

**ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres**

**RDT - Recurso de Desenvolvimento Tecnológico**

## **PLANO DE TRABALHO**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE TOPO POR  
CENTELHAMENTO (FLASH BUTT WELD – FBW) EM TRILHOS  
FERROVIÁRIOS UTILIZANDO UM SIMULADOR  
TERMOMECÂNICO GLEEBLE 563**

**TEMA PRIORITÁRIO: PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DE  
SOLUÇÕES PARA AUMENTO DA SEGURANÇA FERROVIÁRIA,  
COM FOCO PRINCIPAL EM PASSAGENS DE NÍVEL E LOCAIS  
CRÍTICOS**

**VALE S.A. – Estrada de Ferro Vitória a Minas**

**20/05/2025**

## SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO .....	3
1.1. Título do Projeto: .....	3
1.1.1. Linha de inovação e desenvolvimento .....	3
1.1.2. Temas.....	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo Geral.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
2. JUSTIFICATIVA.....	4
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	6
3.1. Métodos e técnicas utilizadas .....	6
3.1.1 Referencial teórico .....	7
3.1.2 Justificativa e descrição dos materiais, equipamentos, ferramentas e softwares.....	9
3.1.3 Adequações de infraestrutura laboratorial.....	11
3.1.4 Projetos Científicos e Acadêmicos Vinculados ao Projeto .....	11
3.1.5 Treinamentos Técnicos e Workshops .....	12
3.2. Etapas.....	13
3.2.1 Etapa 1: Planejamento Inicial e Definição de Parâmetros.....	13
3.2.2 Etapa 2: Execução das Simulações e Ensaios Experimentais .....	13
3.2.3 Etapa 3: Análise dos Resultados e Desenvolvimento de Modelos .....	14
3.2.4 Etapa 4: Proposição de Melhorias e Transferência de Tecnologia .....	14
4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL .....	15
5. LOCAL DE EXECUÇÃO.....	15
6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA .....	16
6.1. Identificação da entidade.....	16
6.2. Identificação da equipe executora .....	17
7. PRODUTOS.....	18
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS .....	19
9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO .....	22

# **1. DESCRIÇÃO DO PROJETO**

## **1.1. Título do Projeto:**

Otimização do Processo de Soldagem de Topo por Centelhamento (Flash Butt Weld – FBW) em Trilhos Ferroviários Utilizando um Simulador Termomecânico Gleeble 563.

### **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 no inciso II do artigo 3º: “melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas”.

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 “tecnologia básica e aplicada” e “soluções técnicas para problemas específicos”, conforme descrito nos incisos II e III do artigo 4º.

### **1.1.2. Temas**

Soldagem de topo de trilhos ferroviários, integridade estrutural de juntas soldadas, entendimento dos efeitos da soldagem sobre as propriedades mecânicas dos trilhos ferroviários, impacto da composição química das diferentes zonas da solda, análise dos ciclos térmicos gerados durante a soldagem, otimização de parâmetros de soldagem.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Investigar e otimizar os parâmetros do processo de soldagem de topo de trilhos ferroviários por centelhamento (Flash Butt Welding - FBW) utilizando o simulador termomecânico Gleeble 563, a fim de melhorar as propriedades mecânicas e a integridade estrutural das juntas soldadas, visando aproximar a vida útil da solda à do trilho.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Simular o Processo de Soldagem FBW utilizando o simulador Gleeble 563 do LabEnsaio do IFMA para reproduzir as condições reais de soldagem de trilhos ferroviários.
- Analisar as Propriedades Mecânicas por meio testes de microdureza, impacto Charpy e tração nas várias regiões da junta soldada (metal base, zona de solda e zona afetada pelo calor).
- Caracterizar as microestruturas das zonas de solda por técnicas de microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por energia dispersiva (EDS), e difração de elétrons retroespalhados (EBSD).
- Estudar os Efeitos dos Parâmetros de Soldagem como corrente elétrica, tempo de

aquecimento e pressão de compressão e avaliar suas influências na qualidade das juntas soldadas.

- Correlacionar os ciclos térmicos com as transformações de fase e propriedades mecânicas resultantes.
- Criar modelos teóricos e empíricos para prever o comportamento das juntas soldadas sob diferentes condições de soldagem.
- Propor Melhoria nos Parâmetros de Processo FBW para otimizar as características metalúrgicas e mecânicas das juntas soldadas, visando aumentar a durabilidade e segurança dos trilhos ferroviários.

## **2. JUSTIFICATIVA**

Este projeto está sendo proposto devido à importância crítica da soldagem de trilhos para a segurança, eficiência e durabilidade das operações ferroviárias.

A soldagem desempenha um papel importante e significativo na segurança, eficiência e durabilidade das operações ferroviárias, aspectos essenciais para a confiabilidade do transporte ferroviário. Soldas de qualidade garantem a continuidade estrutural dos trilhos, minimizando o risco de falhas críticas, como trincas ou fraturas, que podem levar a acidentes graves, como descarrilamentos. Além disso, a uniformidade das soldas impacta diretamente a eficiência operacional, ao evitar irregularidades que geram desgaste excessivo nos trilhos e nas rodas, aumentando o consumo energético e os custos de manutenção. Processos de soldagem otimizados ampliam a durabilidade dos trilhos e reduzem a necessidade de intervenções frequentes, promovendo maior vida útil e diminuindo os custos operacionais ao longo do tempo. A relevância desses fatores justifica a proposta deste projeto, que busca contribuir para um transporte ferroviário mais seguro, eficiente e sustentável.

Deste modo, busca-se trazer para uma escala laboratorial o processo de soldagem aplicado em campo como no estaleiro assim como em solda móvel em caminhão de soldagem, permitindo a avaliação controlada de trilhos ferroviários de diferentes fornecedores, possibilitando identificar variáveis críticas e propor melhorias com base em evidências científicas e testes padronizados.

O processo de soldagem atualmente é considerado estável, mas ainda apresenta oportunidades significativas de melhoria. Uma das principais limitações é a vida útil da solda, que permanece inferior à do trilho, comprometendo a durabilidade do conjunto. Este projeto busca reduzir essa lacuna, visando alcançar uma vida útil da solda mais próxima à do trilho. O aumento da durabilidade desse componente resulta na melhoria da qualidade do serviço prestado, como também na confirmação de benefícios diretos para a segurança das operações ferroviárias.

Como um fator inovador, a integração de um simulador termomecânico Gleeble 563 no processo permite a reprodução controlada das condições reais de soldagem, proporcionando uma oportunidade única para otimizar parâmetros que impactam diretamente a qualidade das juntas soldadas dos trilhos ferroviários. Essas otimizações podem trazer benefícios significativos ao setor ferroviário, como a redução de falhas estruturais e o aumento da vida útil dos trilhos, aspectos fundamentais para manter a segurança nas operações.

A otimização dos parâmetros do processo de soldagem de trilhos resultará em juntas soldadas mais resistentes e seguras, reduzindo a necessidade de manutenções e aumentando a confiabilidade operacional. As inovações propostas permitirão à indústria

ferroviária diminuir o tempo de inatividade e reduzir os custos operacionais, garantindo maior segurança para passageiros e cargas. As concessionárias ferroviárias se beneficiarão diretamente ao implementar tecnologias que otimizam o processo de soldagem diminuindo gastos excessivos com manutenção corretivas. Esses avanços podem melhorar a competitividade das concessionárias, agregando valor às suas operações e serviços. Tanto a União quanto as sociedades se beneficiarão com o aumento da eficiência do transporte de cargas e passageiros e consequente impacto positivo no desenvolvimento econômico e na infraestrutura do país.

Através do uso de tecnologias avançadas, como o simulador Gleeble 563, o projeto oferece uma abordagem inédita para otimizar a soldagem de trilhos e gerar novos conhecimentos técnicos aplicáveis às operações ferroviárias. Isso proporcionará inovações quanto à otimização de parâmetros do processo de FBW (corrente, tempo de aquecimento e pressão). Serão desenvolvidos modelos preditivos baseados em dados empíricos para prever o comportamento das juntas soldadas em diferentes condições operacionais, e aplicação de análises avançadas de microestrutura e propriedades mecânicas das regiões soldadas para melhorar a compreensão dos processos físicos e metalúrgicos que ocorrem durante a soldagem de trilhos.

Este projeto promove a eficiência e segurança ferroviária, trazendo conhecimentos relevantes para a definição de parâmetros de processo de solda para alcançar maior resistência, resultando em maior qualidade e durabilidade das soldas nos trilhos, atendendo ao inciso II do artigo 3º da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023: “melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas”.

Seus resultados também se correlacionam com os incisos II (tecnologia básica e aplicada) e III (soluções técnicas para problemas específicos) do artigo 4º da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, visto que contribuem para a modernização da infraestrutura ferroviária ao introduzir novos métodos e técnicas baseadas em simulação termomecânica para aprimorar processos industriais, fomentando a inovação tecnológica no setor através do desenvolvimento de novos parâmetros e soluções aplicáveis à soldagem de trilhos, impactando positivamente na resolução da problemática de soldas com vida útil inferior aos dos trilhos.

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. Não se destinando 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.

### **3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

#### **3.1. Métodos e técnicas utilizadas**

Este projeto visa a otimização do processo de soldagem de trilhos ferroviários por centelhamento (Flash Butt Welding - FBW) utilizando o simulador termomecânico Gleeble 563. As atividades se desenvolverão em simulações experimentais, ensaios mecânicos e caracterizações microestruturais, e análise, otimização de parâmetros de soldagem e testes.

A simulação do processo de soldagem será conduzida no Gleeble 563, um equipamento que permite reproduzir as condições termomecânicas de soldagem de trilhos em escala de laboratório, simulando com precisão os ciclos térmicos e mecânicos. O objetivo é replicar as condições reais de soldagem de trilhos ferroviários para melhor entendimento dos parâmetros críticos que afetam a qualidade da solda como temperatura de soldagem e sua influência na fusão e penetração da solda, tempo de aquecimento para controlar a taxa de fusão e a formação de microestruturas desejáveis e força de recalque para avaliar a formação de defeitos como porosidade e descontinuidades na solda.

Os ensaios mecânicos serão realizados para avaliar as propriedades das juntas soldadas e verificar a integridade estrutural das soldas os quais estão incluídos:

- Teste de microdureza para medir a variação de dureza em diferentes regiões da junta soldada, como a zona fundida (ZF), a zona afetada pelo calor (ZAC) e o metal base (MB) Procedimento: Mapeamento da dureza ao longo da seção transversal das juntas para identificar a influência dos parâmetros de soldagem nas propriedades locais.
- Ensaio de impacto Charpy aplicado para medir a resistência ao impacto nas diferentes regiões da junta soldada. Amostras serão extraídas da solda e submetidas a testes de impacto à temperatura ambiente e em baixas temperaturas, permitindo a avaliação da tenacidade do material.
- Ensaio de tração com o objetivo em medir a resistência à tração, o limite de escoamento e a deformação na fratura das juntas soldadas. Corpos de prova serão retirados das soldas, e as propriedades mecânicas serão correlacionadas com as microestruturas formadas durante a soldagem.

A caracterização microestrutural é essencial para entender as transformações que ocorrem nas diferentes zonas da solda e como elas afetam as propriedades mecânicas.

- Microscopia Óptica (MO): será utilizada para a análise inicial das microestruturas formadas nas zonas soldadas permitindo observar a morfologia dos grãos e possíveis defeitos, como trincas ou descontinuidades. As amostras serão preparadas por lixamento e polimento, e em seguida, atacadas quimicamente para revelar as microestruturas.
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) serão utilizadas para análises mais detalhadas da microestrutura e da composição química das diferentes zonas da solda. O MEV fornecerá imagens de alta resolução das regiões soldadas, enquanto o EDS ajudará a identificar variações na composição química, como segregação de elementos durante o processo de soldagem. Serão obtidas micrografias de alta resolução, e o EDS será usado para mapear a distribuição de elementos químicos, especialmente aqueles críticos para a formação de fases indesejadas.

- Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD): esta técnica permitirá a análise das texturas cristalinas e a identificação de orientações de grãos e fases presentes nas diferentes zonas da solda, possibilitando a compreensão das transformações de fase induzidas pelo calor durante a soldagem.

A análise dos ciclos térmicos gerados durante a soldagem será fundamental para correlacionar os parâmetros de soldagem com as propriedades resultantes da solda.

Utilizando os dados dos ciclos térmicos gerados durante as simulações no simulador Gleeble 563, será realizada uma análise detalhada das transformações de fase. Técnicas como difração de raios X (DRX) serão empregadas para identificar as fases presentes nas juntas soldadas.

Os dados coletados dos ensaios e simulações serão utilizados para criar modelos teóricos e empíricos que correlacionem os parâmetros de soldagem com as propriedades mecânicas e microestruturais.

Utilizando os resultados experimentais, serão desenvolvidos modelos para prever o comportamento das juntas soldadas sob diferentes condições operacionais. Esses modelos ajudarão a determinar os parâmetros ótimos para maximizar a resistência e a durabilidade das soldas.

Com base nas análises de microestrutura e propriedades mecânicas, serão propostas melhorias nos parâmetros de soldagem (corrente, tempo de aquecimento, pressão) para garantir a formação de juntas soldadas com propriedades metalúrgicas superiores, aumentando a vida útil e a segurança dos trilhos ferroviários.

Por fim, após a otimização dos parâmetros em laboratório, a equipe de pesquisa sugere que sejam mantidas as conexões entre a academia e o setor industrial afim de acompanhamentos de dados de parâmetros de processos no estaleiro de solda da ferrovia testados em condições operacionais. Os acompanhamentos desses dados permitirão avaliar a performance a longo prazo das juntas soldadas otimizadas, validando os resultados obtidos no laboratório sob condições reais de operação ferroviária.

### **3.1.1. Referencial teórico**

Uma das importantes tecnologias de soldagem por resistência elétrica, o processo de soldagem de topo por centelhamento (Flash Butt Weld – FBW) é amplamente utilizado em várias indústrias como transporte, óleo e gás, e ferrovias na união de trilhos ferroviários entre outras [1–4]. Durante o processo de FBW, os dois lados da estrutura que serão soldadas ficam em contato enquanto são rapidamente aquecidas até fundirem-se proporcionado a sua união através do calor de resistência gerado pela corrente elétrica. Um dos lados é fixado e o outro é comprimido através de um sistema móvel. Quando o metal da superfície de contato for suficientemente aquecido garantindo assim certa plasticidade no metal, a corrente de centelhamento é interrompida e a parte móvel aplica uma força de compressão para unir as superfícies de contato [5–8]. Este processo pode ser caracterizado como uma combinação de fusão e forjamento que produzem juntas soldadas com desempenho mecânico superior comparável ao metal de base [6,7,9]. Esta técnica apresenta vantagens sobre os processos de soldagem convencional devido a sua alta eficiência, boa conformabilidade e independência de arame de enchimento adicional de soldagem [5,10,11].

A microestrutura dos aços empregados em trilhos ferroviários é majoritariamente perlítica [12,13]. Para aumentar a dureza superficial dos trilhos e reduzir o desgaste nas áreas de contato entre roda e trilho, os métodos mais utilizados têm sido a redução do espaçamento

interlamelar da perlita por meio de tratamentos térmicos e/ou a incorporação de elementos de liga [12,14,15]. Pesquisas anteriores [16,17] demonstraram que o tamanho do grão austenítico anterior influencia no espaçamento interlamelar da perlita o que afeta as propriedades mecânicas dos trilhos ferroviários. Estudos detalhados sobre a evolução estrutural dos trilhos perlíticos durante o processo de soldagem por flash-butt (FBW) ainda são poucos [18]. Técnicas como dilatométrica para correlacionar aspectos dos ciclos térmicos da soldagem, como a temperatura máxima e as taxas de resfriamento, com o desenvolvimento da microestrutura e as propriedades resultantes também são de suma importância neste contexto [19–21].

- **Soldagem de topo por Centelhamento (Flash Butt Welding - FBW)**

Em qualquer processo de soldagem por resistência, duas ou mais peças de metal são unidas por calor e pressão por um período controlado. A fórmula básica é expressa como:

$$Q=i^2 \times R \times t$$

Onde, Q é calor envolvido no processo, i é a corrente elétrica e t o tempo de exposição.

No processo FBW, os dois lados do metal a serem unidos são colocados em contato ou a certa distância com o intuito de provocar centelhamento enquanto uma corrente elétrica é passada através deles, aquecendo as superfícies de contato até a temperatura apropriada para facilitar a difusão dos átomos entre as duas superfícies [5]. A combinação de fusão e forjamento resulta em uma junta soldada com propriedades mecânicas superiores e alta integridade estrutural [22,23].

Durante a soldagem por FBW, as altas temperaturas e as rápidas taxas de resfriamento induzem transformações de fase significativas na microestrutura do aço [2,3,8]. A zona afetada pelo calor (ZAC) e a zona de solda (ZS) experimentam mudanças na distribuição de fases, tamanho de grão e a formação de novos constituintes, que podem impactar diretamente as propriedades mecânicas da junta soldada. Estudos como os de Chaves et al. [15] e Mishra et al. [16] destacam a importância do tamanho do grão austenítico anterior e a esferoidização da cementita na determinação das características finais da perlita [13,17].

Os parâmetros de soldagem, como a corrente elétrica, temperatura, tempo de aquecimento e pressão de compressão, são críticos na determinação da qualidade da junta soldada [24,25]. A correta combinação desses parâmetros pode minimizar defeitos como porosidade, trincas e descontinuidades, assegurando a integridade estrutural e as propriedades mecânicas desejadas [26,27].

- **Aplicações e Impactos na Indústria Ferroviária**

Os trilhos ferroviários são predominantemente compostos por aço perlítico, uma microestrutura caracterizada por lamelas de ferrita e cementita [12,14,15]. A perlita oferece uma combinação de dureza e tenacidade, essencial para suportar as altas cargas e desgaste nas interfaces roda-trilho. Como mencionando anteriormente, modificações na microestrutura, como redução do espaçamento interlamelar da perlita, podem ser obtidas por tratamentos térmicos ou adição de elementos de liga, melhorando a resistência ao desgaste e a dureza superficial [16]. A otimização do processo de soldagem de trilhos por FBW é vital para a manutenção e operação segura das ferrovias. Juntas soldadas de alta qualidade garantem maior durabilidade dos trilhos, reduzindo custos de manutenção e aumentando a eficiência operacional [18]. Além disso, o aprimoramento das técnicas de soldagem contribui para a segurança do transporte ferroviário, prevenindo falhas catastróficas e assegurando um serviço de transporte confiável e seguro [28,29].

### 3.1.2. Justificativa e descrição dos materiais, equipamentos, ferramentas e softwares

Para a execução e sucesso do projeto de otimização do processo de soldagem de trilhos ferroviários por centelhamento (FBW) utilizando o simulador termomecânico Gleeble 563, será necessário o uso e/ou aquisição de diversos materiais, equipamentos, ferramentas e softwares. Abaixo estão discriminados os principais recursos que serão empregados, assim como sua importância para a obtenção dos resultados esperados.

- Simulador Termomecânico Gleeble 563: Este equipamento pertence ao LabEnsaio do IFMA e foi adquirido recentemente através de um projeto FINEP-MCTI. Este equipamento realiza simulações termomecânicas do processo de soldagem FBW, reproduzindo as condições reais de soldagem e controle preciso dos parâmetros de temperatura e deformação. O simulador Gleeble 563 é essencial para o desenvolvimento do projeto, pois permitirá a análise detalhada dos parâmetros de soldagem e sua influência nas propriedades das juntas soldadas.
- A manutenção e calibração do simulador termomecânico Gleeble será realizada anualmente (uma vez ao ano) de forma a manter o simulador funcional e certificado.
- Software JmatPro: possui a finalidade de realizar simulações termodinâmicas para prever as transformações de fase que ocorrem durante o ciclo térmico de soldagem, permitindo o ajuste fino dos parâmetros de soldagem auxiliando na análise das transformações metalúrgicas para otimizar a microestrutura resultante. O JMatPro é uma ferramenta indispensável. Adicionalmente, este software permite realizar simulações de propriedades mecânicas e previsões de comportamento sob diferentes condições termomecânicas. O JMatPro permitirá uma análise mais detalhada das propriedades físicas e mecânicas dos materiais durante o processo de soldagem. Este software será adquirido com recursos advindo do projeto. A licença prevista é a acadêmica, Módulo de ligas de Fe (inclui aços em geral, aços inox e ferros fundidos).
- Equipamentos para Preparação de Amostras Metalográficas: Estes equipamentos serão utilizados para preparar amostras de qualidade para as análises metalográficas, sendo cruciais para o sucesso das análises microestruturais das soldas. Estes equipamentos serão adquiridos com recursos advindo do projeto com o objetivo de ficarem dedicados a atender o projeto.
  - Cortadora de Precisão: cortar amostras de forma precisa sem induzir deformações excessivas ou danificar a microestrutura. Garantir cortes limpos e exatos, essenciais para a qualidade das amostras que serão analisadas em microscopia óptica e eletrônica.
  - Politriz Automática: polir as amostras após o corte, removendo imperfeições superficiais e preparando-as para observação em microscópios. O polimento adequado é essencial para que as microestruturas possam ser analisadas com clareza, sem interferências causadas por superfícies irregulares.
  - Politriz Minimet 1000: realizar polimento automático de amostras pequenas com controle preciso de força e tempo, garantindo superfícies de alta qualidade. Esse equipamento permitirá preparar amostras com precisão, especialmente em áreas críticas, como as diferentes zonas da solda para avaliação por EBSD.
  - Embutidora Metalográfica: embutir amostras metálicas em resinas específicas para facilitar o manuseio durante as fases de polimento e análise. Esse

equipamento facilita o preparo de amostras pequenas e delicadas, como as obtidas da zona de solda, garantindo que possam ser trabalhadas sem o risco de danos.

- Máquina Universal de Tração: esse equipamento realiza testes de tração para avaliar a resistência mecânica e a deformação das juntas soldadas. Os ensaios de tração são fundamentais para verificar a integridade estrutural das soldas, permitindo a avaliação da resistência à tração, limite de escoamento e alongamento na fratura. Esse equipamento é essencial para confirmar se as juntas soldadas atingem os requisitos de resistência esperados. Este equipamento faz parte da infraestrutura existente no IFMA.
- Microscópio Óptico (MO): equipamento pertencente ao LabEnsaios – IFMA que irá realizar a análise inicial da morfologia dos grãos e identificar possíveis defeitos ou trincas. O MO é uma ferramenta básica, mas essencial, para observar as microestruturas resultantes da soldagem.
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): fornecer imagens de alta resolução das diferentes zonas da solda, permitindo observar microestruturas em nível mais profundo, como a forma e o tamanho dos grãos e fases presentes. Crucial para análises detalhadas de microestruturas e defeitos na solda, como porosidades e trincas. Este equipamento pertence ao laboratório LabEnsaios do IFMA e a sua utilização é paga.
- Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS): analisar a composição química das diferentes zonas da solda. O EDS auxiliará na identificação de elementos críticos na solda, principalmente em regiões onde há segregação de elementos durante o processo. A análise de composição química está associada ao MEV, durante a hora de utilização do microscópio.
- Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD): estudar a orientação cristalográfica dos grãos e as transformações de fase que ocorrem durante a soldagem. O EBSD fornecerá uma análise detalhada das texturas e orientações cristalinas, permitindo uma correlação mais precisa entre os parâmetros de soldagem e as propriedades microestruturais. A análise de EBSD está associada ao MEV, durante a hora de utilização do microscópio.
- Microdurômetro: realizar medições de microdureza nas diferentes zonas da junta soldada (metal base, zona de solda e zona afetada pelo calor), permitindo a caracterização detalhada das propriedades mecânicas locais. Este equipamento pertence ao laboratório LabEnsaios do IFMA.
- Máquina de Ensaio de Impacto: realizar ensaios de impacto Charpy para avaliar a tenacidade das juntas soldadas, especialmente em diferentes temperaturas, analisando a absorção de energia nas zonas críticas da solda. O ensaio de impacto é fundamental para determinar a resistência ao impacto e a capacidade das juntas soldadas de suportar cargas dinâmicas, fornecendo informações sobre a fragilidade ou ductilidade da solda. Esta máquina pertence ao laboratório LabEnsaios do IFMA.

Alguns dos equipamentos mencionados, como o simulador termomecânico Gleeble 563, Microdurômetro, Máquina de Ensaio de Impacto e os microscópios, já estão disponíveis no laboratório. No entanto, equipamentos para preparação de amostras, como a politriz, cortadora de precisão e embutidora serão adquiridos com recursos advindos mediante aprovação do projeto.

- Materiais Consumíveis que deverão ser adquiridos para atender o projeto no desenvolvimento das atividades experimentais
  - Serão utilizados termopares tipo K e R nas simulações de soldagem. Sendo que os termopares do tipo K atingem a temperatura de 1200 °C e são utilizados para ensaios de dilatométrica. Enquanto os termopares do tipo R atingem temperaturas superiores a 1600 °C;
  - Folhas finas de Tântalo puro para evitar difusão do metal soldado e as garras da Gleeble;
  - Resinas para embutimento: utilizadas para encapsular as amostras durante o preparo metalográfico;
  - Lixas e polidores: consumíveis para as etapas de lixamento e polimento das amostras;
  - Discos abrasivos e discos diamantados para cortes das amostras;
  - Garras para Gleeble: garras em cobre e em aço inoxidável.

### **3.1.3. Adequações de infraestrutura laboratorial**

A infraestrutura existente será reformada para alocar os novos equipamentos. No local será construída uma parede em alvenaria, uma bancada de trabalho com uma pia, instalação de uma porta e uma janela. Neste local também serão instaladas a rede elétrica e hidráulica conforme a especificidade de cada equipamento.

A reforma do laboratório de preparação de amostras para metalografia é uma necessidade crítica para atender à nova demanda de pesquisa. As modificações propostas não apenas criam um espaço dedicado e funcional, mas também asseguram que o ambiente atenda aos padrões de segurança e eficiência necessários para a realização de estudos de qualidade. A criação deste espaço físico é, portanto, essencial para o sucesso das atividades de pesquisa, contribuindo para o avanço do conhecimento na área proposta.

### **3.1.4. Projetos Científicos e Acadêmicos Vinculados ao Projeto**

O desenvolvimento do projeto permitirá a criação de diversas iniciativas científicas e acadêmicas, impactando tanto o avanço do conhecimento quanto a formação de novos pesquisadores. Abaixo estão discriminados os principais projetos que serão desenvolvidos em função desse projeto principal:

#### **I. Projeto de Pesquisa de Mestrado**

Título: "Análise da Influência dos Parâmetros de Soldagem de Centelhamento nos Trilhos Ferroviários"

Objetivo: estudar os efeitos dos diferentes parâmetros de soldagem (corrente, tempo de aquecimento e pressão de compressão) sobre as propriedades microestruturais e mecânicas das juntas soldadas.

Importância: esse projeto será fundamental para a formação de novos mestres em áreas relacionadas à engenharia de materiais e ferrovias, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico do setor ferroviário.

#### **II. Projeto de Iniciação Científica**

Título: "Caracterização Microestrutural das Juntas Soldadas por FBW em Trilhos

## Ferrovíários"

Objetivo: analisar as microestruturas formadas nas diferentes zonas da solda (zona de fusão, metal base e zona termicamente afetada) utilizando técnicas de microscopia ótica e eletrônica.

Importância: este projeto visa introduzir alunos de graduação às técnicas avançadas de caracterização de materiais, fornecendo experiência prática e ajudando a formar futuros pesquisadores.

### III. Projeto de Extensão

Título: "Popularização da Engenharia Ferroviária: Processos de Soldagem de Trilhos e Impactos na Infraestrutura Nacional"

Objetivo: difundir o conhecimento sobre os processos de soldagem de trilhos e seu impacto na segurança e eficiência das operações ferroviárias para o público em geral e alunos de escolas técnicas.

Importância: esse projeto de extensão permitirá maior interação entre as instituições acadêmicas e a comunidade, promovendo o interesse por temas de engenharia ferroviária e despertando vocações em jovens estudantes.

### IV. Projeto de Pesquisa Aplicada em Parceria com Indústrias Ferroviárias

Título: "Otimização de Processos de Manutenção Ferroviária através da Soldagem FBW"

Objetivo: trabalhar em conjunto com concessionárias ferroviárias e indústrias do setor para adaptar os resultados da pesquisa às práticas industriais e de manutenção de trilhos ferroviários.

Importância: este projeto permitirá a transferência de tecnologia para o setor produtivo, promovendo inovações que possam ser aplicadas diretamente nas operações ferroviárias, aumentando a segurança e a eficiência do transporte ferroviário no Brasil.

### V. Publicação de Artigos Científicos

Descrição: o projeto gerará dados e resultados que serão disseminados por meio da publicação de artigos científicos em revistas de alto impacto nas áreas de engenharia de materiais e ferrovias, além da apresentação de resultados em congressos nacionais e internacionais.

Importância: a disseminação do conhecimento gerado pelo projeto contribuirá para o reconhecimento internacional da pesquisa, além de possibilitar a troca de experiências e conhecimento com outros pesquisadores e profissionais da área.

## **3.1.5. Treinamentos Técnicos e Workshops**

Descrição: realização de treinamentos e workshops técnicos com foco nos operadores de soldagem e profissionais envolvidos na manutenção ferroviária, oferecendo uma formação atualizada com base nos avanços do projeto.

Importância: esses treinamentos vão proporcionar a capacitação de profissionais do setor ferroviário, promovendo a aplicação prática dos conhecimentos gerados no projeto.

Estes treinamentos e workshops serão realizados no IFMA ou na concessionária e abrangerá conhecimentos de metalurgia física da soldagem em trilhos, tema de suma importância científica para todos os níveis de colaboradores envolvidos com soldagem em trilhos ferroviários.

### **3.2. Etapas**

O projeto será desenvolvido em etapas sequenciais, cada uma com atividades específicas e métodos definidos. Estas estão detalhadas com suas respectivas atividades, métodos adotados e a relevância para o sucesso do projeto.

#### **3.2.1. Etapa 1: Planejamento Inicial e Definição de Parâmetros**

Objetiva-se definir os parâmetros técnicos iniciais do processo de soldagem por centelhamento (Flash Butt Welding - FBW) e os ensaios a serem realizados, com as seguintes atividades previstas.

- Atividade A: Revisão da literatura técnica: pesquisa sobre processos de soldagem FBW em trilhos ferroviários e análise de casos de estudo anteriores.

Método: revisão bibliográfica de artigos científicos, patentes e normas técnicas relacionadas ao processo FBW.

Produto esperado: relatório técnico sobre os parâmetros de soldagem e características de trilhos ferroviários.

- Atividade B: Seleção dos parâmetros iniciais de soldagem: escolha dos parâmetros de corrente elétrica, tempo de aquecimento, pressão de compressão e ciclos térmicos para a soldagem simulada.

Método: consulta a normas técnicas e testes preliminares no simulador termomecânico Gleeble 563.

Produto esperado: definição dos parâmetros iniciais e planejamento experimental.

- Atividade C: Aquisição e preparação de materiais, equipamentos e software: compra de insumos e equipamentos necessários, como o JMatPro, cortadora de cutoff e cortadora de precisão, politrizes e embutidora, máquina serra fita

Método: aquisição e instalação dos equipamentos nos laboratórios.

Produto esperado: equipamentos instalados e prontos para uso.

Observação: o planejamento inicial garante a escolha correta dos parâmetros de soldagem e a estruturação experimental, além de assegurar que os recursos materiais e equipamentos estejam disponíveis.

#### **3.2.2. Etapa 2: Execução das Simulações e Ensaios Experimentais**

Pretende-se simular o processo de soldagem FBW em trilhos ferroviários e realizar ensaios mecânicos e microestruturais das juntas soldadas, possuindo as seguintes atividades.

- Atividade D: Simulação do processo de soldagem FBW no Gleeble 563: utilização do simulador termomecânico para reproduzir as condições reais de soldagem em laboratório.

Método: aplicação dos parâmetros de temperatura, pressão e tempo de aquecimento previamente definidos.

Produto esperado: amostras soldadas prontas para análise.

- Atividade E: Ensaios mecânicos (tração, impacto Charpy, microdureza): testes de resistência à tração, impacto e microdureza nas zonas soldadas (metal base, zona

termicamente afetada e zona de solda).

Método: execução dos ensaios em máquinas de tração, impacto e microdurômetro.

Produto esperado: relatórios com resultados quantitativos dos ensaios mecânicos.

- Atividade F: Caracterização microestrutural das zonas de solda: análise das microestruturas formadas nas juntas soldadas usando microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV).

Método: preparação das amostras metalográficas e análise por MEV, EDS e EBSD.

Produto esperado: relatórios de análise microestrutural.

Observação: a execução das simulações e ensaios é o núcleo experimental do projeto, permitindo o estudo detalhado das propriedades mecânicas e microestruturais das juntas soldadas.

### **3.2.3. Etapa 3: Análise dos Resultados e Desenvolvimento de Modelos**

Propõe-se correlacionar os parâmetros de soldagem com os resultados experimentais e desenvolver modelos para otimização do processo, contemplando as atividades:

- Atividade G: Análise dos resultados dos ensaios e microestruturas: comparação dos resultados mecânicos e microestruturais com os parâmetros de soldagem aplicados.

Método: aplicação de métodos estatísticos e análise crítica dos resultados.

Produto esperado: relatório detalhado de correlações entre parâmetros e resultados.

- Atividade H: Desenvolvimento de modelos teóricos e empíricos: criação de modelos que preveem o comportamento das juntas soldadas sob diferentes parâmetros de soldagem.

Método: utilização dos softwares ThermoCalc e JMatPro para simulação termodinâmica e de transformações de fase.

Produto esperado: modelos preditivos de comportamento das juntas soldadas.

Importância: essa etapa é essencial para entender como os parâmetros influenciam a qualidade da soldagem e como otimizar o processo, além de fornecer uma base teórica sólida para futuros desenvolvimentos.

### **3.2.4. Etapa 4: Proposição de Melhorias e Transferência de Tecnologia**

Sugere melhorias no processo FBW e transferir o conhecimento gerado para a indústria ferroviária. Com as seguintes atividades previstas:

- Atividade I: Proposição de parâmetros otimizados para o processo de soldagem: com base nos resultados obtidos, sugerir melhorias nos parâmetros de soldagem.

Método: Avaliação dos resultados experimentais e revisão técnica dos modelos desenvolvidos.

Produto esperado: Relatório técnico com sugestões de otimização do processo.

- Atividade J: Transferência de tecnologia e resultados para a indústria: realização de workshops e reuniões técnicas com representantes da indústria ferroviária para apresentar os resultados.

Método: seminários e divulgação em congressos nacionais e internacionais.

Produto esperado: documentos técnicos de implementação e disseminação dos resultados.

Importância: a transferência de tecnologia garante que os resultados do projeto sejam aplicados na prática, melhorando a eficiência e segurança dos trilhos ferroviários no Brasil.

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

A previsão de início deste projeto será em 01 de Setembro de 2025 (01/09/2025) e o prazo necessário para o desenvolvimento do projeto é de 3 anos (36 meses). O custo total deste projeto será de R\$ 2.541.434,23 (Dois milhões, quinhentos e quarenta e um mil, quatrocentos e trinta e quatro reais e vinte e três centavos), apropriado na verba disponível de RDT no contrato de concessão da Estrada de Ferro Vitória a Minas, abordado detalhadamente nos anexos II e VI.

Valor de investimento 2025 (ano contratual 5): R\$ 590.423,78

Valor de investimento 2026 (ano contratual 6): R\$ 1.072.806,88

Valor de investimento 2027 (ano contratual 7): R\$ 585.120,14

Valor de investimento 2028 (ano contratual 8): R\$ 293.083,43

O valor total considera a destinação de 15% do valor total dos recursos financeiros destinados à execução do projeto, para cobertura de despesas operacionais e administrativas necessárias à execução desses acordos, convênios e contratos (Decreto nº 9.283 de 07 de fevereiro de 2018 - Art. 74).

O valor também contempla o provisionamento da concessionária para despesas administrativas (7,37%) 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.”.

#### **5. LOCAL DE EXECUÇÃO**

O projeto será desenvolvido em diferentes etapas, distribuídas por laboratórios, bem como consolidação dos resultados da pesquisa no estaleiro de solda da ferrovia. A seguir, apresentamos os locais principais para a execução das atividades propostas:

- Laboratório de Ensaios Mecânicos e Termomecânicos (LabEnsaios) – IFMA

Localização: Instituto Federal do Maranhão (IFMA), Campus São Luís Monte Castelo.

Descrição: o LabEnsaios do IFMA será o principal local de execução dos ensaios experimentais do projeto. Neste local serão realizadas as simulações de soldagem de topo

por centelhamento (FBW) utilizando o simulador termomecânico Gleeble 563. Também serão conduzidos os ensaios mecânicos, como tração, impacto Charpy, e microdureza, além de análises microestruturais usando microscopia ótica e eletrônica de varredura.

- Laboratório de Metalografia e Análise de Materiais – IFMA

Localização: IFMA, Campus São Luís.

Descrição: neste laboratório, as amostras soldadas serão preparadas para análise metalográfica. Equipamentos como cortadora de precisão, politriz, embutidora, serão utilizados para a preparação e análise das juntas soldadas. Além disso, softwares como o ThermoCalc e JMatPro serão empregados para o desenvolvimento de modelos teóricos de comportamento de solda.

- Trechos Experimentais – Oficina Ferroviária da estrada de ferro Carajás e Estaleiro de Solda

Localização: localizada em São Luis do Maranhão dentro das instalações da VALE ou outra concessionária relevante que possa se interessar no projeto.

Descrição: a oficina da estrada de ferro Carajás assim como no estaleiro de solda, será realizada investigação dos processos de soldas por FBW em juntas de trilhos.

Cada um dos locais descritos desempenha um papel essencial na condução das atividades do projeto, desde a preparação das amostras, passando pela execução dos testes e análises, até a validação em condições reais de solda nas ferrovias. A combinação desses espaços de pesquisa garantirá o desenvolvimento robusto e bem-sucedido do projeto.

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

### **6.1. Identificação da entidade**

Instituto Federal do Maranhão (IFMA), Campus São Luís Monte Castelo.

Laboratórios Envolvidos: Laboratório de Ensaios Mecânicos e Termomecânicos (LabEnsaios), Laboratório de Metalografia e Análise de Materiais.

Área de Atuação: Ensino, Pesquisa e Extensão em Engenharia Mecânica e de Materiais

Histórico: o Instituto Federal do Maranhão, através de seu campus em São Luís, tem uma longa tradição de envolvimento com projetos de pesquisa e inovação tecnológica, especialmente na área de materiais e soldagem. O LabEnsaios, em particular, é um centro de referência para o desenvolvimento de pesquisas no setor industrial, tendo participado de diversos projetos em colaboração com instituições nacionais e internacionais. Nos últimos anos, o IFMA tem ampliado sua atuação na área de processamento Termomecânico, especialmente com o uso do simulador termomecânico Gleeble 563, que permite a reprodução de processos industriais complexos, como a soldagem de trilhos.

O instituto também é reconhecido por suas colaborações com setores produtivos estratégicos, como o ferroviário, tendo desenvolvido projetos focados na otimização de processos de fabricação, análise de propriedades de materiais e caracterização microestrutural de ligas metálicas. O IFMA possui histórico de execução de projetos com financiamento de órgãos de fomento como FAPEMA, CAPES, CNPq, FINEP e empresas locais, destacando-se em iniciativas de pesquisa aplicada ao desenvolvimento tecnológico.

A Fundação Cultural e de Fomento à Pesquisa, Extensão e Inovação (FADEX), em parceria com o Laboratório de Ensaios Mecânicos e Termomecânicos (LabEnsaios) do Instituto Federal do Maranhão (IFMA), para este projeto, possui a responsabilidade de

prestar contas, administrar os recursos financeiros, realizar contratações, pagamentos, recolhimento de taxas, impostos e encargos, das atividades relacionadas ao projeto, dentre outras previstas no acordo de parceria.

Considerando o exposto no texto supracitado, o Instituto Federal do Maranhão (IFMA), Campus São Luís Monte Castelo, 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**

Coordenador do Projeto:

- a) Samuel Filgueiras Rodrigues – Doutor em Engenharia de Minas e Materiais pela Universidade McGill, Montreal no Canada. Mestre em Engenharia de Materiais pelo IFMA e Licenciado em Física pela UFMA. É professor EBTT no IFMA e docente do programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais. CPF:001.081.303-98 - <http://lattes.cnpq.br/4311255376981007>. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 5.200,00 –

O pagamento de bolsa para coordenador deste projeto está embasado no artigo 9º da Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, que define:

*“É facultado à ICT celebrar acordos de parceria com instituições públicas e privadas para realização de atividades conjuntas de pesquisa científica e tecnológica e de desenvolvimento de tecnologia, produto, serviço ou processo.*

*§ 1º O servidor, o militar, o empregado da ICT pública e o aluno de curso técnico, de graduação ou de pós-graduação envolvidos na execução das atividades previstas no caput poderão receber bolsa de estímulo à inovação diretamente da ICT a que estejam vinculados, de fundação de apoio ou de agência de fomento...”*

Complementarmente ao artigo citado, para este projeto foi considerada a aplicação da norma interna do IFMA, Resolução nº 110, de 24 de abril de 2017 – artigo 29º, que rege as bolsas de servidor(es).

Como referência exclusivamente de valor, está sendo adotada neste projeto a modalidade DTI-A do CNPQ, que possui a finalidade de possibilitar o fortalecimento da equipe responsável pelo desenvolvimento de projeto de pesquisa, desenvolvimento ou inovação, por meio da incorporação de profissional qualificado para a execução de uma atividade específica.

***Demais membros da equipe do projeto: Serão selecionados após aprovação do projeto.***

- b) Pesquisador 1. Com no mínimo cinco anos de experiência em pesquisa ou experiência profissional após a graduação, ou com título de doutor, ambos em área relacionada ao Plano de Atividades proposto. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 6.990,00 – Referência FAPESP - Modalidade Treinamento Técnico V - (TT-V). Valor proporcional a 30 horas semanais
- c) Pesquisador 2. Com no mínimo quatro anos de experiência em pesquisa ou experiência profissional após a graduação, em área relacionada ao Plano de Atividades proposto. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 5.310,00 – Referência FAPESP - Modalidade Treinamento Técnico IV-A - (TT-IV-A). Valor proporcional a 30 horas semanais

- d) Pesquisador 3. Com no mínimo dois anos de experiência em pesquisa ou experiência profissional após a graduação, ou com título de mestre, ambos em área relacionada ao Plano de Atividades proposto. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 3.240,00 – Referência FAPESP - Modalidade Treinamento Técnico IV - (TT-IV). Valor proporcional a 30 horas semanais
- e) Técnico de apoio. Para alunos cursando o último ano do nível médio técnico ou que sejam egressos do referido nível, sem reprovações em seu histórico escolar. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 922,50 – Referência FAPESP - Modalidade Treinamento Técnico II - (TT-II). Valor proporcional a 30 horas semanais
- f) Iniciação científica Jr. 1 (Estudante de nível médio técnico). Período: 18 meses, iniciando no 1º mês. Bolsa: R\$ 620,00 – Referência FAPESP – Modalidade Treinamento Técnico I - (TT-I). Valor de 15 horas/semana
- g) Iniciação científica Jr. 2 (Estudante de nível médio técnico). Período: 18 meses, iniciando no 19º mês. Bolsa: R\$ 620,00 – Referência FAPESP – Modalidade Treinamento Técnico I - (TT-I). Valor 15 horas/semana. (Essa bolsa poderá ser um(a) novo(a) estudante ou renovação por mais 18 meses do anterior)
- h) Iniciação científica 1 (Estudante de Engenharia Mecânica do IFMA). Período: 18 meses, iniciando no 1º mês. Bolsa: R\$ 1.080,00 – Referência FAPESP – Modalidade Iniciação Científica (IC).
- i) Iniciação científica 2 (Estudante de Engenharia Mecânica do IFMA). Período: 18 meses, iniciando no 19º mês. Bolsa: R\$ 1.080,00 – Referência FAPESP – Modalidade Iniciação Científica (IC). (Essa bolsa poderá ser um(a) novo(a) estudante ou renovação por mais 18 meses do anterior)
- j) Mestrado (Um(a) estudante do programa de pós-graduação em ciência e tecnologia de materiais do IFMA). Período: 24 meses dividido em Ano 1 e Ano 2. Ano 1, Bolsa: R\$ 3.120,00 – Referência FAPESP – Modalidade Mestrado I (MS-I). Ano 2. Bolsa: R\$ 3.300,00 - Referência FAPESP – Modalidade Mestrado II (MS-II)

## 7. PRODUTOS

O projeto "Otimização do Processo de Soldagem de Topo por Centelhamento (Flash Butt Weld – FBW) em Trilhos Ferroviários Utilizando um Simulador Termomecânico Gleeble 563" irá gerar diversos produtos técnicos que visam contribuir para a melhoria da segurança e eficiência das operações ferroviárias, além de fornecer soluções replicáveis para a indústria. Os principais produtos que serão desenvolvidos são:

- Modelos Teóricos e Empíricos para Previsão do Comportamento das Juntas Soldadas: Correlacionam os parâmetros de soldagem (como temperatura, tempo de aquecimento e pressão de compressão) com as propriedades mecânicas e microestruturais das juntas soldadas. Esses modelos servirão para prever o comportamento das juntas soldadas sob diversas condições operacionais, auxiliando na escolha de parâmetros ótimos para diferentes aplicações ferroviárias. A previsão precisa do comportamento das soldas permitirá maior confiabilidade no processo e uma redução no tempo e custo com testes experimentais. Os modelos serão amplamente documentados e poderão ser usados por outros pesquisadores e engenheiros ferroviários para otimizar processos semelhantes.

- **Propostas de Melhoria de Normas Técnicas para Soldagem Ferroviária:** Propostas de atualização e melhoria das normas técnicas aplicáveis ao processo de soldagem de trilhos ferroviários, com base nos resultados obtidos no projeto. As propostas visam padronizar as melhores práticas de soldagem, aumentando a segurança e confiabilidade das juntas soldadas, o que beneficiará todo o setor ferroviário. Isso contribui para o aprimoramento da qualidade e segurança das operações ferroviárias, facilitando a adoção de processos mais eficientes e seguros. As normas propostas poderão ser implementadas por qualquer concessionária ou operador ferroviário, garantindo a disseminação das melhores práticas no setor.
- **Relatórios Técnicos sobre Ensaios e Caracterização das Juntas Soldadas:** Relatórios detalhados que descrevem os resultados dos ensaios mecânicos (microdureza, impacto Charpy, tração) e caracterização microestrutural (microscopia ótica e eletrônica, EDS, EBSD) realizados nas juntas soldadas. Esses relatórios servirão como referência para avaliar a qualidade das soldas e a eficácia dos parâmetros utilizados, auxiliando em decisões operacionais futuras. Fornecer uma análise detalhada das propriedades mecânicas e microestruturais das juntas, são essenciais para garantir a integridade estrutural dos trilhos. Os relatórios poderão ser utilizados por outros profissionais para comparar e reproduzir os resultados obtidos no projeto.
- **Melhoramento dos Procedimentos Operacionais Padrão existentes (POPs):** Procedimentos Operacionais Padrão para a execução do processo de soldagem por centelhamento e para os ensaios e caracterizações das juntas soldadas receberão sugestões de melhoramento. Os POPs melhorados servirão como um guia para os operadores, garantindo a padronização dos processos e, conseqüentemente, a replicação dos resultados esperados. Estes documentos garantirá consistência na execução dos processos, reduzindo variações indesejadas nos resultados das soldas. Os POPs poderão ser adotados por outras concessionárias e empresas que realizem processos de soldagem ferroviária.
- O projeto prevê a publicação de artigos científicos em revistas especializadas e de alto impacto, limitados aos resultados que possam ser divulgados publicamente, garantindo a confidencialidade de itens críticos e sensíveis. Além disso, serão gerados relatórios técnicos detalhados, projetos de iniciação científica, dissertações de mestrado, teses de doutorado, apresentações de trabalhos em congressos nacionais e internacionais, e materiais de treinamentos/ workshops, promovendo a disseminação do conhecimento técnico e científico derivado do projeto.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS**

- [1] T. Kuroda, M. Shimada, Micro flash butt welding of super duplex stainless steel with Zr-based metallic glass insert, Vacuum 83 (2008) 153–156. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2008.03.089>.
- [2] J. Song, L. Zhu, J. Wang, Y. Lu, C. Ma, J. Han, Z. Jiang, Physical Simulation and Numerical Simulation of Flash Butt Welding for Innovative Dual Phase Steel DP590: A Comparative Study, Materials 16 (2023) 3513. <https://doi.org/10.3390/ma16093513>.

- [3] R.R. Porcaro, G.L. Faria, L.B. Godefroid, G.R. Apolonio, L.C. Cândido, E.S. Pinto, Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail, *J Mater Process Technol* 270 (2019) 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.013>.
- [4] J. Zhao, X. Pang, P. Fu, Y. Wang, G. Kang, P. Wang, Q. Kan, Dynamic constitutive model of U75VG rail flash-butt welded joint and its application in wheel-rail transient rolling contact simulation, *Eng Fail Anal* 134 (2022) 106078. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106078>.
- [5] H. Su, J. Li, Q. Lai, C.L. Pun, P. Mutton, Q. Kan, G. Kang, W. Yan, Ratcheting behaviour of flash butt welds in heat-treated hypereutectoid steel rails under uniaxial and biaxial cyclic loadings, *Int J Mech Sci* 176 (2020) 105539. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105539>.
- [6] Y. Wang, H. Zhou, Y. Shi, B. Feng, Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* 19 (2012) 409–420. <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0572-8>.
- [7] L.F. Bauri, L.H.D. Alves, H.B. Pereira, A.P. Tschiptschin, H. Goldenstein, The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW, *Journal of Materials Research and Technology* 9 (2020) 8058–8073. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.030>.
- [8] J. Zhang, X. Zhang, D. Li, Q. Lv, R. Ma, Extrusion behavior of impurities in upsetting process of rail flash butt welding based on finite element method, *J Mater Res* 34 (2019) 3351–3360. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.221>.
- [9] L.B. Godefroid, G.L. Faria, L.C. Cândido, T.G. Viana, Fatigue Failure of a Flash Butt Welded Rail, *Procedia Materials Science* 3 (2014) 1896–1901. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.306>.
- [10] H. Su, C.L. Pun, P. Mutton, Q. Kan, G. Kang, W. Yan, Numerical study on the ratcheting performance of rail flash butt welds in heavy haul operations, *Int J Mech Sci* 199 (2021) 106434. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106434>.
- [11] P. Mutton, J. Cookson, C. Qiu, D. Welsby, Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds, *Wear* 366–367 (2016) 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.020>.
- [12] M. Masoumi, G. Tressia, D.M.A. Centeno, H. Goldenstein, Improving the Mechanical Properties and Wear Resistance of a Commercial Pearlitic Rail Steel Using a Two-Step Heat Treatment, *Metallurgical and Materials Transactions A* 52 (2021) 4888–4906. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06432-0>.
- [13] Y. Hu, L. Zhou, H.H. Ding, R. Lewis, Q.Y. Liu, J. Guo, W.J. Wang, Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading, *Tribol Int* 154 (2021) 106685. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106685>.
- [14] R. Ordóñez Olivares, C.I. Garcia, A. DeArdo, S. Kalay, F.C. Robles Hernández, Advanced metallurgical alloy design and thermomechanical processing for rails steels for North American heavy haul use, *Wear* 271 (2011) 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.048>.
- [15] A.P.G. Chaves, D.M.A. Centeno, M. Masoumi, H. Goldenstein, Effect of the Microstructure on the Wear Resistance of a Pearlitic Steel, *Materials Research* 23 (2020). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2019-0605>.
- [16] K. Mishra, A. Singh, Effect of interlamellar spacing on fracture toughness of nano-

- structured pearlite, *Materials Science and Engineering: A* 706 (2017) 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.115>.
- [17] X.C. Li, H.H. Ding, W.J. Wang, J. Guo, Q.Y. Liu, Z.R. Zhou, Investigation on the relationship between microstructure and wear characteristic of rail materials, *Tribol Int* 163 (2021) 107152. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107152>.
- [18] J. Wang, Y. Lu, J. Han, J. Qi, L. Sun, Z. Jiang, C. Ma, V. Linton, Study on microstructure evolution and mechanical properties of high-strength low-alloy steel welds realized by flash butt welding thermomechanical simulation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 122 (2022) 639–658. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09859-w>.
- [19] K.R. Krishna Murthy, F. Akyel, U. Reisgen, S. Olschok, D. Mahendran, Modelling the Evolution of Phases during Laser Beam Welding of Stainless Steel with Low Transformation Temperature Combining Dilatometry Study and FEM, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 8 (2024) 50. <https://doi.org/10.3390/jmmp8020050>.
- [20] E.J. Barrick, D. Jain, J.N. DuPont, D.N. Seidman, Effects of Heating and Cooling Rates on Phase Transformations in 10 Wt Pct Ni Steel and Their Application to Gas Tungsten Arc Welding, *Metallurgical and Materials Transactions A* 48 (2017) 5890–5910. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4379-0>.
- [21] M. Hunkel, H. Surm, M. Steinbacher, Dilatometry, in: 2018: pp. 103–129. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64062-8.00019-X>.
- [22] H. Lalvani, P. Mandal, A. Yaghi, P. Santos, B. Baufeld, A solid-state joining approach to manufacture of transition joints for high integrity applications, *J Manuf Process* 73 (2022) 90–111. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.058>.
- [23] C.W. Ziemian, M.M. Sharma, D.E. Whaley, Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints, *Mater Des* 33 (2012) 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.026>.
- [24] A.B. Pereira, F.J.M.Q. de Melo, Quality Assessment and Process Management of Welded Joints in Metal Construction—A Review, *Metals (Basel)* 10 (2020) 115. <https://doi.org/10.3390/met10010115>.
- [25] H. Arora, R. Singh, G.S. Brar, Thermal and structural modelling of arc welding processes: A literature review, *Measurement and Control* 52 (2019) 955–969. <https://doi.org/10.1177/0020294019857747>.
- [26] M.C. Zondi, Factors That Affect Welding-Induced Residual Stress and Distortions in Pressure Vessel Steels and Their Mitigation Techniques: A Review, *J Press Vessel Technol* 136 (2014). <https://doi.org/10.1115/1.4026564>.
- [27] D.A.G. Reyes, S.I. Brown, L. Cochrane, L.S. Motta, A. Cuschieri, Thermal fusion: effects and interactions of temperature, compression, and duration variables, *Surg Endosc* 26 (2012) 3626–3633. <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2386-1>.
- [28] D.F. CANNON, K. -O. EDEL, S.L. GRASSIE, K. SAWLEY, Rail defects: an overview, *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 26 (2003) 865–886. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00693.x>.
- [29] S.K. Sharma, S. Poddar, G.K. Dwivedy, S.C. Panja, S.N. Patra, Risk reduction and resilience buildup in railroad transport, in: *Disaster Resilience and Sustainability*, Elsevier, 2021: pp. 509–562. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85195-4.00033-0>.

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

- I      Resumo do Plano de Trabalho;
- II     Cronograma físico-financeiro;
- III    Propostas técnicas e comercial;
- IV    Cotações comerciais;
- V     Currículo dos coordenadores;
- VI    Orçamento analítico;
- VII   Lista de bens, produtos e estudos com previsão de transferência;
- VIII Declaração de observância;