações especializadas:* Publicação de resultados selecionados em periódicos especializados e voltados às especificidades deste estudo, com alto fator de impacto.

*Relatórios:* Elaboração e acompanhamento dos relatórios parciais e do relatório final

<b>Síntese das atividades da Etapa 7 – Atividade 1</b>
<b>• Atividades:</b>
Elaboração de produtos e divulgação de resultados
<b>• Metodologia:</b>
Vinculação nas diversas formas de mídia e debates dos resultados obtidos
<b>• Resultados esperados:</b>
Difusão na sociedade civil organizada, meio científico e técnico dos avanços obtidos com o projeto de pesquisa, por meio de periódicos, publicações especializadas, artigos e demais materiais relacionados.
<b>• Aquisições:</b>
○ Taxa de publicação
○ Despesas com organização e realização de eventos/workshop

Figura 20: - Síntese da etapa 7



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL

Este projeto será desenvolvido em 48 meses com previsão de início em 01/10/2025.

O custo total deste projeto será R\$ 16.397.489,43 (Dezesseis milhões, trezentos e noventa e sete mil, quatrocentos e oitenta e nove reais e quarenta e três centavos). Este valor contempla, além dos equipamentos, obras, e demais custos envolvidos, o pagamento das despesas operacionais administrativas devidas à Universidade Federal de Uberlândia por meio da Fundação de apoio à Pesquisa (FAU).

No caso de envolvimento de fundação de apoio com previsão de ressarcimento institucional deve-se observar os seguintes documentos:

- Lei 8.958/94, Art. 6º
- Decreto 7.423/2010, Art. 6º, §1º, II
- Resolução nº 05/2002, CONSUN
- Resolução SEI nº 08/2017, CONDIR, Art. 17 - (base de cálculo Custos Diretos: valor global da proposta)
- Portaria SEI REITO Nr. 872 - Seção III - item 9.3

O valor também contempla o provisionamento da concessionária para despesas administrativas (3%) a partir do Ano 2 e reserva técnica (5%), conforme § 5º do art. 10. da Resolução nº 6.021, de 2023 e § 4º do art. 6 da Portaria nº 17, de 06 de dezembro de 2023 respectivamente. A concessionária fundamenta-se no exercício legítimo da prerrogativa de alocação de recursos à Reserva Técnica, em razão da complexidade e da amplitude do projeto, bem como das incertezas inerentes a fatores externos que podem impactar sua execução. Tal previsão encontra respaldo no § 4º do art. 6º da Portaria nº 17, de 6 de dezembro de 2023, com redação conferida pela Portaria nº 9, de 9 de agosto de 2024, nos seguintes termos: “A concessionária poderá prever um valor de até 5% do projeto para Reserva Técnica, com a finalidade de atender a despesas imprevistas e diretamente relacionadas à execução do projeto.”.

O total será dividido em parcelas anuais e proporcionais ao aporte do ano em questão. A primeira parcela será para o início do projeto.

Valor de investimento 2025 (ano contratual 05 – 3 meses): R\$ 314.168,33

Valor de investimento 2026 (ano contratual 06 – 12 meses): R\$ 8.270.716,79

Valor de investimento 2027 (ano contratual 07 – 12 meses): R\$ 3.530.685,40

Valor de investimento 2028 (ano contratual 08 – 12 meses): R\$ 3.221.669,80

Valor de investimento 2029 (ano contratual 09 – 9 meses): R\$ 1.060.249,09

O documento completo com o Cronograma Físico-Financeiro é apresentado no Anexo II, de acordo com a Portaria n. 17/2023.

## **5. LOCAL DE EXECUÇÃO**

O projeto será desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, e ao longo das ferrovias da VALE nos estados do Maranhão, Pará, Minas Gerais e Espírito Santo.

## **6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA**

### **6.1. Identificação de entidade**

A entidade executora do projeto será a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, que tem desenvolvido pesquisas, em particular com a temática ferrovias desde 2019. A instituição possui infraestrutura moderna, laboratórios bem equipados e um corpo docente formado por especialistas nas temáticas envolvidas e suas interfaces.

Ao longo dos últimos cinco anos, a Universidade Federal de Uberlândia conduziu diversos projetos de pesquisa na área ferroviária, em valores que ultrapassam o montante de dez milhões de reais capacitando pessoal com pós doutorandos, doutorandos, mestres e iniciação científica, além da realização de inúmeros cursos e eventos para transferência de conhecimentos com diversas empresas do setor. Desses projetos, a maior parte tem relação direta e indireta com a proposta agora apresentada.

A instituição possui, ainda, diversos outros laboratórios em suas unidades acadêmicas (faculdades e institutos), que disponibilizam dentre outros ensaios de caracterização mecânica dos materiais, vibrações, MEV/EDS, EDS, energia do fraturamento dentre outros. Cabe citar, também, as inúmeras parcerias nacionais e internacionais da instituição, o que permite o intercâmbio com diversos centros de pesquisa no mundo relacionados com as temáticas abordadas.

A Fundação de Apoio Universitário - FAU, conforme previsto no acordo de parceria, atua como gestora administrativa e financeira do projeto, sendo responsável pela execução orçamentária e pela prestação de contas perante os órgãos competentes. Entre suas atribuições estão: administrar os recursos financeiros destinados ao projeto, realizar as contratações de bens e serviços necessários, efetuar pagamentos, bem como recolher tributos, encargos e taxas relacionados às atividades previstas no plano de trabalho. A fundação também apoia na formalização de instrumentos jurídicos e na gestão documental, garantindo o cumprimento das exigências legais e normativas aplicáveis ao projeto.

Considerando o exposto no texto supracitado, a UFU é a entidade que executará o projeto em sua totalidade, sendo escolhida com base na análise técnica e financeira da proposta do projeto, bem como na capacidade de execução da entidade. Adicionalmente, este projeto não prevê a concessionária como executora do projeto, limitando-se ao escopo de gerir a execução do projeto pela entidade executora, de forma alinhada e aderente às obrigações regulatórias e contratuais atribuídas à concessionária pelo poder concedente.

## 6.2. Identificação da equipe executora

Nome completo	CPF	Cargo	Meses	Função no projeto
Antonio Carlos dos Santos	115.278.248-70	Coordenador	48	Coordenador geral do projeto, organizando atividades da equipe, gerenciando recursos e prazos, garantindo o cumprimento dos objetivos, supervisionando o progresso científico e técnico, além de manter a comunicação com financiadores e parceiros.
A definir	-	Pesquisador sênior	36	Auxiliar a coordenação em suas atividades, supervisionamento e orientação da equipe, sendo particularmente responsável pelas ações de análise numérica e monitoramento em via.
A definir	-	Pós doc 1	36	Conduzir pesquisas independentes e avançadas, liderando experimentos e/ou simulações numéricas, orientando alunos, publicando artigos científicos de alto impacto, e contribuindo para a coordenação geral do projeto.
A definir	-	Pós doc 2	12	
A definir	-	Pós doc 3	24	
A definir	-	Doutorado 1	48	Desenvolver pesquisa complexa de forma autônoma sob supervisão, realizar experimentos e/ou simulações numéricas, interpretar dados, publicar artigos científicos e colaborar na orientação de alunos de iniciação científica e mestrado.
A definir	-	Doutorado 2	42	
A definir	-	Doutorado 3	30	
A definir	-	Mestrado 1	24	Executar pesquisas específicas com supervisão, realizar análises experimentais e/ou simulações numéricas, auxiliar na coleta e interpretação de dados, além de contribuir para relatórios e artigos científicos.
A definir	-	Mestrado 2	24	
A definir	-	Mestrado 3	24	
A definir	-	Mestrado 4	24	
A definir	-	Iniciação científica 1	24	Auxiliar em tarefas básicas de pesquisa, como coleta de dados e suporte em experimentos, desenvolvendo habilidades iniciais em análise científica e participando de relatórios e seminários internos.
A definir	-	Iniciação científica 2	24	
A definir	-	Iniciação científica 3	24	
A definir	-	Iniciação científica 4	24	
A definir	-	Pesquisador Junior	42	Apoiar o desenvolvimento do projeto realizando atividades de pesquisa sob supervisão, auxiliando na coleta e análise de dados, contribuindo para a execução de experimentos e elaboração de relatórios, além de aprimorar suas habilidades técnicas e científicas ao longo do processo.
A definir	-	Bolsa técnica TT-2	24	Realizar atividades de apoio técnico como coleta e organização de dados, manutenção de equipamentos e execução de experimentos sob supervisão, contribuindo para a execução prática do projeto de pesquisa.
A definir	-	Bolsa técnica TT-2	24	
A definir	-	Bolsa técnica TT-4A	24	Desenvolver atividades técnicas complexas com maior autonomia, incluindo a otimização de processos experimentais, manutenção avançada de equipamentos e o treinamento de outros membros da equipe, além de auxiliar na elaboração de relatórios técnicos.
A definir	-	Bolsa técnica TT-4A	24	
A definir	-	Bolsa técnica TT-4A	12	
A definir	-	Laboratorista	24	Executar análises técnicas e experimentais em laboratório ou em campo, garantir a manutenção e funcionamento adequado dos equipamentos, realizar testes conforme protocolos estabelecidos e auxiliar na coleta e organização de dados experimentais.
A definir	-	Engenheiro 1 CLT	42	Coordenar e supervisionar atividades de engenharia dentro do projeto, aplicando conhecimentos técnicos para resolver problemas práticos, elaborar e revisar projetos e relatórios técnicos, além de interagir com a equipe para garantir a integração entre as áreas de pesquisa e desenvolvimento.
A definir	-	Engenheiro 2 CLT	36	

O projeto e equipe executora tem a coordenação do pesquisador Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos da Faculdade de Engenharia Civil na Universidade Federal de Uberlândia. A equipe executora será formada por bolsistas, alunos e professores que só poderão ser selecionados a partir da aprovação do projeto pela ANTT, uma vez que a seleção não pode ocorrer sem a garantia de bolsas para os participantes.

## 7. PRODUTOS

O produto principal deste projeto é desenvolver uma metodologia para realizar a avaliação estrutural de dormentes de concreto utilizando técnicas inovadoras quanto à resposta estrutural, incluindo mecanismos expansivos, a fim de gerar conhecimento para atualizar normas e procedimentos de fabricação e manutenção dos dormentes de concreto com foco na vida útil de projeto.

- Serão entregues pela pesquisa: Relatório técnico com metodologia para realizar a avaliação estrutural de dormentes de concreto;
- Relatórios técnicos e/ou teórico acerca dos mecanismos expansivos em dormentes de concreto protendido em escala real e corpos de prova; Ensaio estático e dinâmico em dormentes de concreto simulando várias ações de serviço não previstas durante o uso (ensaio estático e dinâmico);
- Estudo de efeitos dos mecanismos expansivos e ações de serviço não previstas na resposta estrutural e vida útil do dormente de concreto;
- Modelagem numérica dos dormentes em distintas condições de laboratório e em campo;
- Recursos audiovisuais e materiais informacionais sobre dormentes de concreto;
- Workshops e minicursos sobre dormentes de concreto;
- Quatro dissertações de mestrado;
- Teses de doutorado;
- Iniciações científicas;
- Supervisões de pós-doutoramentos;
- Submissões para publicações em periódicos relevantes e relacionados à área do projeto;
- Submissões de trabalhos em congressos.

## 8. BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS E NORMATIVOS APLICÁVEIS

AGUIAR, J. E.; BAPTISTA, M. B. Estudo das patologias nas estruturas de concreto das galerias de águas pluviais. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...** São Paulo, 2007.

ALEXANDER, M.; BEUSHAUSEN, H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 122, p. 17-29, ago. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>>.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 222: corrosion of metals in concrete. **ACI manual of concrete practice**. Detroit, 2001. 41 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 365: service-life prediction - state-of-the-art report. **ACI manual of concrete practice** Detroit, 2000. 44 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1012: standard test method for length change of hydraulic – cement mortars exposed to a sulfate solution. West Conshohocken, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 856: practice for petrographic examination of hardened concrete. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 1995. Reimpressão 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 632: standard recommended practice for developing short term accelerated test for prediction of the service life of building components and materials. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, 1978. Rev. 1982. Reaprovado em 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 917: standard practice for measuring life-cycle costs for buildings and building systems. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 1994. p. 265-277.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C143/C143M: standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

AMES, I. et al. Modelagem e avaliação experimental de dormentes de concreto protendido submetidos ao ensaio de momento positivo no meio do vão. 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC 2024, **Anais...** Maceió-Alagoas, 2024.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução de Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: PINI, 1992. 104 p.

ANDRADE, J. J. O. Vida útil das estruturas de concreto armado. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 923-951.

ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, p. 1–8, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: **Concreto — determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 5 p.

BÉRUBÉ, M.-A. et al. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part III: Application to existing structures. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 32, n. 3, p. 463–479, 2005.

BU, Changming et al. The durability of recycled fine aggregate concrete: **A review**. **Materials**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 1110, 31 jan. 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ma15031110>>.

CANADIAN STANDARD ASSOCIATION. CSA A864: **Guide to the Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali-aggregate Reaction**. 2005.

ÇEÇEN, F. et al. Comparative modal analysis of B70 and LCR-6 type railway sleepers after repeated impact loads. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 336, p. 127563, jun. 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127563>>.

CHOI, J.-Y. et al. Experimental study on dynamic characteristics of damaged post-tensioning concrete sleepers using impact hammer. **Materials**, v. 17, p. 1581, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma17071581>>.

CHOI, J.-Y. et al. Structural integrity assessment of concrete sleepers by modal test technique. **Materials**, v. 16, p. 5614, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma16165614>>.

CLARK, A. et al. Damage detection in railway prestressed concrete sleepers using acoustic emission. In: **Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IMST 2017, Riga, Latvia, 27–29 September 2017. v. 251, p. 012068.

CLIFTON, J. R. Methods for predicting the remaining service life of concrete. INTERNATIONAL CONFERENCE - DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 5th, Brighton, 1990. **Proceedings...** Reino Unido, p. 361-373.

COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G. Interlocking concrete blocks produced with sinter feed tailings. **IBRACON Structures and Materials Journal**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 228-259, abr. 2014.

COUTINHO, J. S. **Melhoria da durabilidade de betões por tratamento da cofragem**. Porto: FEUP, 2005.

CRISP, T. M.; WALDRON, P.; WOOD, J. G. M. Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 45, n. 165, 1989.

CRISP, T. M.; WOOD, J. G. M.; NORRIS, P. Towards quantification of microstructural damage in AAR deteriorated concrete. INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT DEVELOPMENTS ON THE FRACTURE OF CONCRETE AND ROCK, **Proceedings...** setembro 1993.

DA SILVA, T. J. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. Tese (Doutorado). Universidad Politécnica de Catalunya. ETSCCP. Barcelona, 1998. 290 p.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 32, n. 8, p. 555-562, set. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>>.

FOURNIER, B. et al. Evaluation of the alkali content in concrete through a modified hot-water extraction method. 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, São Paulo, Brasil, **Proceedings...** 2016.

FOURNIER, B.; SANCHEZ, L.; BEAUCHEMIN, S. Outils d'investigation de la réactivité alcalis granulats dans les infrastructures en béton. **Rapport final**. Ministère des Transports du Québec, Canadá, 2015.

GARG, Himanshu; SATYAPRAKASH. Durability of concrete made with steel filings as a replacement of fine aggregate. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 49, p. 3217-3221, 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.146>>. Acesso em: [data de acesso].

GLOBAL RAILWAY SLEEPERS MARKET INSIGHTS, FORECAST TO 2025. Industrial Research, 2019. Disponível em: <<https://www.industryresearch.biz/global-railway-sleepers-market-13972693>>. Acesso em: 5 dez. 2021.

GUIRGUIS, B. et al. The application of a new oxidation mortar bar test to mixtures containing different cementing systems. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 173, p. 775-785, jun. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.026>>.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, VI, Porto Alegre, 1997. **Anais...** Rio Grande do Sul: CONPAT, 1997.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de Engenharia de Estruturas de Concreto: Bases e Aplicações**. São Paulo: Pini Editora, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1920-12: Testing of concrete — Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete — Accelerated carbonation method. Londres, 2015.

JAYASIMHA, N. et al. A study on durability and strength properties of high strength concrete with partial replacement of iron ore tailings with fine aggregates. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 65, p. 1922-1929, 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.163>>.

LI, D.; KAEWUNRUEN, S.; YOU, R. Time-dependent behaviours of railway prestressed concrete sleepers in a track system. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 127, p. 105500, set. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105500>>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. Revisores: Nicole P. Hasparyk, Paulo Helene e Vladimir A. Paulon. Tradução da 3ª edição em inglês sob o título Concrete: Microstructure, Properties and Materials.

MERZ, C.; LEEMANN, A. Assessment of the residual expansion potential of concrete from structures damaged by AAR. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 182-189, 2013.

MORAIS, C. F. et al. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 268, p. 121073-1, jan. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121073>>.

MORAIS, J.; FORTUNATO, E.; RIBEIRO, D.; MENDES, J. Railway substructure modeling approach for modal analysis using multibody simulation. **Applied Sciences**, 2024, v. 14, p. 6510. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app14156510>>.

NIELSEN, D.; PALMER, E. Modal analysis experiments on prestressed concrete sleepers. 16TH EAST ASIAN-PACIFIC CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION, Brisbane, Australia, 3–6 dezembro. **Proceedings...** 2019.

NIELSEN, D.; PALMER, E. Modal analysis experiments on prestressed concrete sleepers. **Lecture Notes in Civil Engineering**, [S.L.], p. 277-287, 23 dez. 2021. Springer Singapore. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-8079-6\\_27](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-8079-6_27)>.

OBERHOLSTER, R. E.; DU TOIT, P.; PRETONIUS, J. L. Deterioration of concrete containing a carbonaceous sulphide-bearing aggregate. SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, International Cement Microscopy Association (ICMA), Eds. Albuquerque, New Mexico, USA, 26–29 mar. **Proceedings...** 1984.

POOLE, A. B.; SIMS, I. **Concrete petrography: a handbook of investigative techniques**. 2. ed. Londres: Thomas Telford, 2016. 780 p.

PROTASIO, F. N. M. et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 278, jan. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123929>>.

RANDI, R. P.; TRAUTWEIN, L. M.; SANTOS, A. C. Aspectos da modelagem de dormentes de concreto protendido submetidos a ensaio de momento positivo no meio do vão. **Edifícios**, v. 14, n. 8, p. 2387, ago. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/buildings14082387>>.

RODRIGUES, A. et al. Mineralogical and chemical assessment of concrete damaged by the oxidation of sulfide-bearing aggregates: importance of thaumasite formation on reaction mechanisms. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 42, n. 10, p. 1336-1347, out. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.06.008>>.

ROZA, E. et al. Wastes in railway maintenance: losses due to waiting times at the Ponta da Madeira railway terminal in São Luís, Maranhão. **Produção Online**, v. 21, n. 3, set. 2021, p. 654+.

SANCHEZ, L. F. M. et al. Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 106, p. 284-303, 2018.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 120, p. 72-79, set. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>>.

SMAOUI, N. et al. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by ASR – Part I: experimental study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 31, p. 826–845, 2004.

SMOLCZYK, H. G. The International Symposium on the Chemistry of Cement, V. Tokyo, 1969. **Proceedings...** Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p. 369-384.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Editora PINI, 1998. ISBN 8572660968.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. Thomas Telford, 1997. p. 470.

VILLENEUVE, B. Fournier. Determination of the damage in concrete affected by ASR – the damage rating index (DRI). 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION (ICAAAR), Texas, USA. **Proceedings...** 2012.

WALKER, H. N.; LANE, D. S.; STUTZMAN, P. E. Petrographic methods of examining hardened concrete. **Petrographic Manual**. Virginia: Transportation Research Council, 2004.

XINGDONG, L.V. et al. Environmental impact, durability performance, and interfacial transition zone of iron ore tailings utilized as dam concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 292, p. 126068, abr. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126068>>.

YAO, G. et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement. **Powder Technology**, [S.L.], v. 360, p. 863-871, jan. 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.002>>.

ZENG, Y. et al. An interpretable method for operational modal analysis in time-frequency representation and its applications to railway sleepers. **Structural Control and Health Monitoring**, [S.L.], v. 2023, p. 1-26, 14 jul. 2023. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2023/6420772>>.

ZHANG, W. et al. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 260, nov. 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119917>>.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 50, p. 540-548, jan. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>>.

## **9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO**

I - Resumo do Plano de Trabalho;

II - Cronograma físico-financeiro do projeto;

III - Propostas técnicas e comerciais dos terceirizados que irão participar do projeto;

IV - Cotações comerciais;

V - Currículo dos coordenadores em formato .pdf;

VI - Orçamento analítico previsto;

VII - Lista de bens, produtos e estudos com previsão de transferência; e

VIII - Declaração de observância ao disposto na Resolução nº 6.021, de 2023, e na Portaria nº 17, de 2023