



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

NATANAEL LIMA RESENDE

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA EMISSIVIDADE DE AÇOS EM ALTAS
TEMPERATURAS

Belo Horizonte

2026

NATANAEL LIMA RESENDE

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA EMISSIVIDADE DE AÇOS EM ALTAS
TEMPERATURAS

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Frederico Romagnoli Silveira
Lima, Dr.

Coorientador: Ricardo Junqueira Silva, Dr.

Belo Horizonte

2026

R433i Resende, Natanael Lima
Investigação experimental da emissividade de aços em altas temperaturas / Natanael Lima Resende. – 2026.
51 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: Frederico Romagnoli Silveira Lima.
Coorientador: Ricardo Junqueira Silva.
Banca examinadora: Frederico Romagnoli Silveira Lima, Ricardo Junqueira Silva, Marcio Expedito Guzzo e André Guimarães Ferreira.

Bibliografia: f. 49-51.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Emissividade – Teses. 2. Pirometria – Teses. 3. Aço – Efeito da alta temperatura – Teses. I. Lima, Frederico Romagnoli Silveira. II. Silva, Ricardo Junqueira. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDD 620.17

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA EMISSIVIDADE DE AÇOS EM ALTAS
TEMPERATURAS

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 19/06/2026



Frederico Romagnoli Silveira Lima, Doutor, Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



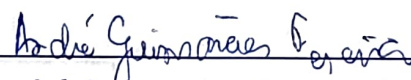
Ricardo Junqueira Silva, Doutor, Coorientador

Vallourec Soluções Tubulares do Brasil



Marcio Expedito Guzzo, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



André Guimarães Ferreira, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia de Materiais, Campus Nova Suíça
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

*"O objetivo da ciência natural não é simplesmente aceitar as declarações dos outros,
mas investigar as causas que operam na natureza."*

— Santo Alberto Magno

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido a vida, a oportunidade de ingressar no curso de Engenharia Mecânica e a sabedoria necessária para concluir essa etapa. Sem a Sua força guiando os meus passos, essa conquista não seria possível.

À minha noiva, Gabriela, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos durante esses anos de estudo. Muito obrigado por estar sempre ao meu lado, compreendendo minhas ausências e me fazendo companhia até mesmo nas tardes de estudos para as provas mais difíceis.

Aos meus pais, Raimundo e Ângela, que sempre acreditaram no meu potencial. Agradeço por todo o suporte financeiro e emocional, pelos valores transmitidos e pelos conselhos sábios que me deram forças para não desistir diante dos obstáculos.

Ao meu coorientador, Dr. Ricardo Junqueira Silva, por ser uma verdadeira inspiração profissional para mim. Muito obrigado por ter compartilhado sua vasta experiência e por me ensinar tanto sobre a área de térmicas. Suas contribuições foram fundamentais para o meu crescimento técnico e pessoal.

De forma muito especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima, pela paciência, pela confiança e por ter me iniciado no universo das ciências térmicas de uma maneira tão cativante.

A todos os professores do CEFET-MG, que sempre demonstraram um comprometimento ímpar com a excelência no ensino, dedicando-se incansavelmente para ter a certeza de que estávamos, de fato, aprendendo.

À Vallourec Soluções Tubulares do Brasil, em especial a toda a equipe do setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), pela oportunidade de estágio que deu origem a este trabalho. Expresso minha profunda gratidão pela confiança, pela troca de conhecimentos diária e por disponibilizarem toda a infraestrutura e os equipamentos necessários para a realização dos testes experimentais.

Por fim, ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), por ter me acolhido e proporcionado o ambiente e a infraestrutura necessários para que toda essa trajetória se tornasse realidade.

RESUMO

A medição precisa da temperatura em processos metalúrgicos e siderúrgicos é fundamental para garantir a qualidade do produto final e a eficiência das operações. Embora a pirometria ofereça vantagens significativas como técnica de medição sem contato, sua confiabilidade é intrinsecamente dependente da correta configuração da emissividade, uma propriedade de superfície influenciada dinamicamente pela temperatura, composição química e estado de oxidação do material. O presente trabalho tem como objetivo geral determinar experimentalmente faixas de valores de emissividade para aços específicos em altas temperaturas, visando a calibração adequada de instrumentos em ambiente industrial. A metodologia experimental foi estruturada com base no Método de Contato descrito na norma ABNT NBR 16969:2021, utilizando um forno resistivo para o aquecimento controlado de amostras instrumentadas com termopares tipo K (referência) e monitoradas simultaneamente por pirômetros espectrais. O procedimento consiste no ajuste iterativo do parâmetro de emissividade no pirômetro até que ocorra a equalização entre a medição radiométrica e a de contato. Os resultados demonstraram que o comportamento térmico das amostras analisadas é estatisticamente equivalente na faixa de 500°C a 700°C. Consequentemente, consolidou-se um valor constante de emissividade de $0,860 \pm 0,023$ e um slope de $1,001 \pm 0,022$ (com nível de confiança de 95%). A propagação da incerteza combinada destes parâmetros indicou um desvio de temperatura de aproximadamente $\pm 6^\circ\text{C}$ nas leituras do pirômetro, balizando a confiabilidade industrial do método.

Palavras-chave: Emissividade, Pirometria, Aço, Alta Temperatura.

ABSTRACT

Accurate temperature measurement in metallurgical and steelmaking processes is essential to ensure final product quality and operational efficiency. Although pyrometry offers significant advantages as a non-contact measurement technique, its reliability is intrinsically dependent on the correct configuration of emissivity, a surface property dynamically influenced by temperature, chemical composition, and the oxidation state of the material. The general objective of this study is to experimentally determine emissivity ranges for specific steels at high temperatures, aiming at the proper calibration of instruments in an industrial environment. The experimental methodology was structured based on the Contact Method described in the ABNT NBR 16969:2021 standard, using a resistive furnace for the controlled heating of samples instrumented with type K thermocouples (reference) and simultaneously monitored by spectral pyrometers. The procedure consists of the iterative adjustment of the emissivity parameter on the pyrometer until the equalization between the radiometric and contact measurements occurs. The results demonstrated that the thermal behavior of the analyzed samples is statistically equivalent in the range of 500°C to 700°C. Consequently, a constant emissivity value of 0.860 ± 0.023 and a slope of 1.001 ± 0.022 (with a 95% confidence level) were consolidated. The propagation of the combined uncertainty of these parameters indicated a temperature deviation of approximately $\pm 6^{\circ}\text{C}$ in the pyrometer readings, supporting the industrial reliability of the method.

Keywords: Emissivity, Pyrometry, Steel, High Temperature.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	9
2.1	Objetivo Geral	9
2.2	Objetivos Específicos	9
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	Fundamentação Teórica	10
3.2	Fatores que Influenciam a Emissividade de Aços	11
3.3	Tecnologias de Medição de Temperatura e Emissividade	12
3.4	Metodologias para Determinação da Emissividade	13
3.5	Aspectos Metrológicos e Análise de Incertezas	15
4	METODOLOGIA	17
4.1	Diretrizes Normativas e Estratégia Experimental	17
4.1.1	Fase 1 - Posicionamento e Isolamento do Plano de Fundo (TAR)	18
4.1.2	Fase 2 - Instrumentação e Homogeneização	19
4.1.3	Fase 3 - Medição, Registro e Parametrização	19
4.1.4	Fase 4 - Tratamento Estatístico e Análise de Incertezas (GUM)	20
4.2	Equipamentos	20
4.3	Preparação de Amostras	24
4.4	Montagem da Bancada de Trabalho	26
4.5	Procedimento Operacional de Registro de Temperatura	30
4.6	Cálculo da Emissividade e da Incerteza	31
4.6.1	Definição do Mensurando e do Modelo Matemático	32
4.6.2	Avaliação do Tipo A da Incerteza Padrão	33
4.6.3	Avaliação do Tipo B da Incerteza Padrão	34
4.6.4	Coeficientes de Sensibilidade (ci)	35
4.6.5	Incerteza Combinada e Expandida	36
4.6.6	Declaração Final do Resultado:	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Resultados dos parâmetros de emissividade e slope	37
5.2	Propagação da Incerteza da Emissividade na Temperatura	42
5.3	Análise Consolidada dos Parâmetros Radiométricos	46
6	CONCLUSÕES	47
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
8	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A medição rigorosa e confiável da temperatura desempenha um papel fundamental nas diversas áreas da engenharia e da ciência dos materiais, condição essencial para que os estudos e processos sejam corretamente validados, interpretados e analisados. A quantificação do calor tem sido objeto de estudo histórico e, como consequência do avanço científico, existe hoje uma vasta gama de equipamentos destinados a esse fim. Na indústria, destacam-se principalmente duas tecnologias: a medição sem contato e a medição com contato.

Nas tecnologias sem contato, como o nome sugere, não é necessário que o instrumento encoste na superfície sob análise, a exemplo dos pirômetros. De forma contrária, as tecnologias de contato, como os termopares, exigem interação física direta com o corpo monitorado. A maneira como cada uma dessas tecnologias mede a temperatura é essencialmente diferente, baseando-se em princípios físicos distintos, de modo que a escolha do equipamento ideal depende das condições operacionais. O pirômetro apresenta a vantagem de medir a distância, ideal para situações em que o contato é inviável, mas exige a configuração prévia e precisa da emissividade da superfície. Já os termopares, embora exijam o contato com a peça, o que pode ser limitante em certos cenários, não necessitam da inserção de parâmetros adicionais para indicar a temperatura correta, desde que estejam devidamente calibrados.

Em ambientes industriais, especialmente em processos metalúrgicos e siderúrgicos, a necessidade de medições térmicas confiáveis é ainda mais crítica. A precisão da leitura impacta diretamente a qualidade do produto final, a eficiência energética e a segurança das operações. É nesse contexto que o controle da emissividade se torna decisivo, visto que essa propriedade superficial afeta de forma exclusiva as tecnologias de medição sem contato.

Para garantir a confiabilidade térmica medida por um pirômetro, é imprescindível configurá-lo com o valor exato da emissividade do alvo. Embora valores padronizados para aços comerciais constem em diversas tabelas de referência, eles são insuficientes para atender à dinâmica do chão de fábrica. A emissividade não é uma constante; trata-se de um parâmetro volátil influenciado por fatores como temperatura, composição química do aço, acabamento superficial e grau de oxidação. Devido a essas múltiplas variáveis, surge uma importante lacuna técnica entre os dados tabelados na literatura e o comportamento térmico real de um aço patenteado em um processo de fabricação específico.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho surgiu a partir de uma demanda técnica real vivenciada durante o período de estágio do autor no setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Vallourec Soluções Tubulares do Brasil. Diante da necessidade industrial de aprimorar o monitoramento de temperatura realizado pelos pirômetros no chão de

fábrica e de garantir maior precisão e confiabilidade nas leituras, esta pesquisa buscou unir a fundamentação teórica acadêmica à aplicação prática no ambiente corporativo.

A Vallourec Soluções Tubulares do Brasil é uma empresa siderúrgica reconhecida mundialmente pela fabricação de tubos de aço sem costura de alta tecnologia. Os produtos da companhia atendem a setores industriais de extrema exigência operacional, como o mercado de óleo e gás (mecânica *offshore*), automotivo e de construção civil. Para atender aos rigorosos padrões de segurança mecânica desses setores, os tubos de aço passam por tratamentos térmicos complexos, como o revenimento e têmpera, onde o controle exato da temperatura das peças nos fornos industriais é indispensável.

Diante desse cenário, o problema de pesquisa deste trabalho está centrado na determinação correta dos valores de emissividade para os produtos fabricados pela referida empresa. Caso esse parâmetro não seja ajustado de forma adequada, erros de leitura pirométrica podem comprometer a conformidade metalúrgica dos produtos, acarretar rejeições em auditorias de qualidade e impactar negativamente a eficiência do processo produtivo. Para preencher essa lacuna, este trabalho tem como objetivo geral determinar experimentalmente as faixas de emissividade para esses aços específicos, sendo o documento estruturado em capítulos que contemplam a revisão teórica pertinente, a metodologia de ensaio aplicada e a análise detalhada dos resultados obtidos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é definir uma faixa de valores de emissividade para determinados aços em função do tipo de aço e em função da faixa de temperatura.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Medir a faixa valor da emissividade de para 3 amostras de aços em uma faixa de temperatura 500 °C a 700 °C, relativo à temperatura de revenimento de aços carbono;
- Definir um método para padronizar o cálculo;
- Aplicar norma ABNT para medição de emissividade;
- Analisar as faixas de emissividade encontradas;
- Agrupar faixas de emissividade para abranger várias temperaturas próximas;
- Agrupar faixas de emissividade para abranger aços próximos;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentação Teórica

A forma mais tradicional de medição de temperatura se baseia na Lei Zero da Termodinâmica que, “se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, eles também estão em equilíbrio térmico entre si” (Çengel; Boles, 2013). Esse princípio é a base para o funcionamento de termômetros de contato, onde o sensor e o corpo atingem um equilíbrio térmico, permitindo a medição.

Contudo, quando não há a possibilidade de contato físico, a transferência de calor por radiação se torna o mecanismo de interesse. Todo corpo com temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin) emite radiação eletromagnética, cuja intensidade depende de sua temperatura. Essa energia é emitida em um amplo espectro de comprimentos de onda, mas se concentra principalmente na faixa do infravermelho.

Um conceito idealizado, mas fundamental para o estudo da radiação térmica, é o de corpo negro. Um corpo negro é um objeto ideal capaz de absorver toda a radiação que incide sobre ele e, por consequência, é também um emissor perfeito de radiação em uma dada temperatura. A energia total emitida por um corpo negro (E_b) é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (T), relação descrita pela Lei de Stefan-Boltzmann, conforme a Equação (1):

$$E_b = \sigma T^4 \quad (1)$$

Onde, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, com valor de $5,670 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$.

Essa lei, Equação (1), é a base para a medição de temperatura sem contato, pois relaciona diretamente a energia irradiada, que pode ser medida, com a temperatura do corpo.

Antes de aprofundar o conceito de emissividade, é importante ressaltar que, devido ao arranjo geométrico entre duas superfícies, nem toda a radiação emitida por uma alcança a outra. Portanto, a fração exata da radiação térmica que deixa uma superfície emissora e atinge diretamente uma superfície receptora (como o detector de um instrumento de medição) é denominada fator de forma (ou fator de configuração).

A emissividade é uma propriedade radiativa que quantifica a razão com que uma superfície emite energia térmica em comparação a um corpo negro ideal. Nos aços, essa propriedade é influenciada por fatores como composição química, rugosidade superficial, oxidação e temperatura. Por exemplo, aços galvanizados apresentam emissividade em torno de 0,2, enquanto aços oxidados podem atingir valores próximos de 0,8, evidenciando a importância do estado superficial na determinação precisa da emissividade (Richter; Fouad, 2021).

A emissividade (ε) é definida como a razão entre a energia irradiada por uma superfície real (E_r) e a energia irradiada por um corpo negro (E_b) à mesma temperatura (Incropera *et al.*, 2007), sendo um valor adimensional que varia de 0 a 1, expressa pela Equação (2):

$$\varepsilon = \frac{E_r}{E_b} \Rightarrow E_b = \frac{E_r}{\varepsilon} \quad (2)$$

Um corpo negro, por definição, tem emissividade igual a 1. Ao combinar a definição da Eq. (2) com a Lei de Stefan-Boltzmann, Eq. (1), obtém-se a equação para a energia emitida por uma superfície real, conforme apresentado na Equação (3):

$$E_r = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

Dessa forma, a temperatura real (T_r) de uma superfície que um pirômetro calcula de forma simplificada, sem considerar o tamanho da área de medição e o fator de forma, é dada pela Equação (4) isolando o termo da temperatura real na Equação (4):

$$T_r = \sqrt[4]{\frac{E_r}{\varepsilon \sigma}} \quad (4)$$

A Equação (4) demonstra matematicamente que, se o valor da emissividade (ε) configurado no pirômetro não corresponder ao valor real da superfície, a temperatura medida não será confiável. Se um valor de emissividade incorreto for utilizado, erros de medição podem comprometer a conformidade dos produtos e a eficiência do processo. Portanto, determinar o valor correto da emissividade é de suma importância para processos industriais.

3.2 Fatores que Influenciam a Emissividade de Aços

A emissividade não é uma constante intrínseca do material, mas uma propriedade da superfície que depende de múltiplas variáveis, o que justifica a complexidade de sua determinação.

- **Temperatura:** A emissividade de uma superfície geralmente depende da temperatura. Para aços, especialmente em altas temperaturas, essa variação é significativa. Estudos mostram que a emissividade de aços de baixo carbono pode variar de valores baixos, como 0,09, em temperaturas menores, para valores altos, por exemplo 0,83, em temperaturas elevadas (Deus; Castro; Corrêa, 2020).
- **Condição da Superfície:** A condição da superfície afeta drasticamente a emissividade. Superfícies polidas e lisas são mais refletivas e, portanto, apresentam valores de emissividade mais baixos, enquanto superfícies oxidadas ou com maior rugosidade apresentam valores mais altos (Richmond; Harrison, 1962 *apud* Deus; Castro; Corrêa, 2020). Para aços, a oxidação é um dos fatores mais influentes. Em altas temperaturas, a

reação do metal com o oxigênio do ambiente forma camadas de óxido na superfície, que geralmente possuem emissividade muito superior à do metal base (Zhu *et al.*, 2020). Deus, Castro e Corrêa (2020) observaram o escurecimento de amostras de aço a partir de 400 °C, decorrente da queima de óleo residual e da oxidação, o que justificou um aumento acentuado na emissividade a partir dessa faixa de temperatura. Em um estudo com aço inoxidável SS304 em atmosfera controlada, Zhu *et al.* (2020) correlacionaram as mudanças na emissividade com a formação de diferentes tipos de óxidos (como Cr_2O_3 e óxidos de ferro) na superfície, demonstrando a complexa relação entre a composição da camada de óxido e as propriedades radiativas.

- **Comprimento de Onda:** Para metais, as leis clássicas da radiação térmica estabelecem a tendência geral de que a emissividade espectral diminua com o aumento do comprimento de onda. Esse princípio físico é continuamente ratificado em experimentos metroológicos recentes, como nas calibrações de referência em altas temperaturas conduzidas por Zhang *et al.* (2025). A compreensão do comportamento espectral é fundamental na escolha do instrumento de medição. Estudos demonstram que instrumentos operando em faixas de ondas médias, como os que operam entre 3 a 5 μm , produzem erros de cálculo de temperatura significativamente menores do que aqueles operando em faixas longas, sendo, portanto, mais robustos contra erros de parametrização da emissividade (Gabirondo-López *et al.*, 2025).
- **Ângulo de Medição:** A emissão de radiação de superfícies reais não é perfeitamente difusa (isotrópica). Gabirondo-López *et al.* (2025), ao realizarem medições direcionais em amostras de Inconel 718, constataram que a assinatura radiativa varia significativamente em função da direcionalidade e da oxidação da superfície. Os autores demonstraram que leituras em ângulos rasantes (como 80°) divergem acentuadamente da emissividade normal (avaliada a 10° para mitigação de radiação espúria), com o comportamento angular alternando entre perfis metálicos e cerâmicos à medida em que a camada semitransparente de óxido se desenvolve.

3.3 Tecnologias de Medição de Temperatura e Emissividade

Os pirômetros modernos, também chamados de termômetros de radiação, operam captando a radiação infravermelha emitida pelos corpos. Essencialmente, um sistema óptico foca a energia irradiada pelo alvo em um detector, que a converte em um sinal elétrico processado para exibir a temperatura (Michalski *et al.*, 2001). Eles podem ser classificados principalmente em monocromáticos e de razão (bicromáticos).

Pirômetros Monocromáticos (Banda Única): Estes instrumentos operam em uma única e estreita faixa de comprimento de onda. Sua principal limitação é a necessidade de conhecimento prévio e preciso da emissividade do material para fornecer medições de temperatura confiáveis. Qualquer erro na estimativa da emissividade ou sua variação durante o processo (devido à oxidação ou mudança de temperatura) se traduz diretamente em um erro na medição da temperatura (Purpura *et al.*, 2016).

Pirômetros de Razão (Bicromáticos ou Duas Cores): Para mitigar a dependência da emissividade, os pirômetros de razão medem a radiação em dois comprimentos de onda distintos e calculam a temperatura com base na razão entre essas duas medições. A principal vantagem é que, se a emissividade for a mesma nos dois comprimentos de onda (condição de "superfície cinzenta"), ela é cancelada no cálculo, tornando a medição independente de seu valor absoluto. Isso também ajuda a compensar interferências como poeira, fumaça ou vapor d'água, que afetam ambos os comprimentos de onda de forma semelhante (Dewitt; NUTTER, 1988). No entanto, a suposição de corpo cinza nem sempre é válida para materiais reais. Pelzmann *et al.* (2022) alertam que, se a emissividade variar significativamente entre os dois comprimentos de onda, erros consideráveis podem ser introduzidos na medição da temperatura. Para contornar essa limitação, instrumentos comerciais permitem o ajuste de um parâmetro de correção (frequentemente denominado slope). Este parâmetro consiste justamente na inserção prévia da razão entre as emissividades espectrais do material. Ao configurar essa razão no pirômetro, o equipamento compensa o comportamento não cinza da superfície e corrige matematicamente a leitura térmica.

Termografia Infravermelha: Câmeras termográficas estendem o princípio da pirometria para um arranjo de detectores, permitindo a criação de um mapa de temperatura bidimensional (termograma) de uma superfície (Deus: Castro; Corrêa, 2020). Assim como os pirômetros monocromáticos, as câmeras termográficas requerem um ajuste preciso da emissividade para cada ponto da imagem.

3.4 Metodologias para Determinação da Emissividade

Dada a importância crucial da emissividade, diversas metodologias foram desenvolvidas para sua medição. Uma revisão sistemática da literatura classifica os métodos em duas categorias principais: diretos e indiretos (Giulietti *et al.*, 2025).

Métodos Diretos (Radiométricos): Baseiam-se na própria definição de emissividade Eq. (2), comparando a radiação emitida pela amostra com a de um corpo negro de referência. O principal desafio é garantir que a amostra e a referência estejam exatamente na mesma temperatura ou, alternativamente, medir a temperatura real da superfície da amostra com alta

precisão por um método independente (Giulietti *et al.*, 2025). Para a determinação empírica da emissividade, uma abordagem metrológica validada consiste na instrumentação da amostra com termopares embutidos para a aquisição da temperatura de referência. Ao equalizar essa medição de contato com a radiação captada por instrumentos como os pirômetros, torna-se possível isolar o parâmetro de emissividade do material. Esta arquitetura experimental foi empregada com rigor por Deus, Castro e Corrêa (2020) para o mapeamento da curva de emissividade de aços de baixo carbono em altas temperaturas, estudo no qual os autores propuseram o ajuste para descrever de forma fiel o comportamento radiativo da liga. De forma semelhante, Purpura *et al.* (2016) utilizaram um termopar de referência para desenvolver uma fórmula semi-empírica que permite corrigir a medição de um pirômetro monocromático para qualquer valor de emissividade ajustado no equipamento.

Métodos Indiretos (Reflectométricos): Estes métodos se baseiam na Lei de Kirchhoff para materiais opacos, descrita na Equação (5):

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (5)$$

Onde a emissividade (ε) é determinada a partir da medição da refletividade (ρ). Tipicamente, um feixe de radiação de uma fonte externa ilumina a amostra, e um detector mede a radiação refletida (Giulietti *et al.*, 2025). Embora sejam muito precisos em laboratório, sua aplicação in-situ em ambientes industriais é complexa (El Bakali *et al.*, 2019).

A medição em ambientes industriais é suscetível a interferências. El Bakali *et al.* (2019) detalham uma metodologia para subtrair sinais espúrios emitidos pelo ambiente (como o porta-amostras aquecido) utilizando um tubo metálico resfriado para bloquear temporariamente essas fontes de radiação parasita. De forma complementar, Zhang *et al.* (2025) desenvolveram uma técnica que utiliza uma abertura isotérmica com temperatura modulada para quantificar e eliminar ativamente o impacto da radiação ambiente e suas flutuações, melhorando significativamente a precisão da medição.

A exigência por confiabilidade metrológica impulsionou a consolidação de normativas técnicas rigorosas. No Brasil, o escopo de ensaios termográficos é regido pela ABNT NBR 16969:2021, que estabelece os métodos práticos *in situ* para a determinação e compensação da emissividade direcional de superfícies.

Para análises radiométricas em altas temperaturas a literatura legitima o Método Prático e Direto por Termometria de Contato. Neste arranjo experimental, a temperatura absoluta da interface é inicialmente extraída através da inserção de um transdutor mecânico galvânico (termopar tipo K). Simultaneamente, o equipamento de medição de temperatura sem contato é focalizado em uma região adjacente ao termopar. O procedimento consiste na alteração

consecutiva do parâmetro da emissividade na própria interface de controle do instrumento infravermelho até atestar a igualdade de valores entre a leitura óptica e a leitura fornecida pelo termopar. A convergência destes valores fornece a emissividade pontual associada ao aço ensaiado.

Internacionalmente, a norma ASTM E408-13(2025) é uma referência fundamental, detalhando métodos para determinar a emitância normal total, onde de acordo com a norma a emitância representa a taxa de energia radiante efetivamente libertada por aquela peça exata, levando em consideração todas as suas características físicas e imperfeições do momento. O Método B (Baseado em Emissão), descrito nesta norma, é o mais adequado para aplicações de alta temperatura, pois o instrumento mede diretamente a energia radiante emitida pela amostra, que deve estar aquecida a uma temperatura conhecida e estável. A calibração do instrumento é realizada com padrões de emitância conhecidos, garantindo que a medição ocorra na condição térmica de interesse.

3.5 Aspectos Metrológicos e Análise de Incertezas

A confiabilidade dos dados experimentais de emissividade é intrinsecamente dependente de uma análise metrológica rigorosa, uma vez que a incerteza de medição impacta diretamente a validade dos modelos térmicos e o controle de processos industriais (Cosoli *et al.*, 2025; Höser *et al.*, 2016). A literatura contemporânea enfatiza que a determinação da emissividade não deve ser tratada apenas como uma medição pontual, mas como um processo complexo sujeito a múltiplas fontes de erro que devem ser quantificadas segundo diretrizes internacionais, como o Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (ISO GUM), conforme Zhu *et al.* (2020).

A principal fonte de incerteza em métodos diretos de medição de emissividade reside na determinação exata da temperatura superficial da amostra. Nesse contexto é fundamental definir a radiância, que consiste na grandeza direcional elementar efetivamente captada pelos sensores sem contato. De forma simples, a radiância quantifica exatamente o feixe de energia que viaja no campo de visão da amostra até a lente do instrumento.

A relação não linear entre temperatura e radiância (descrita pela Lei de Planck) implica que erros na medição da temperatura superficial se propagam de forma fortemente amplificada para o cálculo da emissividade. Matematicamente, o peso dessa propagação de incerteza é inversamente proporcional à energia radiante térmica do corpo, tornando-se crítico especialmente em baixos comprimentos de onda e baixas temperaturas, condições nas quais a razão sinal-ruído ótico é desfavorável (Honnerová; Martan; Honner, 2017). Métodos de contato, como o uso de termopares, introduzem incertezas específicas, incluindo erros de

calibração, compensação da junta de referência, resolução do sistema de aquisição de dados e flutuações randômicas do sinal (Kee *et al.*, 2020). A instrumentação metrológica de contato não é isenta de interferências intrínsecas. Conforme detalhado por Paloposki e Liedquist (2005), a intrusão mecânica do termopar na amostra introduz vulnerabilidades termodinâmicas, notadamente a dissipação parasita de calor ao longo dos fios do sensor (efeito aleta) e a variação da resistência térmica de contato na interface.

No que tange à instrumentação radiométrica (pirômetros e câmeras termográficas), o Efeito do Tamanho da Fonte (SSE - Size-of-Source Effect) é identificado como uma componente crítica de incerteza. O SSE refere-se à radiação espúria proveniente de fora da área nominal de medição que atinge o detector devido a imperfeições ópticas, difração e espalhamento interno no instrumento (Zhu *et al.*, 2020). A calibração destes instrumentos deve ser realizada contra corpos negros de referência com alta estabilidade térmica e emissividade efetiva próxima da unidade, sendo a qualidade desta referência fundamental para a rastreabilidade da medição (Hatzl *et al.*, 2013; Vuelban *et al.*, 2015).

Fatores ambientais também desempenham um papel significativo na incerteza combinada. A radiação proveniente das vizinhanças (paredes do forno, suportes aquecidos) que é refletida pela amostra pode ser erroneamente interpretada como emissão própria do material, um problema exacerbado em amostras de baixa emissividade ou alta refletividade (Pérez-Sáez; Del Campo; Tello, 2008). Para mitigar este efeito, técnicas avançadas, como a modulação da radiação ambiente ou o uso de anteparos refrigerados, têm sido propostas para isolar o sinal da amostra (Zhang *et al.*, 2025; El Bakali *et al.*, 2019). Adicionalmente, a absorção da radiação infravermelha pelos constituintes atmosféricos, como vapor d'água e CO_2 , no caminho óptico entre a amostra e o sensor, deve ser considerada e, se possível, compensada ou minimizada (Honnerová; Martan; Honner, 2017).

Por fim, a própria dinâmica da superfície durante o aquecimento introduz variáveis complexas. A oxidação e a alteração da rugosidade superficial durante o teste modificam a emissividade em tempo real, exigindo que a incerteza associada à estabilidade temporal da amostra e à homogeneidade da temperatura superficial seja incluída no orçamento final de incertezas (Gabirondo-López *et al.*, 2025; Pelzmann *et al.*, 2022).

4 METODOLOGIA

4.1 Diretrizes Normativas e Estratégia Experimental

Ressalta-se que a condução experimental deste estudo foi viabilizada por meio das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na Vallourec Soluções Tubulares do Brasil. Sendo a empresa referência na produção de tubos de aço sem costura para aplicações críticas, o domínio sobre o comportamento térmico de suas ligas constitui um diferencial de processo fundamental. Dessa forma, todos os ensaios experimentais e medições contaram com a utilização integral da infraestrutura, dos instrumentos e das instalações industriais da companhia, garantindo o rigor e as condições operacionais necessárias para a validação técnica dos dados.

Para o desenvolvimento prático desta pesquisa, a metodologia experimental foi estruturada sob uma abordagem fundamentada no Método Prático e Direto por Termometria de Contato (Método de Referência Direta). O desenvolvimento do trabalho consistiu em submeter três amostras de aço-carbono a uma faixa de temperatura de 500 °C a 700 °C, discretizada em intervalos de 50 °C em um forno elétrico, garantindo o equilíbrio termodinâmico do sistema, para então correlacionar a temperatura real, aferida por contato direto, com a temperatura radiante, medida opticamente por pirometria.

A delimitação da faixa operacional de 500 °C a 700 °C justifica-se por critérios de relevância metalúrgica e de processo industrial. Este intervalo térmico corresponde estritamente à janela em que ocorre o tratamento térmico de revenimento para a classe de aços-carbono avaliada, etapa crucial para o alívio de tensões internas e ajuste das propriedades mecânicas do material. Portanto, a determinação exata da emissividade e do fator slope nessa faixa específica confere rastreabilidade e confiabilidade metrológica ao controle pirométrico automatizado durante o processamento térmico industrial nas linhas de produção.

Em relação ao arcabouço normativo, a fundamentação do ensaio seguiu os preceitos da norma ABNT NBR 16969:2021 (Ensaio não destrutivo — Termografia infravermelha — Princípios gerais), que dita as premissas radiométricas de aquisição de temperatura por radiação eletromagnética. No entanto, faz-se necessária uma adequação na execução procedimental: como a antiga norma brasileira específica para a compensação de emissividade (ABNT NBR 16485:2016) encontra-se oficialmente cancelada, os procedimentos práticos de medição de bancada deste trabalho foram embasados e adaptados a partir da norma internacional equivalente, a ASTM E1933-14 (2022) (*Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers*), reconhecida globalmente para o método

de contato, além de incorporar os princípios gerais de emissão contidos na ASTM E408-13(2025).

O procedimento foi desenhado de forma a seguir uma sequência lógica de ensaio, dividida em fases macro-operacionais que englobam a análise ambiental e geométrica, a equalização térmica dinâmica e o tratamento estatístico analítico, conforme detalhado a seguir.

4.1.1 Fase 1 - Posicionamento e Isolamento do Plano de Fundo (TAR)

Embora as normas ABNT NBR 16292:2014 e NBR 16969:2021 prevejam a medição e a neutralização analítica das contaminações radioativas exógenas do ambiente por meio da determinação quantitativa da Temperatura Aparente Refletida (TAR), no presente ensaio este parâmetro ambiental foi desconsiderado no algoritmo de compensação instrumental após a sua verificação inicial. Essa deliberação metodológica justifica-se pelo fato de que os ensaios foram conduzidos em temperaturas elevadas (500 °C a 700 °C). Durante a breve abertura da porta do forno para a tomada de dados, a amostra incandescente fica exposta à radiação do ambiente externo (aproximadamente 25 °C). De acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, como a emissão térmica é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta (T^4), a radiação incidente do ambiente representa menos de 2% do total da energia radiante no sistema. Uma vez que o aço absorve a maior parte dessa energia e reflete uma fração mínima, a parcela exógena efetivamente refletida para o instrumento introduz um desvio inferior a 0,5% no sinal captado pelo pirômetro. Esta interferência é matematicamente desprezável face à imensa magnitude da radiação emitida pelo material, tornando a compensação da Temperatura Aparente Refletida (TAR) irrelevante para o balanço radiométrico final.

O posicionamento estratégico das amostras no interior do forno mitigou drasticamente o chamado "efeito de cavidade". Ao posicionar a face-alvo da amostra voltada para a abertura frontal e alinhada ortogonalmente (perpendicular) ao eixo óptico do instrumento de medição (Figura 14), garantiu-se que a geometria de reflexão rebatesse as ondas espúrias. Dessa forma, a radiação difusa e especular proveniente das resistências e paredes aquecidas do forno refletia-se para fora do campo de visão (FOV - *Field of View*) do sensor. Consequentemente, o único plano de fundo refletido pela superfície da amostra em direção à lente do equipamento era o próprio ambiente externo do laboratório, que operava sob temperatura amena e controlada de aproximadamente 25 °C.

Em segundo lugar, pelo princípio delineado na Lei de Stefan-Boltzmann, o poder emissivo total de um corpo cresce de forma proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (T^4). Como as amostras operaram em elevadas temperaturas ao longo dos ensaios (cobrindo o espectro de interesse industrial em tratamentos térmicos de revenimento através de

patamares de 500 °C a 700 °C, a potência térmica da radiação espúria refletida por este ambiente externo a 25 °C torna-se matematicamente ínfima e desprezível face à magnitude da radiação espectral gerada pela própria liga metálica aquecida. Portanto, assumiu-se com segurança metrológica que o sinal infravermelho captado correspondia estritamente à emissão direta do material, tornando a inserção computacional da TAR insignificante para a exatidão da emissividade encontrada.

4.1.2 Fase 2 - Instrumentação e Homogeneização

Consolidada a segurança geométrica do arranjo, a fase de preparação e instrumentação prática teve início com a seleção e usinagem das amostras de teste, compreendendo classes distintas de duas grandes famílias metalúrgicas identificadas para fins de organização em blocos analíticos como Amostras A, B e C.

Cada peça foi instrumentada de modo a acoplar fisicamente um termopar tipo K de alta temperatura, previamente calibrado e conectado a um furo concêntrico na lateral da amostra, que foi preenchido com argila térmica de alta condutividade (Figura 8). O contato físico e a fixação mecânica rígida do sensor com a interface interna da amostra foram executados com extremo rigor. Esse cuidado foi mandatório para mitigar os erros associados à dissipação térmica por condução ao longo da haste do sensor (efeito aleta) e as resistências térmicas de contato indesejadas, assegurando que o sensor extraísse a temperatura, sem atrasos ou gradientes espúrios em relação à superfície.

O rito experimental seguiu para a etapa de aquecimento e estabilização térmica. O conjunto composto pela amostra e pelo termopar foi inserido no interior de um forno elétrico do tipo resistivo. Visando controlar as taxas de alteração morfológica e mitigar os efeitos de oxidação acelerada e severa da superfície metálica em temperaturas elevadas, o forno operou sob atmosfera puramente inerte através da injeção contínua de nitrogênio gasoso (N_2). O aquecimento foi parametrizado de forma escalonada e discreta. Em cada patamar térmico programado (com passos reduzidos de 50 °C na faixa crítica de 500 °C a 700 °C), o sistema foi mantido sob um tempo de encharque mínimo de 10 minutos após atingir a meta, aguardando-se a completa homogeneização do campo térmico da peça para garantir o regime permanente e o perfeito equilíbrio termodinâmico.

4.1.3 Fase 3 - Medição, Registro e Parametrização

Com o sistema estabilizado em regime permanente, iniciou-se a fase de medição simultânea e compensação normatizada. A temperatura real da superfície interna do aço foi continuamente registrada através da leitura do termopar de referência. Simultaneamente, dois pirômetros ópticos digitais foram posicionados externamente, sendo focados e apontados para

uma zona adjacente imediatamente próxima à junta de medição do termopar, garantindo que ambos os sensores avaliassem a mesma região.

O procedimento de extração da emissividade operou por meio de um ciclo iterativo e recursivo de modulação instrumental direta. O operador realizou o ajuste manual e incremental do parâmetro de emissividade e do fator de balanço espectral (slope) diretamente no firmware e painel do pirômetro. Esta alteração ativa estendeu-se de forma contínua até que a temperatura radiométrica lida pelo instrumento óptico convergisse e se igualasse exatamente à temperatura de referência registrada pelo termopar de contato, estabelecendo a igualdade.

O valor numérico de ε que produziu essa igualdade térmica foi registrado como a emissividade aparente e intrínseca daquele aço específico, naquela respectiva temperatura e estado de superfície. Para cada liga metálica e nível térmico, foram coletados no mínimo três pontos sob condições estáveis de correspondência. Essa amostragem constituiu a base de dados empíricos necessária para a execução da regressão linear, permitindo determinar analiticamente o valor exato de emissividade capaz de anular a diferença de temperatura entre os sensores.

4.1.4 Fase 4 -Tratamento Estatístico e Análise de Incertezas (GUM)

A quarta e última fase metodológica transferiu esses dados empíricos para um modelo matemático estruturado com base em regressão linear por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Como o ajuste da emissividade do pirômetro é realizado em incrementos discretos limitados pela resolução do painel e os dados experimentais apresentaram uma dispersão natural, o valor verdadeiro ideal não pode ser lido apenas de forma pontual.

A modelagem estatística padronizou o cálculo global da pesquisa ao tratar os desvios por meio de interpolação linear, determinando a emissividade analítica ideal na exata interceptação geométrica onde o desvio térmico diferencial entre os sensores é nulo.

O cálculo incorporou o tratamento estatístico rigoroso das incertezas combinadas e expandidas (através de avaliações do Tipo A e Tipo B, aplicação dos coeficientes de sensibilidade via derivadas parciais e cálculo da incerteza expandida com fator de abrangência) em estrita conformidade com as diretrizes do guia metrológico global (GUM - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*).

4.2 Equipamentos

Nesta seção serão apresentados os equipamentos utilizados na execução de todo o teste experimental.

Para o aquecimento das amostras, foi utilizado um forno elétrico por resistência, com dimensões internas de 400 mm x 400 mm x 400 mm e capacidade de atingir temperaturas de até 1200 °C conforme a figura 1.

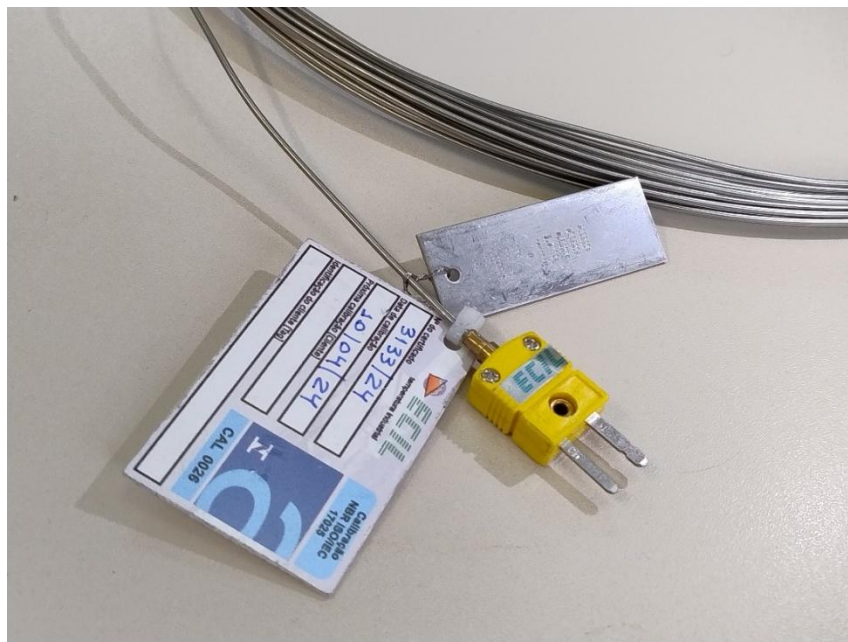
Figura 1 – Forno elétrico utilizado nos experimentos.



Fonte: O autor.

Para a medição por contato direto, utilizou-se um termopar do Tipo K e possui capacidade de medição na faixa de 0 °C a 1200 °C, com resolução de 0,1 °C. Sua finalidade concentrou-se na aferição contínua da temperatura de referência na superfície das amostras metálicas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Termopar usado nos experimentos.



Fonte: O autor.

Os sinais analógicos de tensão gerados pelo sensor de contato foram interpretados e convertidos por meio de um termômetro digital de canal único, modelo MT-450A, responsável por fornecer a leitura digitalizada em tempo real da temperatura termodinâmica obtida pelo termopar, de acordo com o exibido na Figura 3. Este dispositivo possui uma resolução de 0,1 °C e, para a faixa de operação de 0 °C a 1000 °C correspondente aos testes, apresenta uma precisão de $\pm [0,5 \% \text{ da leitura} + 1 \text{ } ^\circ\text{C}]$.

Figura 3 - Modelo de termômetro usado nos experimentos.



Fonte: O autor.

No que tange à instrumentação óptica monocromática, empregou-se um pirômetro IFM, modelo TW2001, com um alcance de comprimento de onda de 1 μm até 1,7 μm , um alcance de medição de 250 °C até 1600 °C com resolução de 1 °C e precisão de $\pm 0,5 \%$ do valor de medição ou pelo menos 4 °C. Este instrumento foi utilizado para avaliar o comportamento do sinal radiante sob diferentes configurações temporárias do parâmetro digital de emissividade, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Pirômetro 1 monocromático.



Fonte: O autor.

Complementarmente, a bancada radiométrica contou com um pirômetro bicromático (de duas cores) da série MARATHON FA/FR, especificamente o modelo FR1A, indicado na Figura 5. A aplicação deste sensor óptico concentrou-se no monitoramento da radiação e na análise paramétrica associada ao ajuste do fator slope. O equipamento é projetado para medições na faixa térmica de 500 °C a 1100 °C, apresentando uma precisão de sistema de $\pm$ (0,3% da medição + 2 °C) em condições sem atenuação do sinal.

Figura 5 - Pirômetro 2 bicromático.

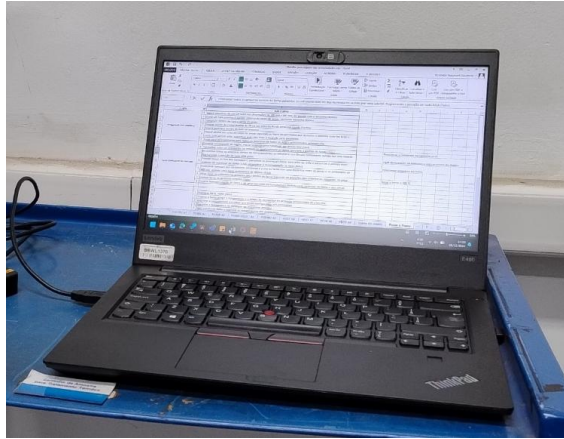


Fonte: O autor.

Por fim, todo o ecossistema de sensores e instrumentos ópticos foi integrado a um computador portátil (laptop). Esta unidade atuou como o centro de processamento de dados do

experimento, realizando o registro contínuo das medições coletadas, o tratamento estatístico das amostras e a execução dos algoritmos matemáticos para o orçamento final de incertezas.

Figura 6 - Notebook utilizado nos experimentos.

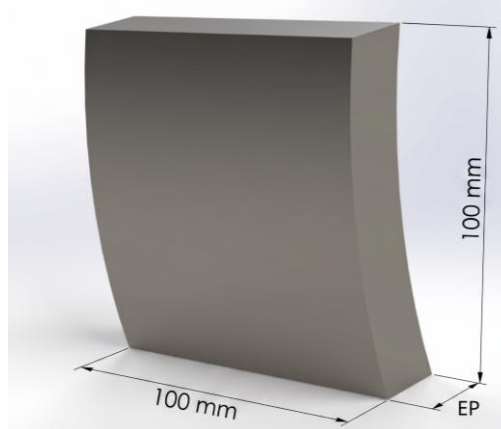


Fonte: O autor.

4.3 Preparação de Amostras

Para a preparação dos corpos de prova, foram extraídas amostras de tubos. As amostras possuem dimensões de 100 mm x 100 mm x EP (Figura 7), onde EP varia de acordo com a espessura da parede do tubo em que a amostra foi extraída. As amostras são ligas de aço-carbono cujas composições químicas específicas e correlações exatas de emissividade não serão detalhadas por questões de confidencialidade. Essas variáveis conjuntas representam propriedade intelectual patenteada da Vallourec e, para viabilizar a divulgação dos resultados sem expor o segredo industrial do processo, as amostras foram categorizadas unicamente como Amostra A, Amostra B e Amostra C.

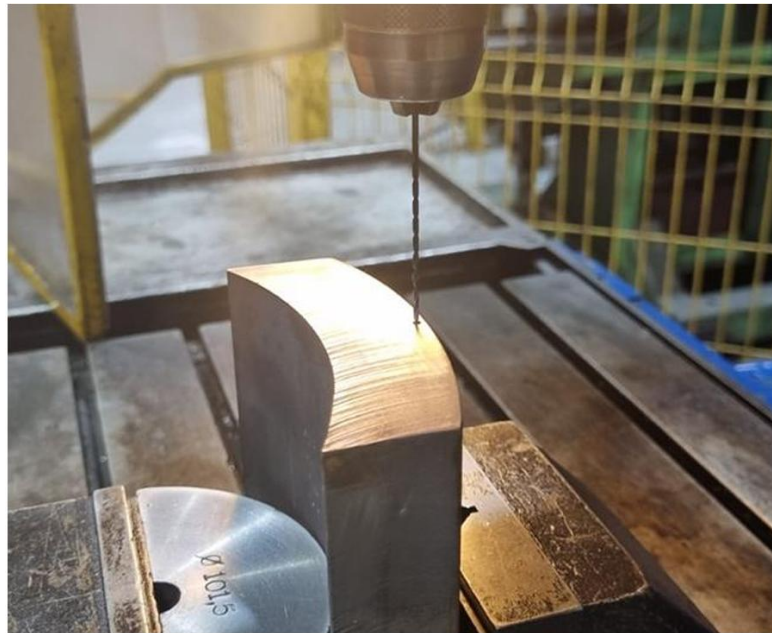
Figura 7 – Dimensões do corpo de prova.



Fonte: O autor.

Em seguida, foi feito um furo de 2 mm de diâmetro, próximo à parede externa da peça, também com base nas especificações do desenho técnico, procedimento ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Furação da amostra.



Fonte: O autor.

Posteriormente, foi inserida argila térmica no interior desta cavidade, onde o termopar foi então posicionado. Para garantir a fixação do sensor, um arame foi enrolado ao redor do corpo de prova, seguindo as faces do perímetro que delimitam a amostra onde o corte foi realizado, tomando-se o cuidado de não o transpassar sobre a superfície onde a medição óptica foi feita pelo pirômetro. O aspecto final da amostra instrumentada é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Montagem da amostra com o termopar.



Fonte: O autor.

4.4 Montagem da Bancada de Trabalho

Na etapa de montagem da bancada, o termopar foi conectado ao termômetro e foi iniciada a medição de temperatura em tempo real. Todos os refratários foram posicionados na metade da profundidade do forno, paralelos à parede de fundo, de modo que ficassem o mais distantes possível da porta frontal, considerando a necessidade de uma distância focal de 800 mm entre os pirômetros e as amostras. Consecutivamente, todas as amostras foram posicionadas no interior da câmara, paralelas ao refratário, com os fios do termopar direcionados para um dos lados, sendo a posição exata de cada amostra devidamente registrada, conforme evidenciado na Figura 10.

Figura 10 - Posição de montagem das amostras no interior.



Fonte: O autor.

Para evitar a obstrução da movimentação na área de trabalho, todos os fios dos termopares foram fixados e direcionados passando pela fenda na porta do forno até o termômetro, arranjo este detalhado na Figura 11.

Figura 11 - Local correto para a passagem dos fios do termopar.



Fonte: O autor.

No ambiente externo, a bancada do pirômetro foi posicionada em frente à porta do forno, conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Posição de montagem da bancada em frente ao forno.



Fonte: O autor.

Utilizando uma barra de calibração física, uma distância exata de 800 mm foi garantida entre as peças e os instrumentos ópticos (Figura 13).

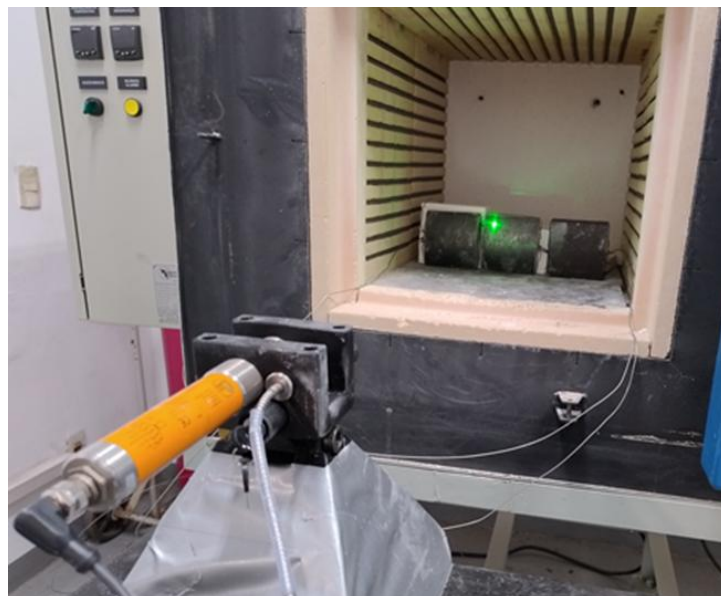
Figura 13 - Distância entre o pirômetro e as amostras.



Fonte: O autor.

Estabelecido o distanciamento focal, o laser do pirômetro foi apontado para a amostra alvo no interior do forno, alinhando-se com as marcações de referência presentes na peça, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Pirômetro apontado para as amostras.



Fonte: O autor.

Para resguardar as propriedades da amostra durante o aquecimento, o cilindro de gás N₂ foi conectado ao equipamento e aberto com o intuito de inertizar a atmosfera do forno, sistema exibido na Figura 15.

Figura 15 - Cilindro de gás conectado ao forno.



Fonte: O autor.

Finalmente, o forno foi configurado para o primeiro setpoint térmico por meio de seu painel de controle (Figura 16).

Figura 16 - Painel de controle do forno.



Fonte: O autor.

Aguardou-se a completa homogeneização térmica do forno e da peça, tomando como base a temperatura aferida tanto pelo termopar do forno quanto pelos termopares acoplados às

amostras. Após a constatação de que o sensor da amostra havia atingido a temperatura estipulada, aguardou-se um tempo de encharque de 10 minutos para garantir o equilíbrio termodinâmico do sistema.

4.5 Procedimento Operacional de Registro de Temperatura

Com a bancada experimental devidamente montada e a atmosfera do forno inertizada, iniciou-se a fase de aquisição de dados radiométricos e de contato. O procedimento operacional para o registro das temperaturas foi conduzido de maneira iterativa e sequencial, estruturado para assegurar a estabilidade e a confiabilidade térmica de cada leitura coletada.

Inicialmente, a data e a hora de início do ensaio foram devidamente registradas. Na sequência, o setpoint de temperatura foi configurado no painel do forno, aguardando-se a completa homogeneização térmica da câmara interna. Concomitantemente a esta etapa de estabilização, os valores iniciais dos parâmetros de emissividade e slope configurados nos pirômetros foram registrados, estruturando a tabela de acompanhamento exemplificada na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabela de registros dos parâmetros e temperaturas.

	DATA:	DATA:	DATA:	DATA:	DATA:	DATA:	DATA:	DATA:	DATA:	DATA:		
	16/05/25	16/05/25	16/05/25	16/05/25	16/05/25	16/05/25	20/05/25	20/05/25	20/05/25	26/05/25	26/05/25	26/05/25
Termopar (°C):	510,50	512,20	511,80	512,30	511,50	511,70	507,07	510,20	512,70	513,20	515,00	513,00
Emissiv. (E):	0,867	0,867	0,870	0,875	0,880	0,885	0,890	0,890	0,860	0,856	0,86	0,85
Temp. (°C):	512,00	513,00	513,00	513,00	512,00	512,00	503,00	507,00	511,00	512,00	514,00	512,00
Slope (E):	1,005	1,005	1,000	0,990	0,985	0,995	0,980	0,980	0,970	0,975	0,98	0,99
Temp. (°C):	NA	501,00	501,00	512,00	514,00	504,00	na	506,00	530,00	525,00	528,00	517,00

Fonte: O autor.

Após o termopar acoplado à amostra atingir a temperatura do setpoint estipulado, um tempo de encharque de 10 minutos foi rigorosamente mantido, garantindo o pleno equilíbrio termodinâmico do corpo de prova. Transcorrido esse período de repouso, as temperaturas aferidas pelo termopar de contato e pelos pirômetros ópticos foram registradas de forma simultânea para a respectiva amostra. Para viabilizar a captação do sinal infravermelho durante a leitura de tela, a porta do forno foi aberta e fechada de maneira breve, momento no qual foram extraídos os registros dos visores dos instrumentos demonstrados na Figura 17.

Figura 17 - Registros de temperatura dos pirômetros e do termopar.



Fonte: O autor.

O método de extração baseou-se em uma lógica de retroalimentação iterativa. Enquanto não se obtiveram pontos de dados suficientes para consolidar o patamar em análise, o procedimento foi repetido a partir do ajuste nos instrumentos radiométricos, alterando-se manualmente as configurações de emissividade e slope em incrementos finos de 0,002. Depois de coletados os pontos de dados necessários para a consolidação matemática daquela faixa, o ciclo operacional foi integralmente reiniciado a partir da configuração do forno, escolhendo-se o próximo setpoint de temperatura para dar seguimento à rampa de testes.

4.6 Cálculo da Emissividade e da Incerteza

Após a coleta de dados, as informações obtidas para cada amostra e setpoint de temperatura foram organizadas em colunas, compreendendo as temperaturas do termopar, as temperaturas do pirômetro e os valores de emissividade. Posteriormente, calculou-se as diferenças de temperaturas entre os sensores, conforme apresentado na Tabela 2.

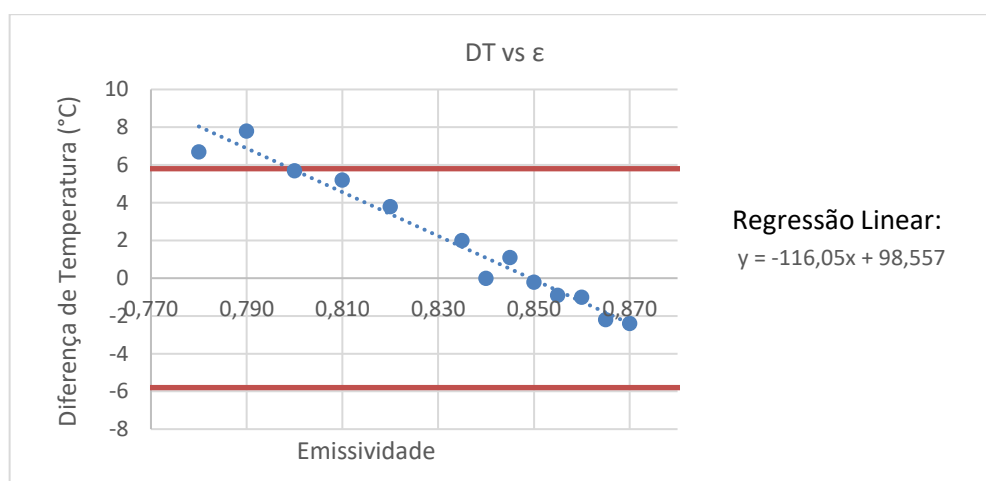
Tabela 2 - Tabela de dados para calcular o DT.

TC	Piro	Emis	DT
510,5	512	0,867	1,5
512,2	513	0,867	0,8
511,8	513	0,870	1,2
512,3	513	0,875	0,7
511,5	512	0,880	0,5
511,7	512	0,885	0,3
507,07	503	0,890	-4,07

Fonte: O autor.

As informações tabuladas foram transpostas para um gráfico, no qual a diferença de temperatura foi plotada no eixo das ordenadas (y) em função dos valores de emissividade no eixo das abscissas (x), permitindo a visualização do ajuste matemático por regressão linear, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Exemplo gráfico de regressão linear.



Fonte: O autor.

A avaliação da incerteza de medição para este estudo foi conduzida em estrita conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM). O procedimento analítico foi dividido na definição do modelo matemático, avaliações do Tipo A e do Tipo B, aplicação dos coeficientes de sensibilidade e no cálculo da incerteza expandida.

4.6.1 Definição do Mensurando e do Modelo Matemático

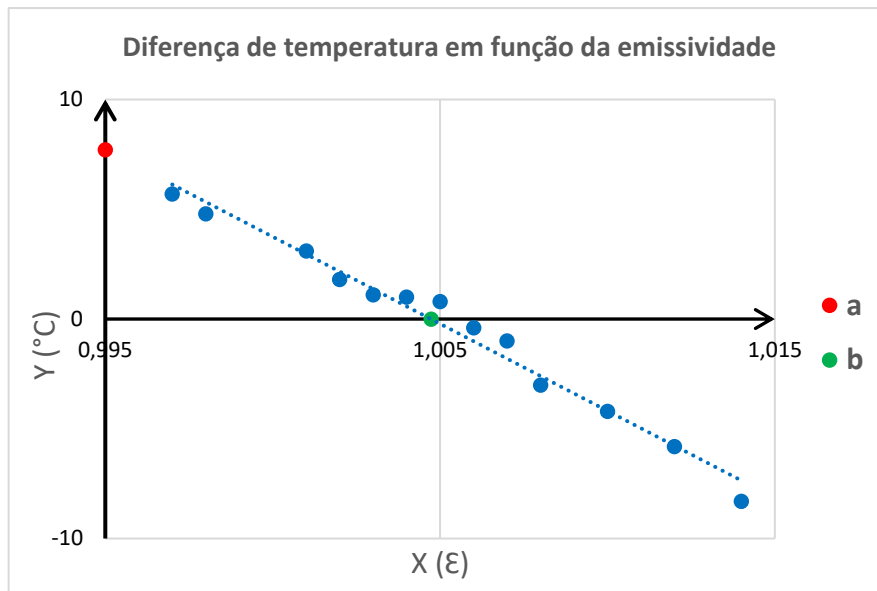
O objetivo principal da análise estatística por regressão linear foi determinar a emissividade real da amostra (o mensurando). Esta é definida como o valor exato de

emissividade no qual a diferença de temperatura entre o pirômetro e o termopar de referência é igual a zero ($\Delta T = 0$).

Como o ajuste da emissividade do pirômetro é realizado em incrementos discretos limitados pela resolução do equipamento, e os dados experimentais apresentam uma dispersão natural, o valor verdadeiro não pode ser lido diretamente. Portanto, o mensurando é determinado por meio de interpolação linear utilizando o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), conforme recomendado pelo ISO GUM (Seção 4.1.1 e anexo H.3.1). Ao ajustar um modelo linear ($y = a + bx$) aos dados de calibração (Figura 19), a melhor estimativa para a emissividade (X_0) é obtida igualando a equação a zero, conforme Equação (6):

$$X_0 = -\frac{a}{b} \quad (6)$$

Figura 19 - Intercepções dos eixos da regressão linear gráfica.



Fonte: O autor.

4.6.2 Avaliação do Tipo A da Incerteza Padrão

Em vez de calcular o desvio padrão de uma média aritmética simples, a repetitividade e a dispersão dos dados experimentais foram avaliadas por meio da incerteza estatística da regressão linear ajustada.

De acordo com o GUM (Anexo H.3.2, Eq. H.13e), os parâmetros da regressão, intercepto (a) e inclinação (b), possuem variâncias inerentes, $u^2(a)$ e $u^2(b)$. Como esses parâmetros são derivados simultaneamente do mesmo conjunto de pontos experimentais, existe uma covariância entre eles. Esta covariância é definida pela relação apresentada na equação (7):

$$u(a, b) = -\bar{X} * u^2(b) \quad (7)$$

A incerteza padrão do Tipo A da emissividade interpolada (u_A) é então calculada usando a lei de propagação de incertezas para variáveis correlacionadas seguindo a Equação (8):

$$u_A^2 = \left(-\frac{1}{b}\right)^2 * u^2(a) + \left(\frac{a}{b^2}\right)^2 * u^2(b) + 2 * \left(-\frac{1}{b}\right) * \left(\frac{a}{b^2}\right) * u(a, b) \quad (8)$$

4.6.3 Avaliação do Tipo B da Incerteza Padrão

As incertezas padrão do Tipo B foram avaliadas com base nas especificações fornecidas em certificados de calibração e manuais dos fabricantes (GUM, Seções 4.3.3 e 4.3.7). Os erros máximos admissíveis foram convertidos em incertezas padrão com base em suas distribuições de probabilidade presumidas:

- Distribuição Normal: Dados acompanhados por um nível de confiança declarado (por exemplo, 95% de certificados de calibração ou manuais específicos) são divididos por seu respectivo fator de abrangência (k).
- Distribuição Retangular: Especificações do fabricante sem um nível de confiança declarado são presumidas como tendo uma probabilidade igual de estar em qualquer lugar dentro da faixa especificada, e são, portanto, divididas por $\sqrt{3}$.

As equações aplicadas para determinar as incertezas-padrão de cada equipamento termométrico são detalhadas a seguir:

Pirômetro com Certificado de Calibração:

Para o pirômetro, a incerteza-padrão, denotada por $u(T_{Pyro})$, é obtida a partir da incerteza expandida declarada em seu respectivo certificado de calibração (U_{cert}). Assumindo uma distribuição de probabilidade normal (GUM, Seção 4.3.3), o valor é dividido pelo fator de abrangência (k) correspondente ao nível de confiança estabelecido (geralmente de 95%), conforme a Equação (9):

$$u(T_{Pyro}) = U_{cert} / k \quad (9)$$

Termômetro com Manual do fabricante:

A incerteza-padrão associada ao termômetro de painel, $u(T_{Term})$, é estimada com base na exatidão (limites de erro máximo) estipulada no manual do fabricante. Como não há declaração de um nível de confiança específico, o GUM (Seção 4.3.7) recomenda a adoção de uma distribuição de probabilidade retangular. Consequentemente, divide-se a semi-amplitude do limite de erro (Accuracy) pela raiz quadrada de 3, resultando na Equação (10):

$$u(T_{Term}) = Accuracy / \sqrt{3} \quad (10)$$

Termopar com Certificado de Calibração:

De forma análoga ao procedimento adotado para o pirômetro, a incerteza-padrão do termopar de referência $u(T_{TC})$, é extraída de seu certificado de calibração. A incerteza expandida (U_{cert}) é convertida em incerteza-padrão dividindo-se o valor pelo seu fator de abrangência (k), resultando na Equação (11):

$$u(T_{TC}) = U_{cert}/k \quad (11)$$

Resolução das Etapas de Ajuste (Equipamento):

A incerteza associada à resolução (u_{res}) surge da limitação do mostrador e do sistema de configuração do pirômetro, visto que o ajuste da emissividade ocorre em incrementos discretos. Conforme as diretrizes do GUM (Seção F.2.2.1), uma vez que o valor verdadeiro possui igual probabilidade de se situar em qualquer ponto dentro do intervalo correspondente à menor divisão de ajuste do instrumento (representada pela resolução δx), adota-se uma distribuição de probabilidade retangular. Consequentemente, a sua incerteza padrão é calculada dividindo-se o valor da resolução pela raiz quadrada de 12, conforme mostrado na Equação (12):

$$u_{res} = \delta x / \sqrt{12} \quad (12)$$

4.6.4 Coeficientes de Sensibilidade (c_i)

Como as incertezas dos equipamentos termométricos são expressas em graus Celsius e o mensurando (emissividade) é adimensional, é necessária uma conversão de unidades. De acordo com o GUM (Seção 5.1.3), isso é alcançado usando coeficientes de sensibilidade (c_i), que são as derivadas parciais da relação funcional em relação às variáveis de entrada. Derivado da lei de Stefan-Boltzmann em relação à temperatura, o coeficiente de sensibilidade aplicado foi calculado e obtido uma fórmula conforme a Equação (13):

$$c_i = \frac{4 * \varepsilon}{T} \quad (13)$$

Com o coeficiente de sensibilidade definido, as incertezas-padrão de temperatura de cada instrumento são convertidas em contribuições de incerteza para a emissividade (grandeza adimensional). Essa tradução é realizada multiplicando-se a incerteza original de cada sensor pelo coeficiente correspondente.

Dessa forma, a contribuição individual oriunda da medição do termopar é calculada conforme a Equação (14):

$$u_{term}^2 = c_i * u(T_{TC}) \quad (14)$$

De maneira análoga, a contribuição decorrente das leituras do pirômetro é determinada pela Equação (15):

$$u_{Piro}^2 = c_i * u(T_{Piro}) \quad (15)$$

4.6.5 Incerteza Combinada e Expandida

A incerteza padrão combinada (u_c) agrega todas as fontes de variação presentes no experimento. Seguindo a lei de propagação de incertezas (GUM, Seção 5.1.2, Eq. 10), u_c é a raiz quadrada positiva da variância combinada, que é a soma dos quadrados de todas as fontes não correlacionadas.

Na prática analítica deste estudo, isso corresponde à raiz da soma dos quadrados de todas as contribuições de incerteza individuais já ponderadas pelos seus coeficientes de sensibilidade, incluindo as avaliações do Tipo A, do Tipo B e a incerteza associada à resolução das etapas de ajuste do equipamento (u_{res}^2). Esse agrupamento matemático é expresso pela Equação (16):

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{res}^2 + u_{TC}^2 + u_{term}^2 + u_{Piro}^2} \quad (16)$$

Por fim, para atender aos requisitos técnicos e fornecer uma margem de segurança adequada para o resultado analítico, a incerteza expandida (U) é calculada (GUM, Seções 6.2.1 e 6.2.2). Embora o número de medições repetidas ($n=3$) resulte em um baixo grau de liberdade para a avaliação do Tipo A, a incerteza padrão combinada (u_c) deste estudo é amplamente dominada pelas fontes de incerteza do Tipo B como mostrado na Equação (16). De acordo com o Anexo G do GUM (Seção G.4.3), as incertezas do Tipo B obtidas de resoluções de equipamentos e certificados de calibração possuem graus de liberdade considerados infinitos. Conforme a equação de Welch-Satterthwaite (GUM, Seção G.4.1), a combinação dessas variâncias eleva substancialmente o número efetivo de graus de liberdade da medição. Portanto, com base na Seção 6.3.3 e na Tabela G.2 da distribuição t de Student (ISO GUM), o domínio das incertezas do Tipo B justifica estatisticamente a adoção do fator de abrangência $k = 2$ para garantir uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

O cálculo da incerteza expandida é dado pela Equação (17):

$$U = 2 * u_c \quad (17)$$

4.6.6 Declaração Final do Resultado:

O valor final determinado é relatado como:

Emissividade = $X_0 \pm U$ (a um nível de confiança de 95%).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta as descobertas derivadas dos procedimentos experimentais de calibração e medição. Para fornecer uma avaliação clara e lógica do desempenho dos equipamentos, os resultados estão estruturados em três fases principais.

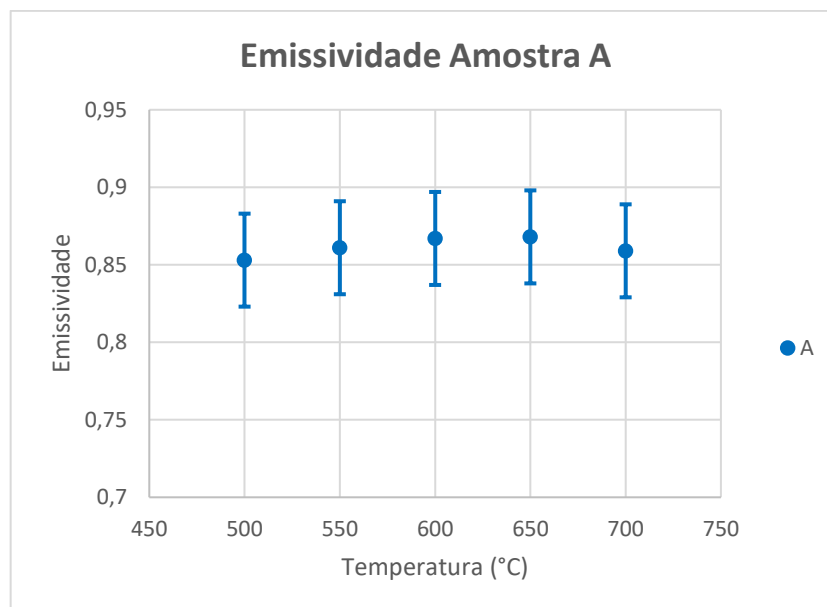
Inicialmente, os dados de regressão linear usados para determinar a emissividade de referência são detalhados. Posteriormente, a definição completa da incerteza é apresentada para validar a confiabilidade das medições. Por fim, a aplicação prática desses parâmetros nas classes dos aços, dentro da faixa de temperatura de 500 °C a 700 °C, é analisada.

5.1 Resultados dos parâmetros de emissividade e slope

As tendências de comportamento dos materiais avaliados são apresentadas nos gráficos a seguir. Neles, detalham-se os valores de emissividade obtidos para cada classe de aço em função da temperatura, juntamente com as suas respectivas incertezas expandidas.

Inicialmente, o comportamento espectral da liga correspondente à Amostra A é detalhado por meio dos resultados gráficos de emissividade dispostos na Figura 20, sendo possível constatar que as variações observadas entre os patamares de temperatura não excedem a margem de incerteza da medição.

Figura 20 - Resultados gráficos de emissividade para Amostra A.

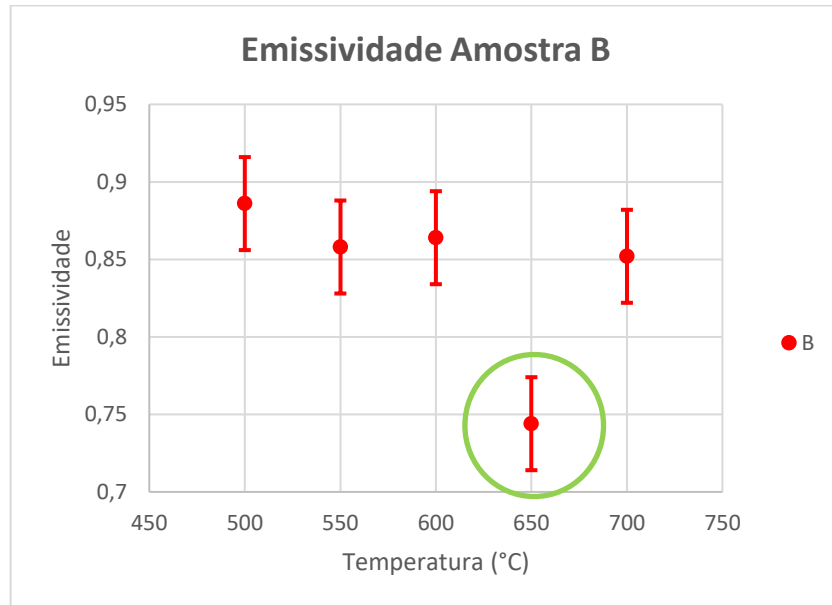


Fonte: O autor.

Conforme ilustrado na Figura 21, um ponto de dados anômalo (*outlier*) foi observado a 650 °C, o qual desvia significativamente da tendência comportamental geral do material. À exceção desse ponto, constatou-se que os dados experimentais apresentaram elevada proximidade mútua, exibindo uma baixa variação na diferença de temperatura (DT), de modo

que não foram registrados valores de desvio superiores ao limite de erro de medição do pirômetro mesmo variando a emissividade entre 0,8 e 0,87. Como a causa-raiz desse desvio específico a 650 °C não pôde ser determinada por limitações instrumentais, esse valor isolado não é confiável e foi excluído do cálculo da média global para garantir a confiabilidade dos parâmetros consolidados.

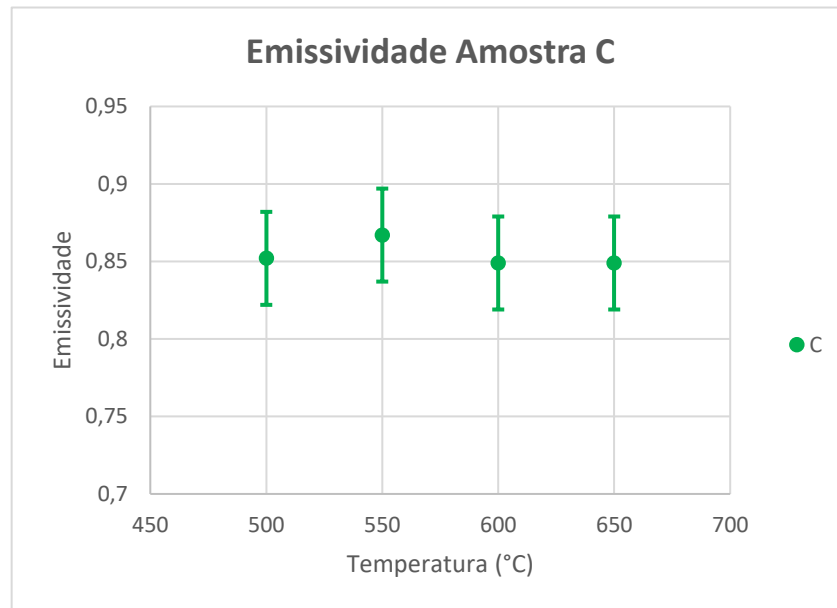
Figura 21 - Resultados gráficos de emissividade para a Amostra B.



Fonte: O autor.

De maneira análoga ao padrão observado nas Figuras 19 e 20, os resultados referentes à Amostra C, ilustrados na Figura 22, demonstram uma elevada estabilidade. Observa-se que, apesar das diferentes temperaturas impostas ao sistema durante os testes, o parâmetro de emissividade calculado não apresentou nenhuma oscilação cuja amplitude fosse superior à incerteza combinada do experimento.

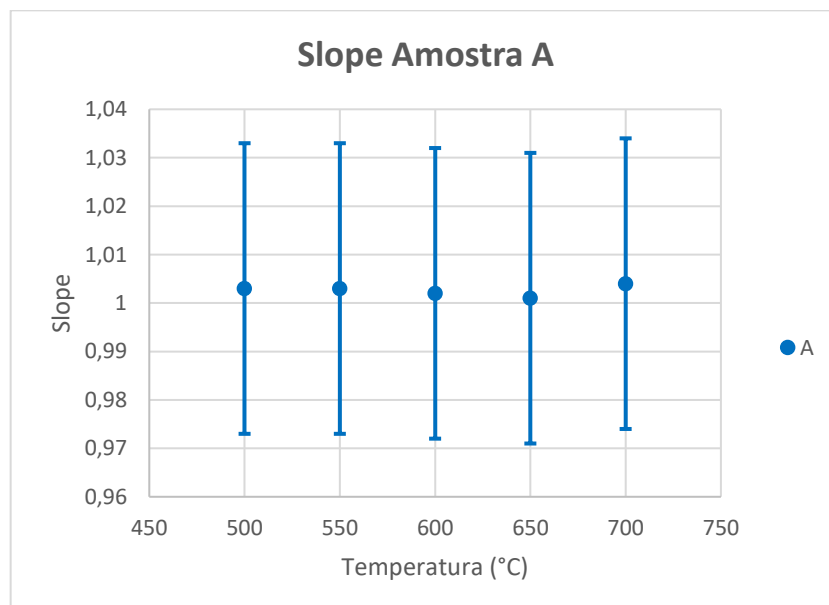
Figura 22 - Resultados gráficos de emissividade para a Amostra C.



Fonte: O autor.

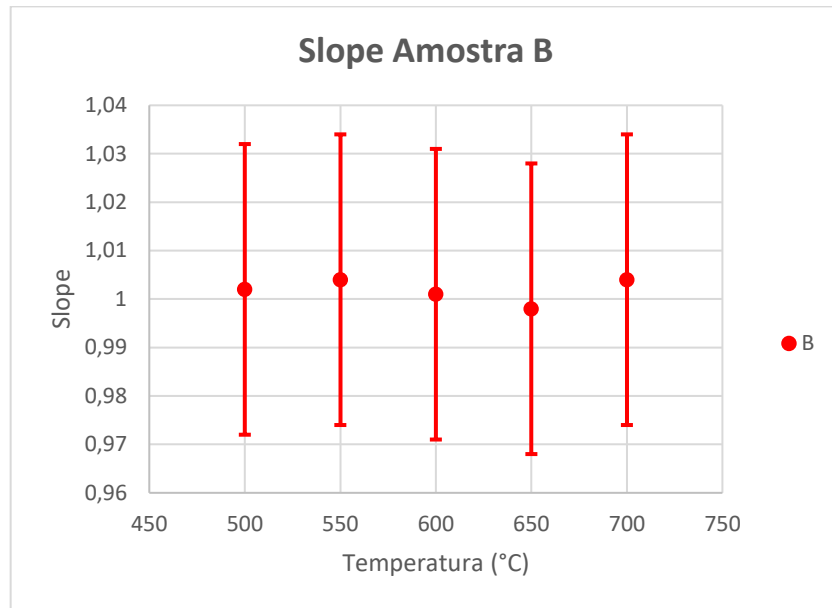
Sob a mesma lógica de análise, o comportamento do fator de inclinação espectral (slope) foi mapeado para as três condições experimentais. Os resultados gráficos deste parâmetro para a liga da Amostra A encontram-se representados na Figura 23, ao passo que os perfis térmicos equivalentes para as demais amostras são exibidos na Figura 24 (Amostra B) e na Figura 25 (Amostra C).

Figura 23 - Resultados gráficos de slope para a Amostra A.



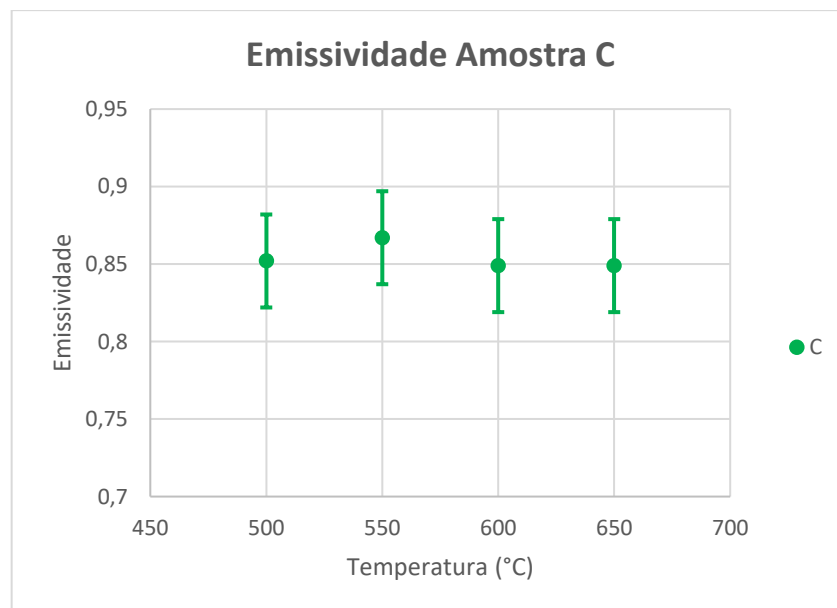
Fonte: O autor.

Figura 24 - Resultados gráficos de slope para a Amostra B.



Fonte: O autor.

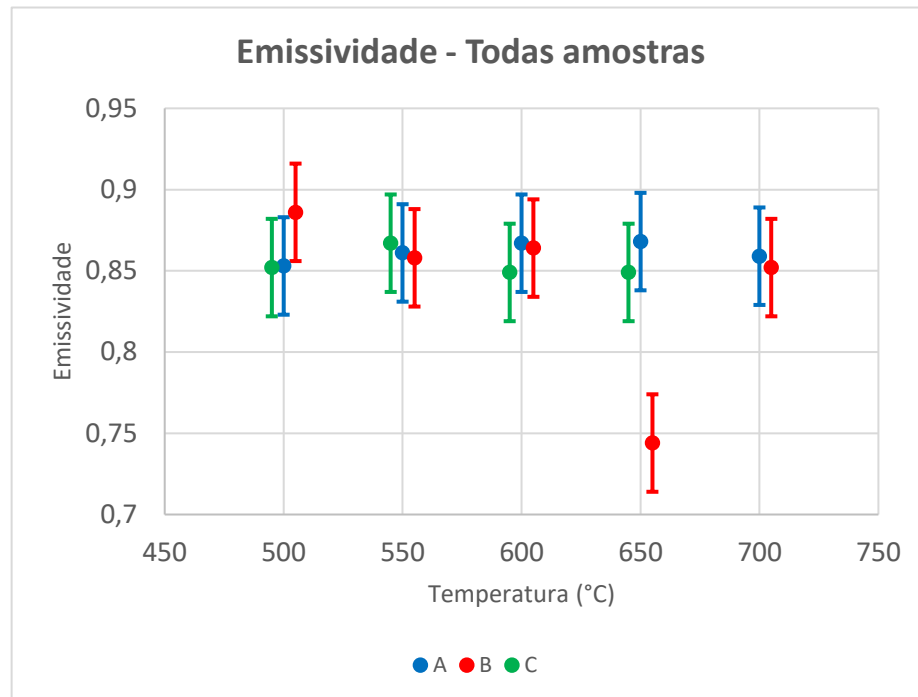
Figura 25 - Resultados gráficos de slope para a Amostra C.



Fonte: O autor.

Os resultados experimentais gerais obtidos para a totalidade dos graus de aço avaliados foram sintetizados de forma sobreposta para fins de comparação direta. O comportamento comparativo da emissividade para todas as amostras é ilustrado na Figura 26, enquanto a resposta combinada do parâmetro slope face à rampa de aquecimento é exibida na Figura 27.

Figura 26 - Resultados gráficos de emissividade para todas as amostras.



Fonte: O autor.

Figura 27 - Resultados gráficos de slope para todas as amostras.



Fonte: O autor.

A caracterização quantitativa consolidada dos valores calculados de emissividade e slope, incluindo as suas respectivas incertezas associadas, foi categorizada por classe de aço e temperatura, encontrando-se sumarizada na Tabela 3.

É importante notar que um ponto de dados de emissividade anômalo (outlier) foi registrado a 650 °C, conforme ilustrado anteriormente na Figura 19, o qual desvia significativamente da tendência comportamental geral do material. Embora esse valor esteja incluído na tabela para total transparência, sua causa raiz não pôde ser determinada. Consequentemente, esta leitura específica é considerada não confiável e foi excluída do cálculo da média global consolidada para garantir a confiabilidade dos parâmetros.

A partir da análise destes dados tabulados, cumpre destacar o comportamento da incerteza da emissividade registrada para a Amostra C a 500 °C, que se apresentou matematicamente elevada de forma análoga ao ocorrido com a Amostra B a 650 °C. Conforme detalhado nas análises, essa alta amplitude decorre, da baixa variação na diferença de temperatura (DT) que não produziu desvios superiores ao limite de erro de medição do pirômetro, fazendo com que a equação do guia GUM propagasse uma margem de incerteza ampliada.

Por fim, é importante ressaltar que não foi possível realizar a coleta de dados para a Amostra C na temperatura de 700°C por motivos de logística e tempo reservado para os experimentos no laboratório da empresa.

Tabela 3 - Tabela de resumo para todos os resultados.

	Amostra A		Amostra B		Amostra C	
Temperatura (°C)	Emissividade	Slope	Emissividade	Slope	Emissividade	Slope
500	0,853 ±0,024	1,003 ±0,022	0,886 ±0,022	1,002 ±0,022	0,852 +/-0,058	0,988 +/-0,022
550	0,861 ±0,024	1,003 ±0,022	0,858 0,022	1,004 ±0,022	0,867 +/-0,022	1,006 +/-0,023
600	0,867 ±0,022	1,002 ±0,022	0,864 ±0,023	1,001 ±0,024	0,849 +/-0,023	0,996 +/-0,023
650	0,868 ±0,022	1,001 ±0,022	0,744 ±0,041	0,998 ±0,022	0,849 +/-0,022	1,005 +/-0,022
700	0,859 ±0,022	1,004 ±0,022	0,852 ±0,022	1,004 ±0,022	N/A	N/A

Fonte: O autor.

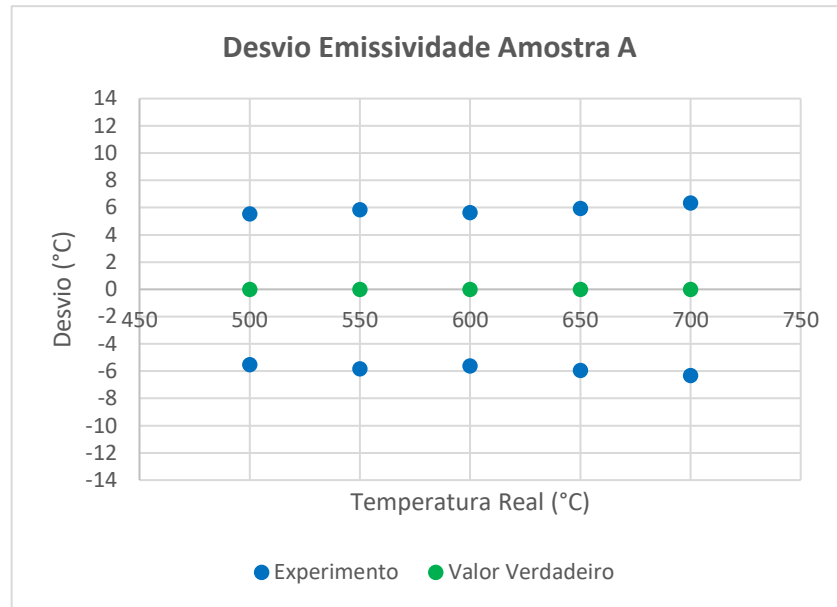
5.2 Propagação da Incerteza da Emissividade na Temperatura

Com o objetivo de quantificar o impacto prático da variância da emissividade no balanço térmico do ensaio, esta subseção analisa o modo como a incerteza do mensurando se propaga para a leitura final da temperatura realizada pelos instrumentos ópticos. Por meio de um tratamento matemático fundamentado em derivadas parciais da Lei de Stefan-Boltzmann, a incerteza padrão da emissividade foi convertida em uma variação equivalente de temperatura.

Os diagramas a seguir ilustram a incerteza de temperatura resultante (ΔT) gerada em cada patamar térmico para todas as classes de aço avaliadas, compreendendo os perfis dispostos na Figura 28 para a Amostra A, na Figura 29 para a Amostra B e na Figura 30 para a Amostra C.

Como exemplo, dada uma leitura do pirômetro de 550 °C e contabilizando apenas a incerteza da emissividade, a temperatura real da superfície do tubo pode estar entre 544 °C e 556 °C (± 6 °C).

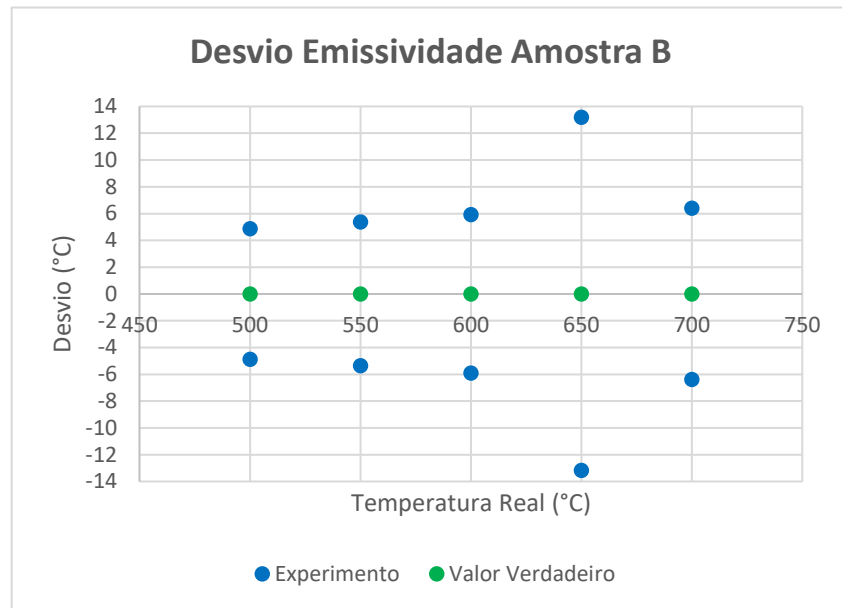
Figura 28 - Desvio gráfico para resultados de emissividade da amostra A.



Fonte: O autor.

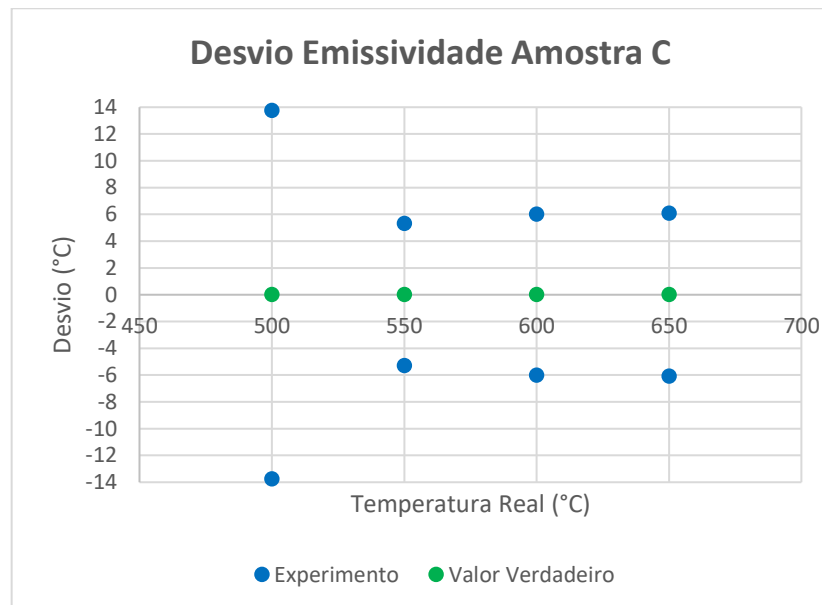
Destaca-se o comportamento singular observado nos ensaios da Amostra B a 650 °C (Figura 29) e da Amostra C a 500 °C (Figura 30), nos quais a propagação da incerteza da emissividade resultou em amplas margens de desvio de temperatura. Essa elevação estatística decorre, paradoxalmente, de uma elevadíssima convergência nos dados experimentais. Nessas duas condições, a variação na diferença de temperatura (DT) foi tão pequena que não produziu valores de desvio superiores ao limite intrínseco de erro de medição do pirômetro.

Figura 29 - Desvio gráfico para resultados de emissividade da amostra B.



Fonte: O autor.

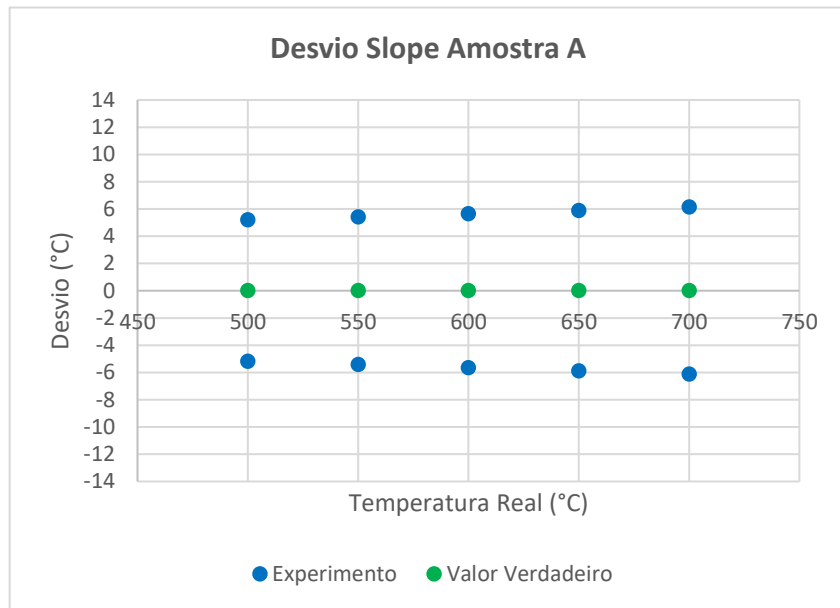
Figura 30 - Desvio gráfico para resultados de emissividade da amostra C.



Fonte: O autor.

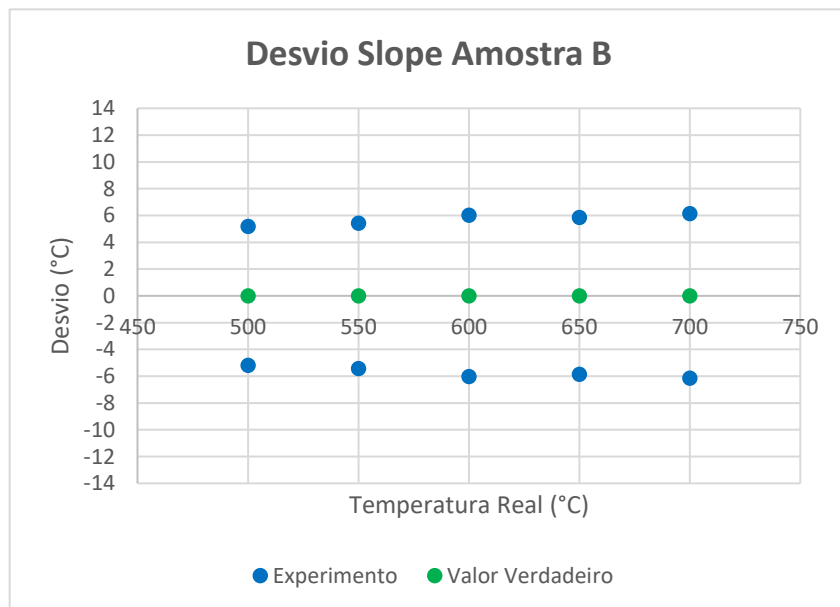
Sob o mesmo princípio de análise de desvios propagados, as incertezas de temperatura resultantes das variações do parâmetro slope são discriminadas na Figura 31 para a Amostra A, na Figura 32 para a Amostra B e na Figura 33 para a Amostra C.

Figura 31 - Desvio gráfico para resultados de slope da amostra A.



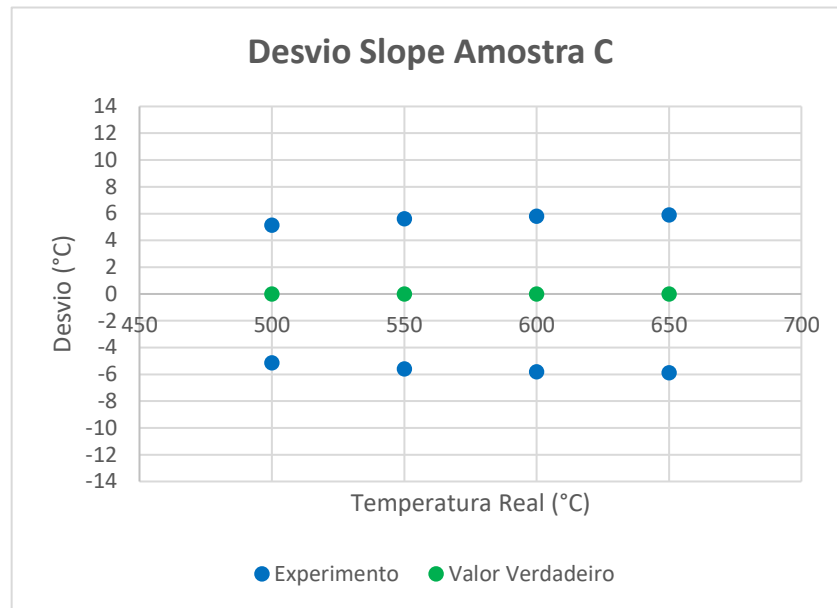
Fonte: O autor.

Figura 32 - Desvio gráfico para resultados de slope da amostra B.



Fonte: O autor.

Figura 33 - Desvio gráfico para resultados de slope da amostra C.



Fonte: O autor.

5.3 Análise Consolidada dos Parâmetros Radiométricos

Com o intuito de estabelecer uma referência única e robusta para o comportamento dos aços avaliados, os resultados obtidos individualmente para as três amostras foram submetidos a um tratamento estatístico de consolidação global. Este procedimento consistiu no cálculo da média aritmética dos valores de emissividade e de slope obtidos ao longo de toda a faixa de temperatura investigada (500 °C a 700 °C), bem como na propagação das incertezas associadas a cada mensuração, assegurando que o intervalo de confiança de 95% fosse preservado na determinação do resultado final.

A consolidação estatística demonstrou uma alta repetitividade dos dados entre as amostras testadas, reforçando a validade do procedimento experimental adotado. Como resultado global desta investigação, foram determinados os seguintes parâmetros representativos para a liga metálica em estudo: para a emissividade, obteve-se um valor médio de $0,860 \pm 0,023$; de forma análoga, para o parâmetro slope, encontrou-se o valor global de $1,001 \pm 0,022$. Ambos os resultados foram declarados com um nível de confiança de 95%, conforme as diretrizes estabelecidas pelo guia GUM, representando a melhor estimativa operacional para o monitoramento térmico industrial do referido material na faixa térmica de revenimento.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho atingiu com êxito a finalidade geral de mapear e padronizar o comportamento radiativo de aços submetidos a altos gradientes térmicos, cumprindo integralmente todos os objetivos específicos propostos para a pesquisa.

Em primeiro lugar, o trabalho obteve sucesso em aplicar a norma ABNT para a medição de emissividade, utilizando os preceitos fundamentais da ABNT NBR 16969:2021 (princípios gerais de termografia), suportados pela metodologia prática da norma internacional ASTM E1933-14. Essa união normativa permitiu definir um método para padronizar o cálculo, garantido pelo uso sistemático do Método de Referência Direta (Contato) associado à modelagem estatística. Essa abordagem assegurou a rastreabilidade metrológica ao mitigar incertezas inerentes à radiação de fundo e à dissipação térmica dos termopares.

Com metodologia estabelecida, foi possível medir a faixa de valores de emissividade de diferentes aços em diferentes temperaturas. Ao analisar as faixas de emissividade encontradas, a avaliação experimental demonstrou que o comportamento radiativo das amostras apresentou estabilidade estatística e não variou de forma significativa dentro do espectro térmico estudado de 500 °C a 700 °C, correspondente às temperaturas típicas de tratamento de revenimento.

Diante da estabilidade observada nos ensaios, comprovou-se a viabilidade de agrupar as faixas de emissividade para abranger as várias temperaturas próximas sem perda de precisão. Da mesma forma, como o comportamento térmico das amostras analisadas revelou-se estatisticamente equivalente, o estudo cumpriu seu último objetivo ao agrupar as faixas de emissividade para abranger os aços próximos em um único modelo de calibração para uso no chão de fábrica.

Consequentemente, conclui-se que os parâmetros radiométricos podem ser consolidados para os materiais avaliados nesta faixa de operação, resultando em valores constantes recomendados de

Emissividade: $0,860 \pm 0,023$ (Nível de Confiança de 95%).

Slope: $1,001 \pm 0,022$ (Nível de Confiança de 95%).

Quando propagada através do modelo de medição, a incerteza combinada desses parâmetros introduz um desvio de temperatura de aproximadamente ± 6 °C nas leituras do pirômetro.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como uma progressão natural deste estudo, recomenda-se conduzir o mesmo procedimento experimental para outras classes de aços usados na indústria. A aplicação desta metodologia validada a uma nova família de ligas permitirá a expansão do banco de dados operacional, garantindo parâmetros de emissividade precisos e o monitoramento da temperatura em uma gama mais ampla de materiais.

A análise térmica deve ser estendida para faixas de temperatura mais elevadas, especificamente de 750 °C a 1100 °C, que correspondem às temperaturas típicas dos processos de austenitização e reaquecimento. A aplicação desta metodologia a novas ligas e espectros térmicos mais amplos garantirá um banco de dados altamente robusto e abrangente para o monitoramento de temperatura industrial.

8 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1933-14: Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E408-13(2025): Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques. West Conshohocken: ASTM International, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16292: Ensaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16485: Termografia — Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. (Cancelada).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16969: Ensaios não destrutivos — Termografia infravermelha — Princípios gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COSOLI, G. *et al.* A Measurement Approach for Characterizing Temperature-Related Emissivity Variability in High-Emissivity Materials. *Sensors*, v. 25, n. 2, p. 487, 16 jan. 2025.

DEUS, V. S. de; CASTRO, J. A. de; CORRÊA, S. R. Prediction of the emissivity curve at high temperatures of low carbon steel. *Journal of Materials Science Research*, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 59-69, 2020.

DEWITT, D. P.; NUTTER, G. D. (ed.). *Theory and practice of radiation thermometry*. New York: John Wiley & Sons, 1988.

EL BAKALI, A. *et al.* A fast and versatile method for spectral emissivity measurement at high temperatures. *Review of Scientific Instruments*, v. 90, n. 11, p. 115116, 21 nov. 2019.

GABIRONDO-LÓPEZ, J. *et al.* Experimental Analysis of Emissivity in Inconel 718 for Laser Metal Deposition Temperature Monitoring with Thermal Imaging. *Research Square (Preprint)*, 28 mar. 2025.

GIULIETTI, N. *et al.* Spectral emissivity measurement for high-temperature applications: a systematic review. *Acta IMEKO*, v. 14, n. 1, p. 1-17, mar. 2025.

HATZL, S. *et al.* Direct Measurements of Infrared Normal Spectral Emissivity of Solid Materials for High-Temperature Applications. *International Journal of Thermophysics*, v. 34, p. 2089–2101, 27 out. 2013.

HONNEROVÁ, P.; MARTAN, J.; HONNER, M. Uncertainty determination in high-temperature spectral emissivity measurement method of coatings. *Applied Thermal Engineering*, v. 124, p. 261–270, set. 2017.

HÖSER, D.; WALLIMANN, R.; RUDOLF VON ROHR, P. Uncertainty Analysis for Emissivity Measurement at Elevated Temperatures with an Infrared Camera. *International Journal of Thermophysics*, v. 37, n. 1, art. 14, 6 jan. 2016.

INCROPERA, F. P. *et al.* Fundamentals of heat and mass transfer. 6. ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição (GUM). 1. ed. luso-brasileira. Rio de Janeiro: INMETRO, 2008.

KEE, Y. Y. *et al.* Uncertainty of Temperature measured by Thermocouple. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, v. 68, n. 1, p. 54–62, 25 mar. 2020.

MICHALSKI, L.; ECKERSDORF, K.; KUCHARSKI, J.; MCGHEE, J. Temperature measurement. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

PALOPOSKI, T.; LIEDQUIST, L. Steel emissivity at high temperatures. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2005. (VTT Research Notes 2299).

PELZMANN, T. *et al.* Surface Temperature and Emissivity Measurement for Materials Exposed to a Flame Through Two-Color IR-Thermography. arXiv preprint arXiv:2203.09689, 18 mar. 2022.

PÉREZ-SÁEZ, R. B.; DEL CAMPO, L.; TELLO, M. J. Analysis of the Accuracy of Methods for the Direct Measurement of Emissivity. *International Journal of Thermophysics*, v. 29, n. 4, p. 1141–1155, 18 mar. 2008.

PURPURA, C. *et al.* Methodology for spectral emissivity measurement by means of single color pyrometer. *Measurement*, v. 82, p. 403-409, jan. 2016.

RICHTER, T.; FOUAD, N. A. Guidelines for thermography in architecture and civil engineering: theory, application area, practical implementation. 1st English ed. [S. l.]: Birkhäuser, 2021.

VUELBAN, E. M. *et al.* Radiometric Techniques for Emissivity and Temperature Measurements for Industrial Applications. *International Journal of Thermophysics*, v. 36, n. 7, p. 1545–1568, 22 maio 2015.

ZHANG, F. *et al.* Advancing spectral emissivity measurement through modulated ambient radiation for enhanced accuracy. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, [S. l.], v. 67, n. 7, p. 409-415, jul. 2025.

ZHU, C. *et al.* An accurate device for apparent emissivity characterization in controlled atmospheric conditions up to 1423 K. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, New York, v. 69, n. 7, p. 4210-4219, jul. 2020.