


ANÁLISE EXPERIMENTAL DO GRADIENTE TÉRMICO EM AÇO ASTM A131 GR. EH36 SOB VAZAMENTO CRIOGÊNICO

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.135162517033>

Data de submissão: 19/05/2025

Data de aceite: 23/05/2025

Kaique Moreira Matos Magalhães

Instituto de Ciência Tecnologia e Inovação
(ICTI), Universidade Federal da Bahia
(UFBA)
Camaçari, Ba
<http://lattes.cnpq.br/2970969792768557>

Renato de Paula Santana Trindade

Trindade Estruturas
Salvador, Ba
<http://lattes.cnpq.br/2234014832503829>

Elder Alves Santos

SM Engenharia
Salvador, Ba

Armando Sá Ribeiro Júnior

Departamento de Construção e Estruturas
(DCE) – Universidade Federal da Bahia
(UFB)
Salvador, Ba
<http://lattes.cnpq.br/2238167425213912>

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise numérica transiente e experimental dos efeitos térmicos decorrentes de vazamentos criogênicos acidentais em estruturas fabricadas com aço carbono ASTM A131 Gr. EH36, material amplamente utilizado na indústria naval. O estudo

experimental consistiu na determinação do gradiente de temperatura em uma placa de aço ASTM A131 Gr. EH36, simulando condições de vazamento acidental em componentes estruturais empregados na exploração de GNL (Gás Natural Liquefeito). Para replicar o cenário de vazamento criogênico, aplicou-se nitrogênio líquido (LN2) sobre a região central da placa. O ensaio experimental permitiu a obtenção do perfil de gradiente térmico, o qual foi posteriormente comparado aos resultados das análises numéricas realizadas em uma modelagem numérica, por meio do software ABAQUS®. O modelo computacional transiente desenvolvido foi calibrado para representar a distribuição térmica induzida pelo vazamento criogênico no aço ASTM A131 Gr. EH36, demonstrando boa correlação com os dados experimentais obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Gradiente Térmico; Vazamento Criogênico; Análise Numérica Transiente; Aço ASTM A131 Gr. EH36.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE THERMAL GRADIENT IN ASTM A131 GR. EH36 STEEL UNDER CRYOGENIC LEAK

ABSTRACT: This work presents a transient numerical and experimental analysis of the thermal effects resulting from accidental cryogenic leaks in structures made of ASTM A131 Gr. EH36 carbon steel, a material widely used in the naval industry. The experimental study consisted of determining the temperature gradient in an ASTM A131 Gr. EH36 steel plate, simulating accidental leak conditions in structural components employed in LNG (Liquefied Natural Gas) exploration. To replicate the cryogenic leak scenario, liquid nitrogen (LN2) was applied to the central region of the plate. The experimental test enabled the characterization of the thermal gradient profile, which was subsequently compared to the results of numerical analyses performed using a numerical model in ABAQUS® software. The developed transient computational model was calibrated to represent the thermal distribution induced by the cryogenic leak in ASTM A131 Gr. EH36 steel, showing good correlation with the experimental data obtained.

KEYWORDS: Thermal Gradient; Cryogenic Leak; Transient Numerical Analysis; ASTM A131 Gr. EH36 Steel.

INTRODUÇÃO

A matriz energética global, embora esteja passando por uma transição em direção a fontes renováveis, ainda é predominantemente composta por combustíveis fósseis. De acordo com o relatório World Energy Outlook 2023 da Agência Internacional de Energia (IEA), a participação combinada de carvão, petróleo e gás natural na oferta global de energia, que permaneceu em torno de 80% por décadas, começou a diminuir, atingindo 73% em 2030 no cenário de Políticas Declaradas (STEPS). Nesse contexto, a exploração de novos campos petrolíferos continua a impulsionar o desenvolvimento tecnológico, com investimentos significativos em métodos de extração e transporte. A descoberta de reservas na camada pré-sal consolidou o Brasil como um dos principais atores na exploração em águas ultraprofundas, impondo desafios técnicos substanciais para viabilização econômica e operacional..

Paralelamente, o gás natural emerge como um combustível de transição energética devido às suas propriedades ambientais superiores em comparação ao petróleo. Sendo praticamente isento de enxofre e apresentando uma combustão completa, o gás natural libera majoritariamente dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água, ambos não tóxicos em condições normais de operação. Além disso, sua versatilidade permite fácil adaptação em sistemas projetados para outros combustíveis fósseis, fortalecendo seu papel como uma alternativa mais limpa e eficiente.

Dentre as tecnologias desenvolvidas para o aproveitamento do gás natural, destaca-se o processo FLNG (Floating Liquefied Natural Gas), uma solução inovadora para produção, liquefação, armazenamento e transporte de gás natural em unidades flutuantes. Nesse método, o gás natural é convertido em GNL (Gás Natural Liquefeito) a

bordo de embarcações especializadas, sendo posteriormente transportado até estações de armazenamento em terra para regaseificação e distribuição. A operação em fase líquida proporciona maior eficiência no transporte, embora imponha rigorosas demandas tecnológicas relacionadas ao resfriamento criogênico, necessário para manter o GNL a temperaturas inferiores a -160°C .

A manipulação de GNL em condições criogênicas apresenta riscos significativos para a integridade estrutural dos equipamentos e sistemas envolvidos. PALTRINIERI et al. (2015) identificaram potenciais falhas estruturais associadas a vazamentos acidentais de líquidos criogênicos, evidenciando a necessidade de estratégias robustas de análise de risco. Adicionalmente, estudos experimentais conduzidos por KALAN e PETTI (2011) demonstraram a formação de gradientes térmicos severos em placas de aço submetidas a nitrogênio líquido a -197°C , destacando a importância do entendimento preciso dos efeitos térmicos induzidos em materiais metálicos. No entanto, informações detalhadas sobre os mecanismos de propagação térmica permanecem restritas, dificultando uma modelagem numérica precisa para projetos de engenharia.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal desenvolver um modelo numérico para a análise térmica de estruturas metálicas expostas a vazamentos criogênicos, com foco em perfis fabricados em aço EH36, amplamente utilizado em aplicações offshore. A investigação busca caracterizar o gradiente térmico resultante e os estados de tensão induzidos, fornecendo subsídios para o aprimoramento de critérios de projeto que garantam a integridade estrutural sob condições extremas de operação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em três etapas principais. Na primeira etapa, foram utilizados corpos de prova em forma de pequenas placas de aço, representativas de uma porção da estrutura real, para o desenvolvimento dos procedimentos experimentais básicos. Esses testes exploraram técnicas para o resfriamento das placas, isolamento térmico da superfície em contato com o líquido criogênico, bem como a seleção e avaliação dos tipos de termopares mais adequados para a aquisição das temperaturas durante o ensaio.

Para a fixação dos termopares, foram avaliados diferentes métodos, incluindo solda capacitiva, solda de estanho e termopares de superfície disponíveis comercialmente. As medições obtidas com cada tipo de fixação foram comparadas, e constatou-se que as variações entre os valores eram mínimas. Por questões de praticidade e disponibilidade, adotou-se a solda de estanho para fixação dos termopares nos experimentos subsequentes.

A segunda etapa consistiu na modelagem numérica do problema térmico, realizada via método dos elementos finitos utilizando o software ABAQUS®. O modelo teve como objetivo estimar o gradiente térmico resultante no corpo de prova após o contato com o

líquido criogênico. Para tanto, o coeficiente de convecção utilizado no modelo foi obtido experimentalmente e por meio do método inverso, considerando sua dependência em função da temperatura da superfície da placa. Os resultados numéricos foram posteriormente validados por comparação direta com os dados experimentais.

Na terceira e última etapa, realizou-se a análise experimental propriamente dita. Após a instrumentação completa das placas, todos os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados, devidamente calibrado previamente. Durante os ensaios, foi monitorada a variação temporal da temperatura na superfície da placa em contato com o ambiente criogênico. As soldas dos termopares foram executadas em plano, assegurando adequada deposição e fixação sobre a superfície da placa para garantir a confiabilidade das medições.

MATERIAIS

Para os testes experimentais, foi utilizada uma placa de aço ASTM A131 Grau EH36, com dimensões de 400 × 600 × 25,4 mm. A composição química do material está detalhada na Tabela 1. Na superfície superior e inferior da placa foram fixados, por soldagem, dez termopares do tipo T (Cobre-Constanta). As posições exatas dos termopares, expressas em milímetros, estão indicadas na Figura 1. Conforme ilustrado, em cada região identificada como TP foram instalados dois termopares, um em cada face da placa, permitindo assim a medição e a análise do gradiente térmico ao longo da espessura do material.

GRAU	C %	Si %	Mn %	P %	S %	V %	Al %
Classe EH36	0,146	0,25	1,33	0,005	0,005	0,005	0,0563
	Cr %	Cu %	Mo %	Nb %	Ni%	Ti %	Fe%
	0,191	0,124	0,005	0,298	0,173	0,005	98,1

Tabela 1. Composição química do aço carbono ASTM A131 Gr. EH36.

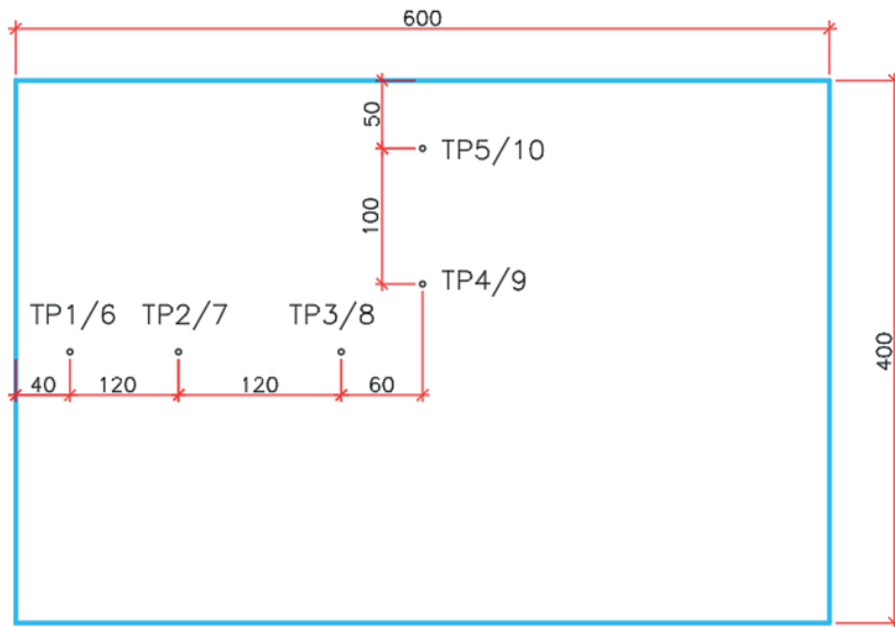


Figura 1. Localização dos termopares na placa de aço carbono *ASTM A131 Gr. EH36*.

Para a aquisição dos dados experimentais, foi empregado o sistema ADS2000, juntamente com o software AqDados®, instalado em um computador para o processamento e análise das medições obtidas. A Figura 2 apresenta a placa devidamente instrumentada para os ensaios. Após a instrumentação, a placa foi posicionada dentro de uma caixa isolante composta por poliestireno expandido (EPS), permitindo a aplicação controlada do fluido criogênico. O nitrogênio líquido (LN_2) foi então derramado na região central da placa, viabilizando a coleta dos dados experimentais necessários para a calibração e validação do modelo térmico.



Figura 2. Placa de aço após a soldagem dos termopares.

A região de contato entre o nitrogênio líquido (LN_2) e a superfície da placa foi delimitada por uma caixa de contenção com dimensões de 240×160 mm, conforme ilustrado na Figura 3. Durante o experimento, o reservatório de LN_2 foi mantido constantemente preenchido até que fosse atingido o equilíbrio térmico da placa, definido quando a variação de temperatura registrada pelos termopares se tornou desprezível. A Figura 4 apresenta uma fotografia do aparato experimental, destacando a caixa de contenção do fluido criogênico e a disposição dos termopares na placa.

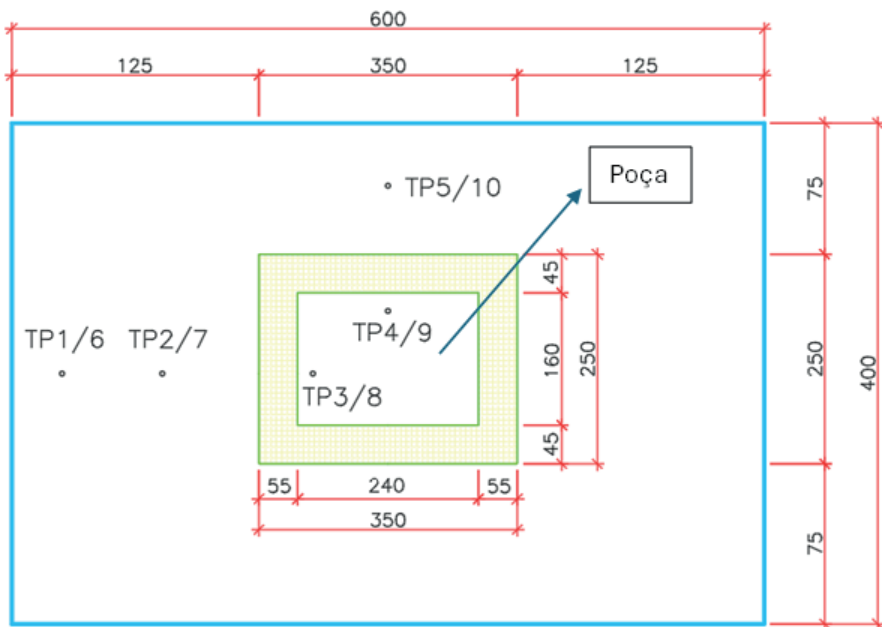


Figura 3. Região da poça para contato do líquido criogênico (medidas em mm).



Figura 4. Aparato utilizado para os testes experimentais.

SIMULAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Foram conduzidas análises numéricas térmicas transientes utilizando o método dos elementos finitos, implementadas no software ABAQUS®. Com base nas dimensões do corpo de prova empregadas nos testes experimentais (Figura 3), que serviram para validação do modelo, procedeu-se à modelagem computacional. Em função da simetria geométrica do problema, foi modelada apenas uma quarta parte do componente (Figura 5), reduzindo assim significativamente o número de elementos e o tempo computacional necessário para a resolução.

O tempo total de análise foi fixado em 600 segundos, correspondente ao intervalo requerido para que as temperaturas registradas pelos termopares atingissem estabilidade durante os ensaios experimentais.

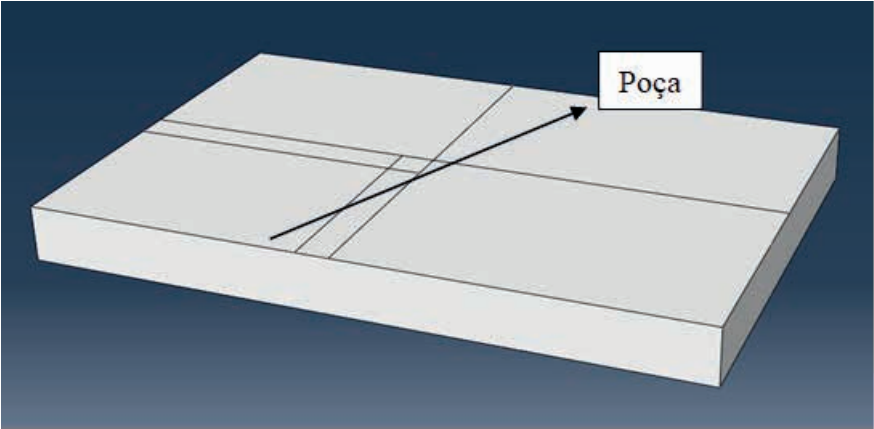


Figura 5. Geometria utilizada na análise numérica.

Para simplificação, o modelo numérico considera a transferência térmica entre o fluido criogênico e a placa por meio de convecção natural, desconsiderando os efeitos de escoamento do fluido. O coeficiente de convecção térmica (h), dependente da temperatura, foi determinado por meio da resolução do Problema Inverso de Condução de Calor (Inverse Heat Conduction Problem – IHCP), conforme metodologia desenvolvida por SILVA et al. (2017). As propriedades térmicas do aço EH36 adotadas nas análises numéricas encontram-se detalhadas na Tabela 2.

Propriedades	Símbolo	Valor
Densidade de massa	ρ	7850 kg/m ³
Condutividade térmica	k	51.9 W/(mK)
Calor Específico	c	486 J/(kgK)

Tabela 1. Propriedades térmicas do material - Aço ASTM A131 Gr. EH36.

O modelo numérico proposto, ilustrado na Figura 5, divide a chapa em três regiões distintas: a Superfície 1, em contato direto com o líquido criogênico (região da poça); a Superfície 2, correspondente às paredes da contenção que atuam como isolamento térmico; e a Superfície 3, que está exposta ao ambiente externo.

Para a Superfície 2 foi assumido isolamento térmico, enquanto para as Superfícies 1 e 3 foram aplicados coeficientes de convecção distintos. Na Superfície 1, o coeficiente

de convecção (h) foi modelado como variável ao longo do tempo, conforme os resultados obtidos por SILVA et al. (2017). Já na Superfície 3, exposta à convecção natural com o ambiente, foi adotado um valor constante de $h=30\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, representando a convecção não forçada. Essas regiões e suas respectivas condições térmicas estão destacadas na Figura 6.

A simulação seguiu o mesmo protocolo dos ensaios experimentais, adotando uma temperatura inicial uniforme de $298,15\text{ K}$ (temperatura ambiente).

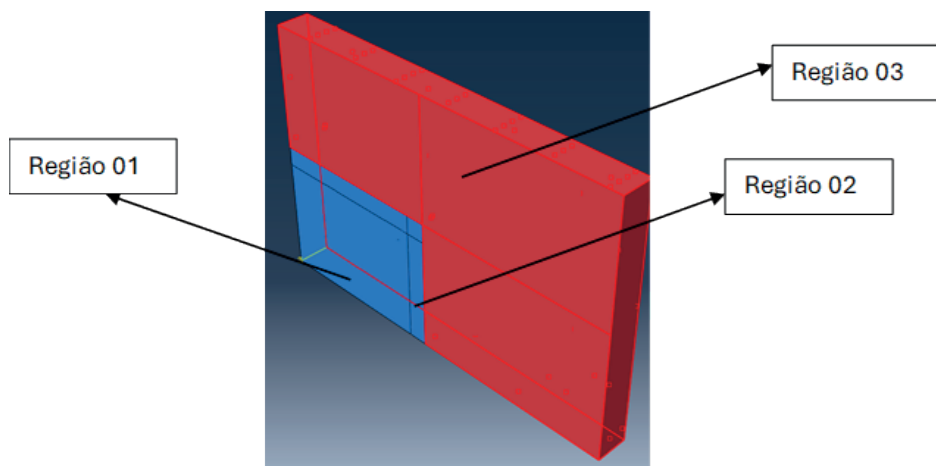


Figura 6. Regiões para aplicação do coeficiente de convecção.

Devido à geometria aproximadamente uniforme do modelo, não foi necessário realizar refino local da malha em nenhuma região específica, adotando-se, portanto, uma densidade de malha constante ao longo de toda a placa. A malha utilizada no modelo numérico, apresentada na Figura 7, foi definida após a realização de estudos de convergência, nos quais diferentes níveis de refinamento foram avaliados para verificar sua influência sobre os resultados e garantir a precisão da solução numérica.

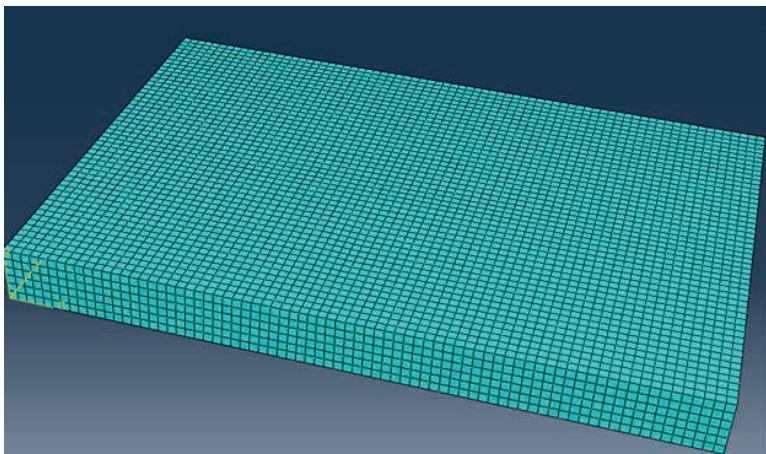


Figura 7. Malha utilizada no modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 8 apresenta o perfil de temperatura registrado durante os ensaios experimentais nos pontos de medição correspondentes à localização dos termopares, conforme ilustrado na Figura 1.

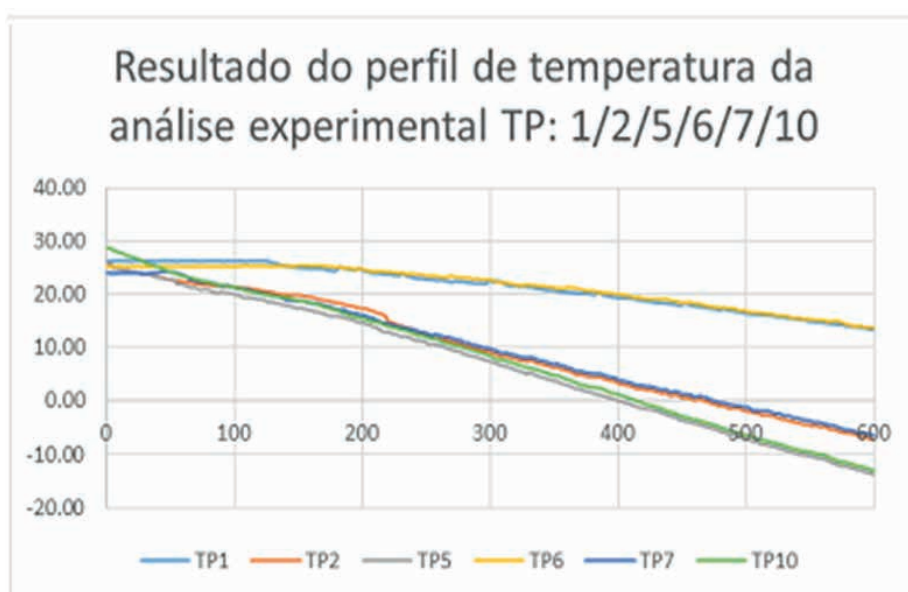


Figura 8. Resultado experimental de temperatura nos pontos: TP 1/2/5/6/7/10.

A partir dos resultados dos perfis de temperatura medidos pelos termopares, observou-se que a variação da temperatura ao longo da espessura da chapa foi desprezível. A Figura 9 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo modelo numérico e as medições experimentais nas mesmas posições dos termopares.

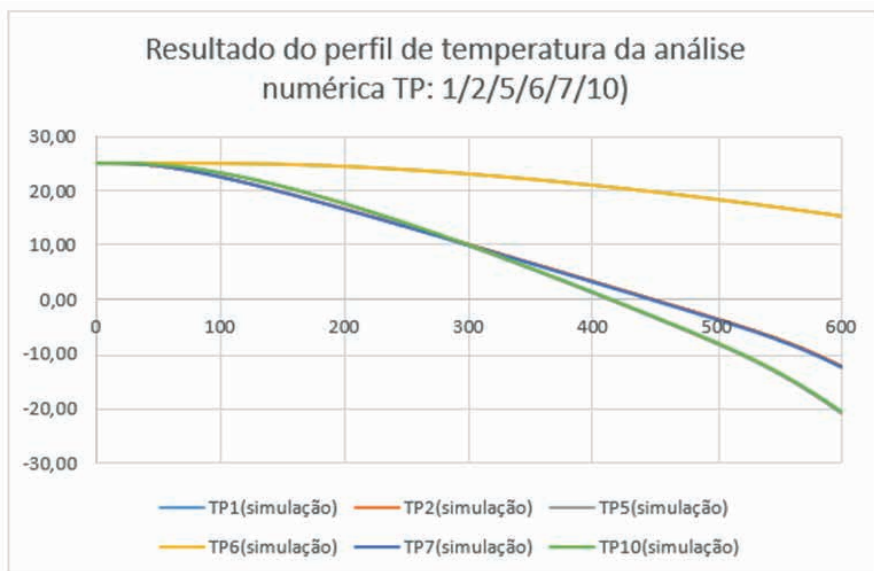


Figura 9. Resultado numérico de temperatura nos pontos: TP 1/2/5/6/7/10.

Os resultados numéricos confirmam que a variação de temperatura ao longo da espessura da chapa é mínima, corroborando as observações obtidas nos ensaios experimentais. Nas Figuras 10, 11 e 12, são apresentadas as comparações entre os perfis de temperatura medidos experimentalmente e aqueles previstos pelo modelo numérico.

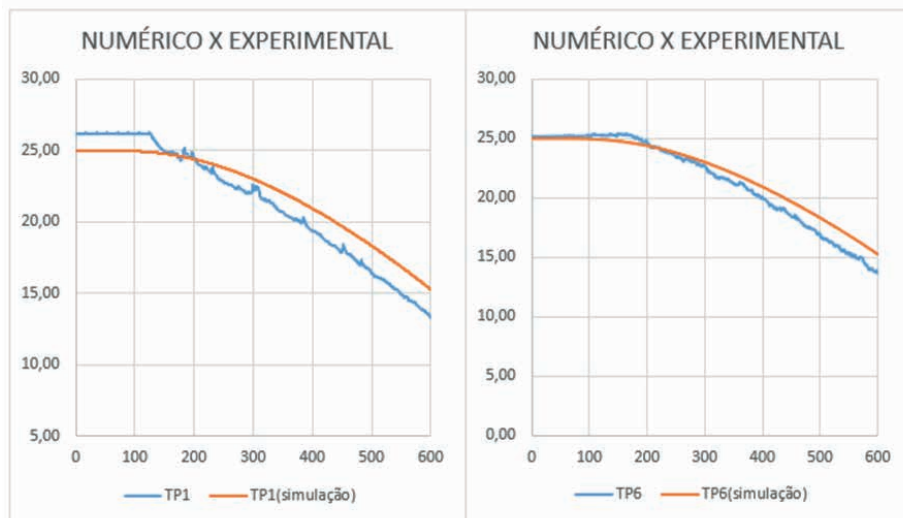


Figura 10. Comparação dos resultados numéricos e experimentais (TP1 e TP6)

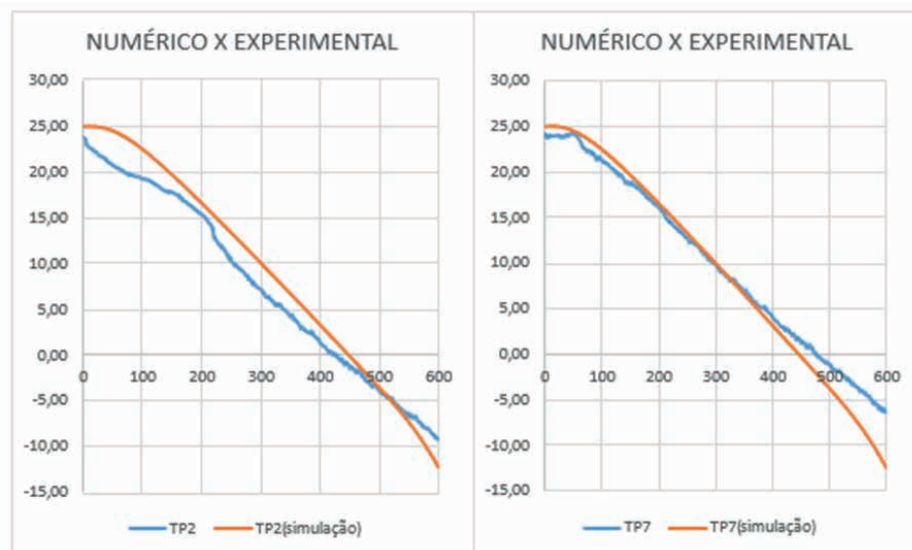


Figura 11. Comparação dos resultados numéricos e experimentais (TP2 e TP7)

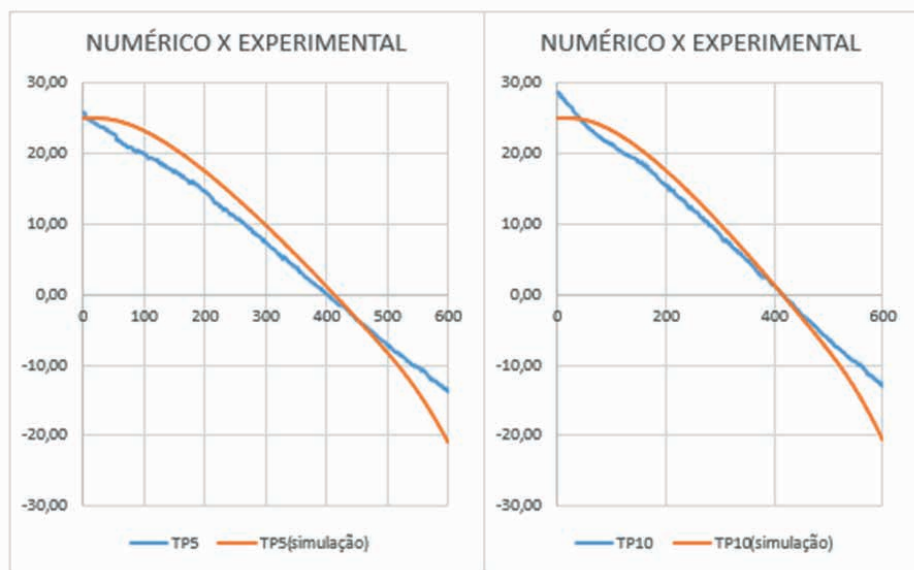


Figura 12. Comparação dos resultados numéricos e experimentais (TP2 e TP7)

Foram identificados problemas nos dados referentes aos termopares TP3 e TP4, cujos resultados apresentaram inconsistências. Esses termopares estavam posicionados na região da poça, em contato direto com o fluido criogênico, onde a temperatura medida sofreu variações abruptas não captadas pelo modelo numérico. Tal discrepância decorre, em parte, da maior sensibilidade da região e da simplificação adotada no modelo, que desconsidera os efeitos do escoamento do fluido sobre o gradiente térmico na chapa. A Figura 13 apresenta o perfil do gradiente térmico final obtido no presente estudo.

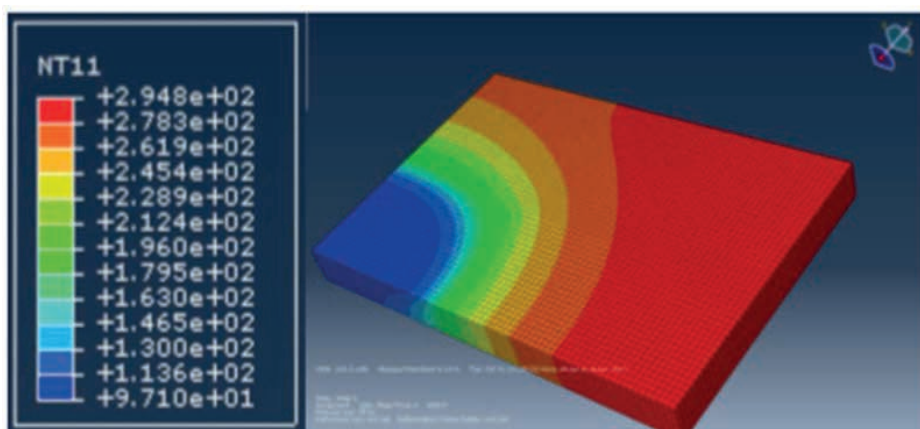


Figura 13. Gradiente térmico do modelo numérico (temperatura em Kelvin).

CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu procedimentos para simular os efeitos térmicos decorrentes de vazamentos de GNL em estruturas e equipamentos do processo FLNG, utilizando o método dos elementos finitos por meio de software computacional. Foi obtido um modelo numérico capaz de representar o gradiente térmico gerado pelo contato do líquido criogênico com o aço EH36, levando em consideração as propriedades térmicas específicas do material e as condições de convecção características do ambiente criogênico.

Os resultados experimentais, obtidos por meio de termopares estrategicamente posicionados no corpo de prova, indicam que o modelo numérico reproduz de forma consistente o comportamento térmico observado, apresentando boa concordância com as medições realizadas. Essa validação confirma a eficiência do modelo para representar os fenômenos físicos envolvidos e sua confiabilidade para ser aplicado em análises futuras.

Assim, o modelo pode servir como uma ferramenta inicial para o desenvolvimento de critérios de projeto, avaliação de integridade estrutural e prevenção de falhas em equipamentos e estruturas submetidos a temperaturas extremas típicas de vazamentos criogênicos, contribuindo para a segurança operacional e avanço tecnológico no setor de FLNG.

REFERÊNCIAS

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2023: Executive Summary. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/executive-summary?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 18 maio 2025.

PALTRINIERI, N.; TUGNOLI, A.; COZZANI, V. Hazard identification for innovative LNG regasification technologies. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 137, p. 18–28, 2015.

PARK, R. M. Manual on the use of thermocouples in temperature measurement.

RIBEIRO JUNIOR, A. S., AMDAHL, J. Avaliação de critérios de falha de estruturas fabricadas com aço DNV - NV 355 e utilizadas no processo FLNG devido à fratura em larga escala induzida por vazamentos criogênicos. Fapesb 2015.

ROBERT J. KALAN, JASON P. Petti. LNG Cascading Damage Study Volume I: Fracture Testing Report. Sandia Report sand 2011-3342 unlimited release printed december 2011;

SILVA, D. G., VILASBOAS, I. F.; RIBEIRO JUNIOR, A.S. Technical Report: Temperature dependent convection coefficient. GITEC 2017.