

DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE TÉRMICO EM UMA PLACA DE AÇO ASTM A131 GR. EH36 DEVIDO AO VAZAMENTO DE LÍQUIDO CRIOGÊNICO

Kaique Moreira Matos Magalhães, kaiquemagalhaes@hotmail.com¹

Ícaro Figueiredo Vilasboas, icarofvilasboas@gmail.com¹

Danilo Gomes da Silva, danilo.gomes@gmail.com¹

Armando Sá Ribeiro Junior, asrj@ufba.br¹

¹Universidade Federal da Bahia, Departamento de Construção e Estruturas
R. Prof. Aristίδes Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, CEP: 40210-630

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise numérica transiente térmica dos efeitos de vazamentos criogênicos acidentais em estruturas fabricadas com aço carbono ASTM A131 Gr. EH36. Para esse estudo foram realizados alguns testes experimentais para a determinação do gradiente de temperatura em uma placa de aço ASTM A131 Gr. EH36 (amplamente utilizada em construções navais), que poderia ser gerado por um eventual vazamento acidental em alguns elementos das estruturas utilizadas na exploração do GNL (Gás Natural Liquefeito). O gradiente térmico foi alcançado através da aplicação do nitrogênio líquido (LN₂) em uma porção da peça (região central) através de uma contenção fabricada com poliestireno e EPS e usada para obter o isolamento da região de contato entre o fluido criogênico e o aço com o ambiente externo. Por fim, os resultados dos testes experimentais são comparados às análises numéricas realizadas usando o programa ABAQUS®. Desenvolveu-se neste trabalho um modelo computacional que representa de forma satisfatória o gradiente térmico gerado por um vazamento criogênico em um elemento feito com o material de aço ASTM A131 Gr. EH36.

Palavras-chave: FLNG, Aço ASTM A131 Gr. EH36, Vazamentos Criogênicos

1. INTRODUÇÃO

Apesar da constante conscientização mundial sobre a importância de uma matriz energética ampla e com uso cada vez maior de energias renováveis, é inegável a dependência dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial. Petróleo e Gás Natural somados representam 52,5% da matriz energética mundial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016).

A busca de novos poços de exploração do petróleo tem gerado pesquisas e desenvolvimento tecnológico com o aporte de muitos recursos financeiros. Neste contexto, a descoberta de petróleo na camada de pré-sal foi sem dúvida um marco. A exploração do óleo e gás em águas profundas, no entanto, exigirá um grande avanço tecnológico para ser viabilizado. Sendo assim, faz-se necessário buscar alternativas para explorar todo o potencial desta riqueza, mitigando os efeitos deletérios sobre o meio ambiente oriundo de tal exploração.

Também, em função das possíveis descobertas de gás natural não convencional (*shale gas*) em bacias terrestres no Brasil, ganha força o uso do gás natural como uma fonte de energia alternativa ou complementar ao petróleo que apresenta algumas vantagens em relação a este último. O gás natural é uma energia carente de enxofre e a sua combustão é completa, liberando, como produtos da mesma, apenas o dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água, sendo os dois componentes não tóxicos (o dióxido de carbono é considerado ligeiramente tóxico), o que faz do gás natural uma energia ecológica e não poluente. Outra vantagem é a facilidade de adaptação dos equipamentos que utilizam outro tipo de combustível fóssil para o uso de gás natural.

No processo FLNG (*Floating Liquefied Natural Gás*), o GNL (Gás Natural Liquefeito) inicialmente é estocado em navios para, em seguida, ser transportado até a estação de armazenamento em terra, onde retornará ao estado gasoso (regaseificação). Por fim, o gás natural será distribuído para uso comercial ou industrial. Neste contexto, há o desafio constante de desenvolver ou aprimorar novas tecnologias que possibilitem a produção, o armazenamento e o transporte de gás natural liquefeito de maneira eficiente e segura. Como consequência, há uma constante quebra de barreiras tecnológicas e a necessidade de desenvolver critérios de projeto de equipamentos e estruturas que possam operar sob condições cada vez mais rigorosas, sem comprometimento da sua confiabilidade operacional. O transporte e

armazenamento do gás natural na forma líquida é mais eficiente, porém necessita do seu resfriamento a temperaturas criogênicas, exigindo um grande esforço de desenvolvimento tecnológico em materiais, equipamentos e processos, bem como conhecimento do comportamento das estruturas utilizadas sob tais condições.

PALTRINIERI et al. (2015) realizou um estudo para identificação dos perigos referentes à tecnologia inovadora de regaseificação de GNL, desenvolvendo novas metodologias para análise de risco durante o processo. Um dos riscos mais impactantes identificado neste estudo é referente aos possíveis danos causados pelo líquido criogênico, por exemplo, durante um vazamento acidental. Este tipo de carga poderá ocasionar a falha de alguns componentes estruturais.

O entendimento do gradiente térmico em vazamentos criogênicos pode ser observado no trabalho experimental desenvolvido por KALAN e PETTI (2011). Neste trabalho, os autores desenvolveram um total de 23 experimentos onde o nitrogênio líquido a -197°C foi vazado sobre placas de aço enquanto a temperatura em vários pontos foi monitorada com o uso de termopares. Entretanto, informações relevantes para o completo entendimento do problema não foram fornecidas nos documentos divulgados por estes pesquisadores, pois se trata de um relatório confidencial do governo norte-americano. Desta forma, fez-se necessário realizar novos experimentos para atingir os objetivos propostos neste projeto.

Este estudo visa entender problemáticas relacionadas ao comportamento dos materiais dos equipamentos que compõem as plantas de FLNG submetidos a condições extremas (temperaturas abaixo de -160°C), particularmente causados por vazamentos acidentais, de forma a obter um modelo numérico que represente bem o gradiente térmico em estruturas fabricadas com aço EH36 decorrentes de vazamentos criogênicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada nesta pesquisa científica foi desenvolvida através de pesquisas bibliográficas além dos testes experimentais de caráter exploratório para o aprimoramento dos valores medidos, buscando a identificação dos principais fatores que influenciam nos resultados. O trabalho foi dividido em 3 etapas principais. Na primeira foram utilizadas pequenas placas (corpos de prova), que representam uma porção da estrutura, para desenvolver os métodos e procedimentos de testes básicos. Esses testes exploraram métodos para resfriar placas de aço, criação e isolamento externo da superfície de contato do líquido criogênico com as demais regiões da placa, além dos tipos de termopar adequado para realização do ensaio.

Os termopares foram testados em relação a sua fixação e influência nas medições. O primeiro método foi realizar uma solda capacitiva e posteriormente uma solda de estanho, além dos termopares de superfícies disponíveis para o experimento. Foram feitas as mesmas leituras em todos os tipos de fixação e realizada a comparação dos valores medidos. A partir destes testes preliminares chegou-se à conclusão que a variação entre os valores medidos é pequena, logo adotou-se a solda de estanho, por questões de conveniência e disponibilidade para realização dos experimentos.

A segunda etapa do trabalho foi a realização de uma modelagem numérica (pelo método dos elementos finitos) através do ABAQUS® para a obtenção de uma estimativa do gradiente térmico final da placa após o contato com o líquido criogênico. Nos dados de entrada do modelo o coeficiente de convecção considerado para esta análise foi determinado experimental e analiticamente, através do método inverso, considerando a sua variação em função da temperatura de superfície da placa. Esses resultados do modelo teórico foram depois comparados com os experimentais para que fosse validada a análise numérica.

A terceira etapa consiste na análise experimental. Após instrumentação da placa de aço todos os termopares foram conectados a um sistema de aquisição e testados, onde a partir de uma calibração prévia, adquiriu-se a variação temporal da temperatura no ambiente. Todas as soldas foram realizadas na posição plana e com deposição sobre a placa.

2.1. Materiais

Utilizou-se para os testes experimentais uma placa de aço ASTM A131 Gr. EH36 com as dimensões 400x600x25,4 (mm). A sua composição química pode ser observada na Tabela 1. Nas superfícies superior e inferior da placa foram fixados (soldados) dez termopares do tipo T (Cobre-Constanta), as locações dos termopares são mostradas na Figura 1 (medidas em milímetro). Como mostrado na Figura 1 para cada região denominada TP foram fixados dois termopares nas superfícies superior e inferior da placa, respectivamente, de forma a possibilitar a determinação do gradiente de temperatura ao longo da espessura.

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

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

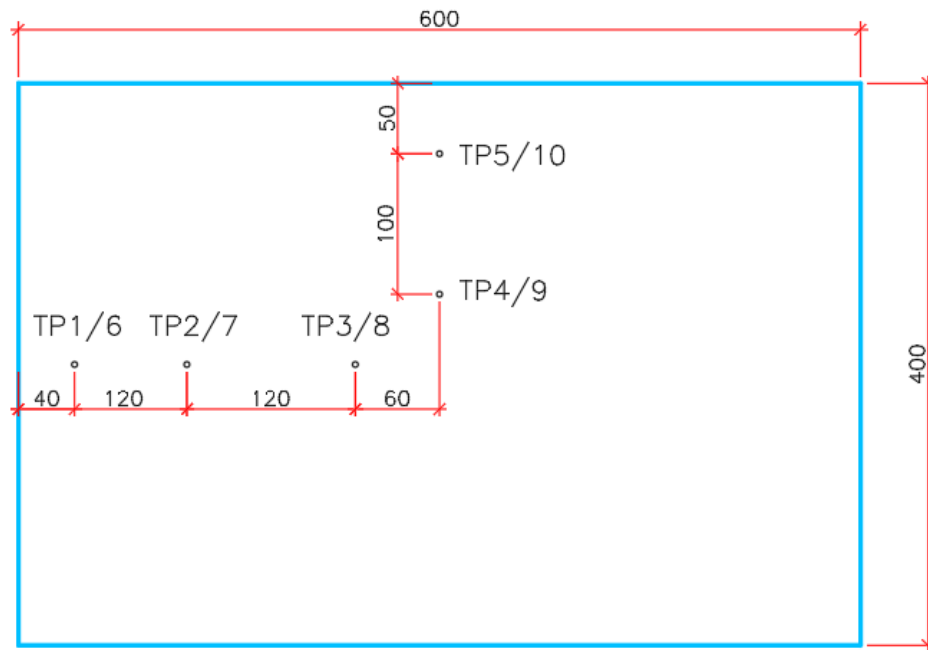


Figura 1. Localização dos termopares na placa de aço carbono ASTM A131 Gr. EH36.

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados ADS2000 além do programa AqDados® instalado em um computador para tratamento dos dados obtidos nos experimentos.

Na Figura 2 pode-se observar a placa instrumentada para realização dos ensaios, após este procedimento utilizou-se uma caixa de poliestireno e EPS para possibilitar a aplicação do fluido criogênico na região central da placa, onde foi derramado o nitrogênio líquido (LN_2) para aferição dos dados experimentais.



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

A contenção da região da superfície de contato do LN_2 com a região da placa possui dimensões 240x160 mm conforme mostrado na Figura 3. Durante o experimento o recipiente de contenção do LN_2 foi mantido preenchido até que fosse identificado o equilíbrio térmico da placa, quando a variação de temperatura medida pelos termopares fosse desprezável. Na Figura 4 é apresentada uma foto do aparato utilizado no experimento, com destaque para a caixa de contenção do fluido criogênico e o posicionamento dos termopares.

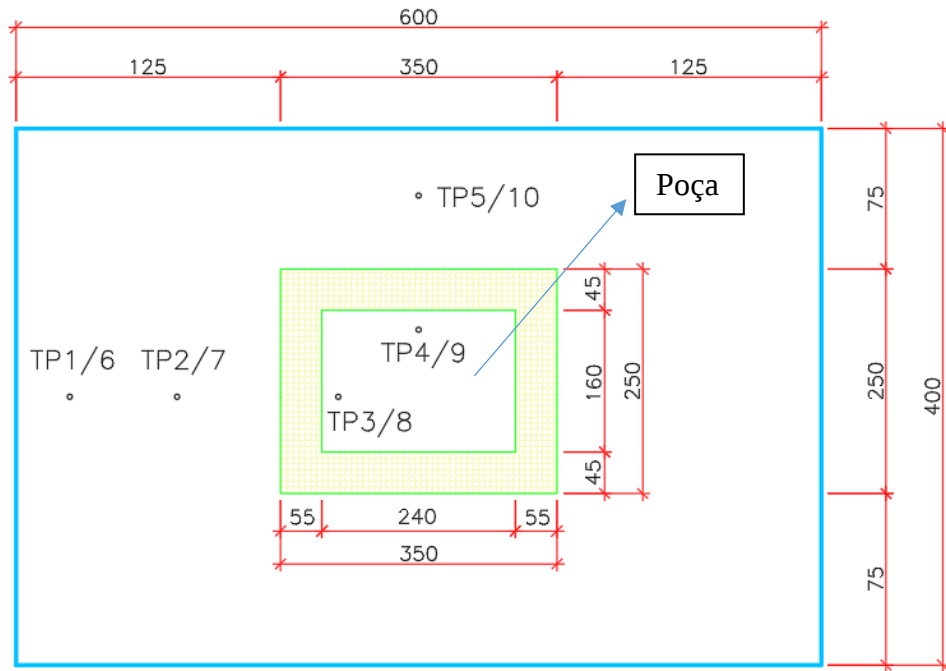


Figura 3. Região da poça para contato do líquido criogênico (medidas em mm).



Figura 4. Aparato utilizado para os testes experimentais.

2.2. Simulação utilizando o método dos elementos finitos

Foram realizadas análises numéricas transientes térmicas utilizando o método dos elementos finitos através do programa ABAQUS®. Com as dimensões estabelecidas do corpo de provas (Figura 3) para os testes experimentais, utilizado para validação do modelo numérico, procedeu-se com a modelagem computacional. Devido à simetria, apenas $\frac{1}{4}$ do componente é modelado (Figura 5), desta maneira se diminui o número de elementos e consequentemente o tempo para processamento dos dados.

O tempo de análise foi estipulado em 600 segundos (tempo necessário para equalização da temperatura medida pelos termopares durante o teste experimental).

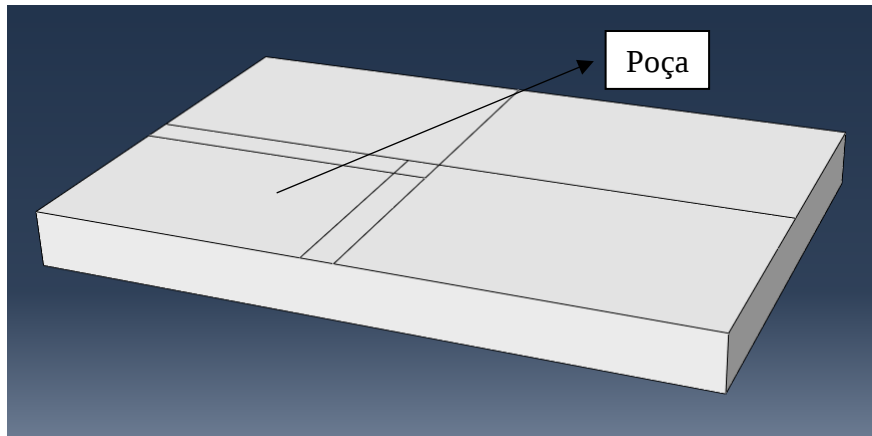


Figura 5. Geometria utilizada na análise numérica.

Por simplificação, o modelo numérico proposto considera a troca térmica entre o fluido criogênico e a placa por convecção, desprezando assim os efeitos de escoamento do fluido. O coeficiente de convecção (h) entre o aço e o nitrogênio líquido, em função da temperatura, foi determinado utilizando o método “*Inverse Heat Conduction Problem*” (IHCP) desenvolvido por SILVA et al. (2017). As propriedades térmicas do material (aço EH36) utilizadas nas análises numéricas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades térmicas do material - Aço ASTM A131 Gr. EH36.

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

O modelo proposto e ilustrado na Figura 5 separa a chapa em três regiões. A Superfície 1 que está em contato direto com o líquido criogênico (região da poça), a Superfície 2 onde foram posicionadas as paredes da contenção (isolamento) e a Superfície 3 que está em contato com o meio ambiente. Dessa forma foi considerado um isolamento para a Superfície 2 e utilizados coeficientes de convecção (h) distintos para as Superfícies 1 e 3. Na poça (Superfície 1) aplicou-se o h variando com o tempo de acordo com SILVA et al. (2017), e na zona que não estará em contato direto com o LN₂ (Superfície 3) o $h = 30$ W/(m²K), representando a convecção não forçada com o meio ambiente. Essas regiões são mostradas na Figura 6. A análise foi feita seguindo o mesmo procedimento realizado no ensaio experimental. A temperatura inicial da análise foi 298,15 K (temperatura ambiente).

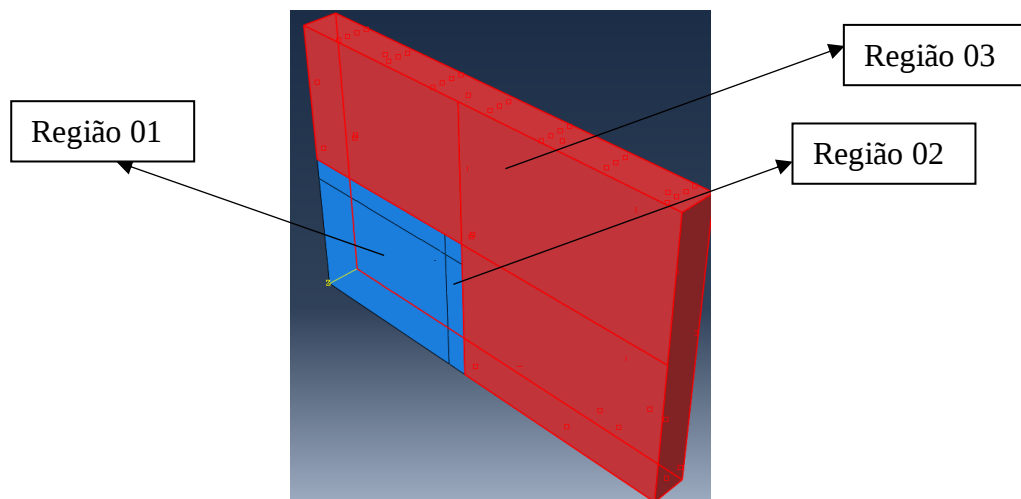


Figura 6. Regiões para aplicação do coeficiente de convecção.

Como o modelo possui uma geometria aproximadamente uniforme, não foi necessário realizar o refino da malha local em nenhuma região, por isso foi considerado uma densidade de malha constante ao longo de toda a placa. A malha do modelo numérico apresentada na Figura 7 foi utilizada para o processamento dos resultados e definida após a análise de diferentes refinamentos de malha para verificação de sua convergência e influência nos resultados numéricos.

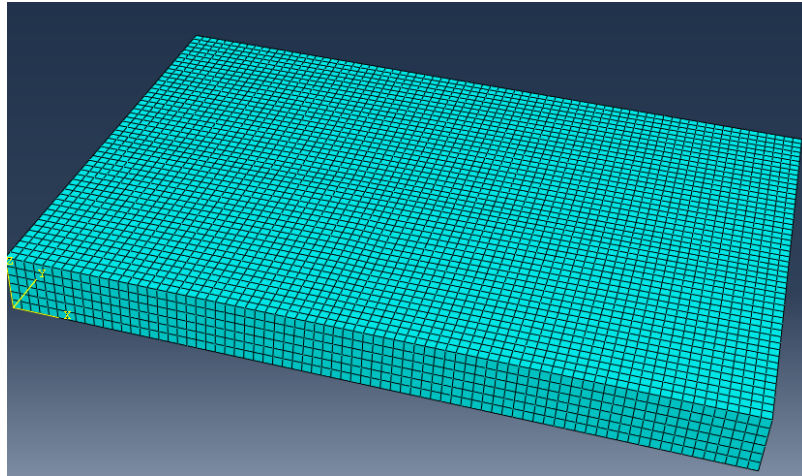


Figura 7. Malha utilizada no modelo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 8 apresenta os valores do perfil de temperatura obtidos nos ensaios experimentais nos pontos onde estão fixados os termopares, conforme ilustrado na Figura 1.

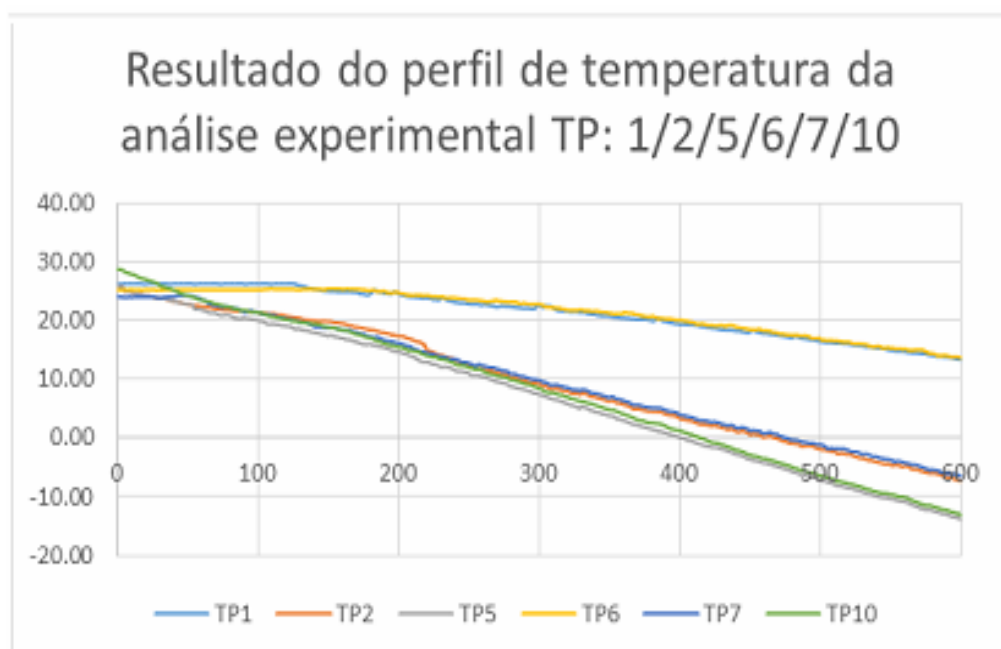


Figura 8. Resultado experimental de temperatura nos pontos: TP 1/2/5/6/7/10.

Através dos resultados do perfil de temperatura dos termopares pode-se observar que a variação desta grandeza ao longo da espessura da chapa foi desprezável. Pela Figura 9 tem-se a comparação dos resultados obtidos do modelo numérico nas mesmas posições onde estão fixados os termopares do ensaio experimental.

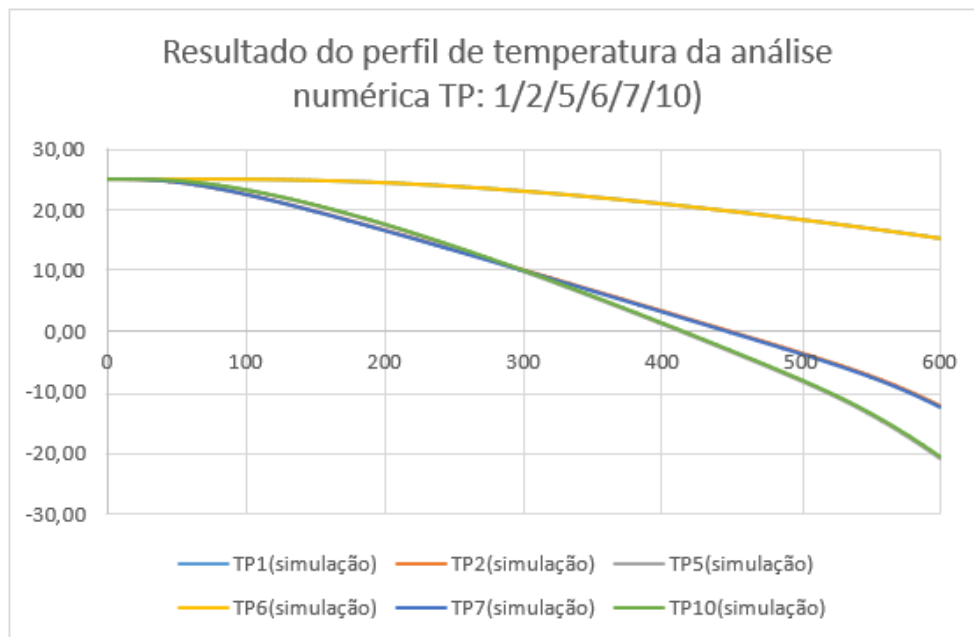


Figura 9. Resultado numérico de temperatura nos pontos: TP 1/2/5/6/7/10.

Verifica-se diante dos resultados numéricos que a variação ao longo da espessura da chapa é bem pequena, conforme observado nos resultados experimentais. Nas Figuras 10, 11 e 12 faz-se a comparação do perfil de temperatura, determinado através dos testes experimentais, com os resultados do modelo numérico.

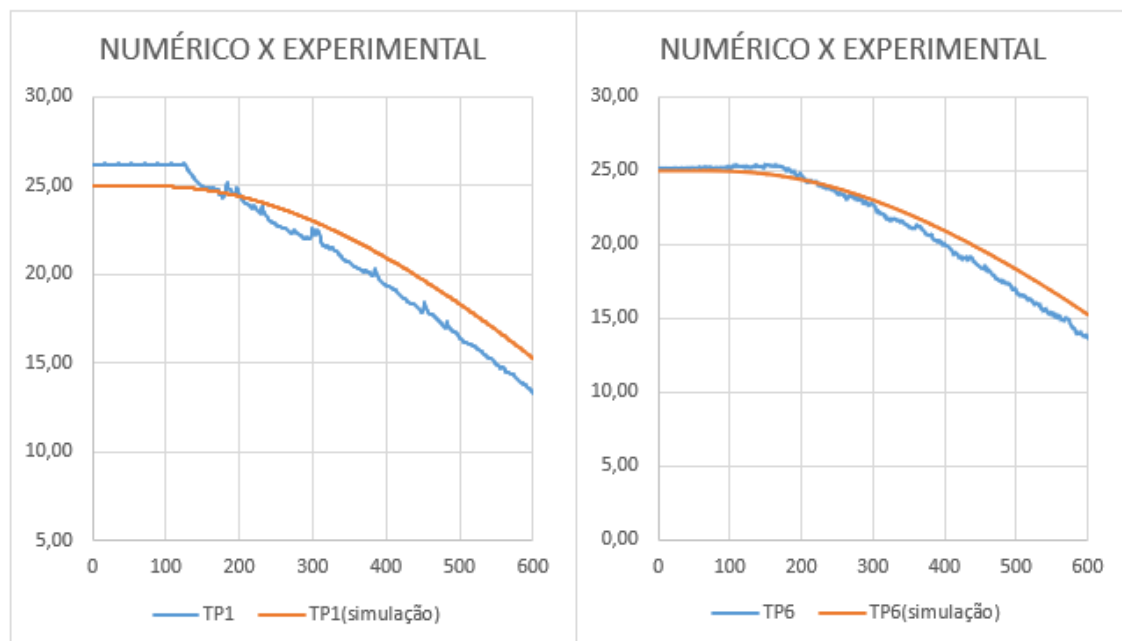


Figura 10. Comparação dos resultados de temperatura entre os valores numéricos e experimentais (TP1 e TP6)

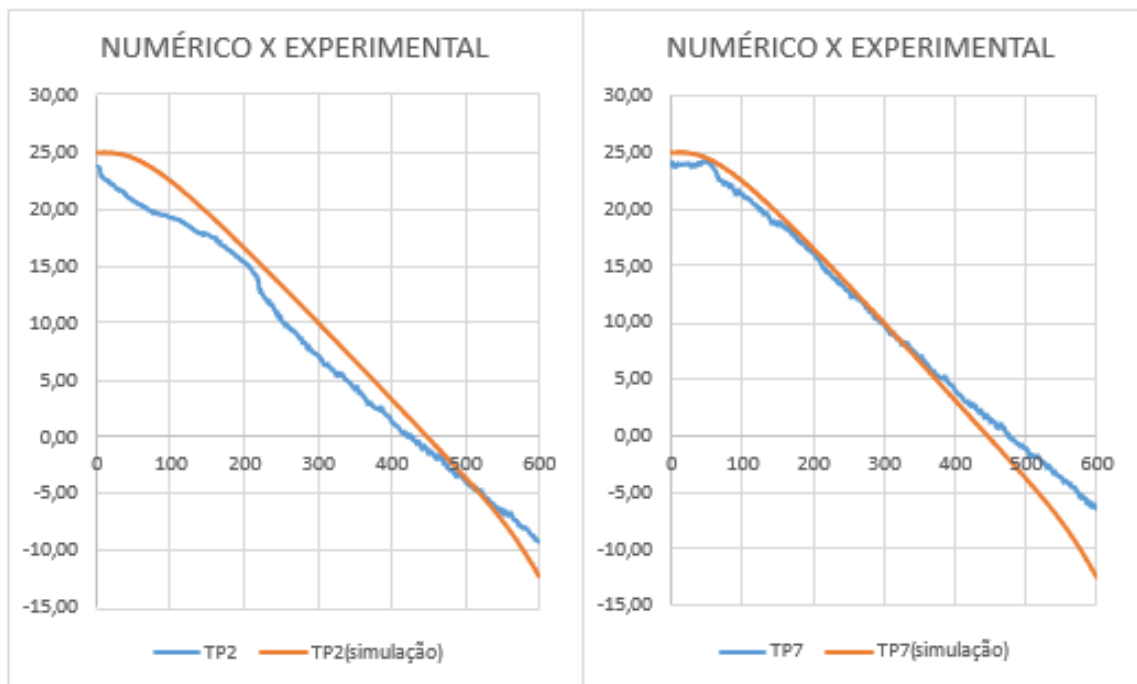


Figura 11. Comparação dos resultados de temperatura entre os valores numéricos e experimentais (TP2 e TP7)

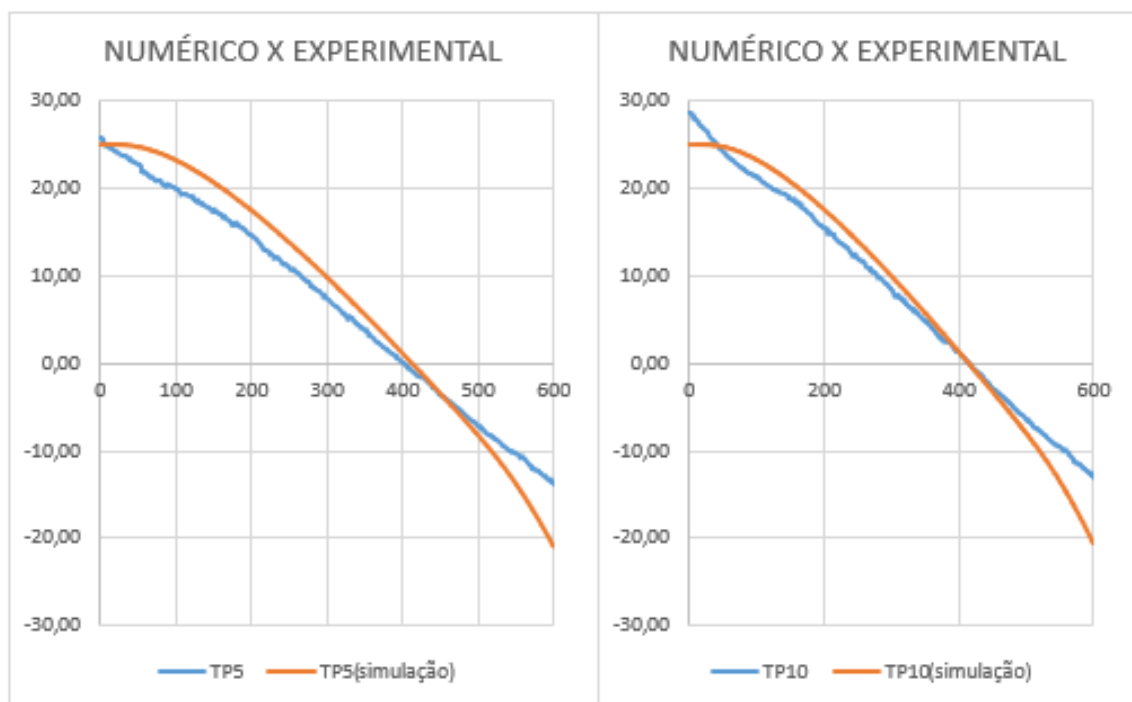


Figura 12. Comparação dos resultados de temperatura entre os valores numéricos e experimentais (TP2 e TP7)

Alguns problemas foram identificados nas análises referentes aos termopares TP3 e TP4 que não apresentaram resultados coerentes. Estes termopares foram fixados na região da poça, zona de contato direto com o fluido criogênico, que ao entrar em contato com o termopar faz o valor da temperatura medida sofrer uma variação abrupta, diferente do que acontece na análise numérica. Além disso, nesta região há uma maior sensibilidade do modelo que desprezou os efeitos de escoamento do fluido no gradiente de temperatura da placa. A Figura 13 apresenta o resultado do gradiente térmico final proposto neste estudo.

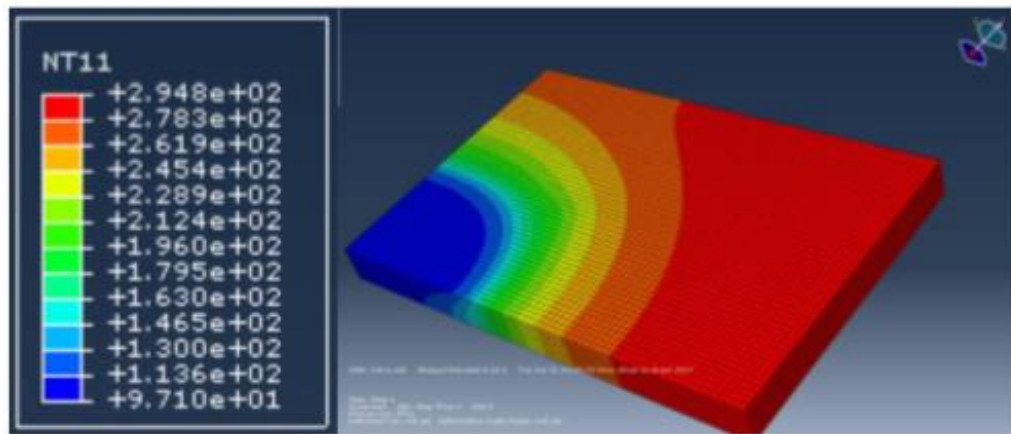


Figura 13. Gradiente térmico do modelo numérico (temperatura em Kelvin).

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs a elaboração de procedimentos para simular o efeito de vazamento de GNL nas estruturas e equipamentos utilizados no processo de FLNG, baseado no uso de programas computacionais pelo método dos elementos finitos. Com isso obteve-se um modelo numérico do gradiente térmico gerado pelo contato do líquido criogênico com o aço.

Conclui-se pelos testes experimentais, através dos termopares fixados no corpo de prova, que o modelo numérico possui uma boa representatividade do fenômeno físico e pode ser utilizado para futuras análises envolvendo o gradiente térmico deste material.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia) pelo suporte financeiro para realização desta pesquisa. Ao GITEC por todo apoio técnico-científico além dos equipamentos e local concedidos para realização dos testes.

6. REFERÊNCIAS

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key World Energy Statistics 2015. International Energy Agency, 15 fevereiro 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015>.
- 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.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF THERMAL GRADIENT IN A ASTM A131 GR. EH36 STEEL PLATE DUE TO CRYOGENIC LIQUID LEAKING.

Kaique Moreira Matos Magalhães, kaiquemagalhaes@hotmail.com¹

Ícaro Figueiredo Vilasboas, icarofvilasboas@gmail.com¹

Danilo Gomes da Silva, danilo.gomes@gmail.com¹

Armando Sá Ribeiro Junior, asrj@ufba.br¹

¹ Federal University of Bahia, Department of Construction and Structures,
R. Prof. Aristίδes Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, CEP: 40210-630

Abstract: *This paper presents a thermal transient numerical analysis of the effects of accidental cryogenic leaks on structures made with carbon steel ASTM A131 Gr. EH36. For this study, some experimental tests were carried out to determine the temperature gradient in an ASTM A131 Gr. EH36 steel plate (much used in shipbuilding), which could be generated by accidental leakage in some elements of the structures used in the exploration of LNG (Liquefied Natural Gas). The thermal gradient was achieved by the application of liquid nitrogen (LN₂) in a portion of the part (central region) through a containment made of polystyrene and EPS, used to obtain the isolation of the contact region between the cryogenic liquid and the steel with the external environment. Finally, the results of the experimental tests are compared to the numerical analyzes performed using the ABAQUS® program. A computational model that satisfactorily represents the thermal gradient generated by a cryogenic leak in an element made with ASTM A131 Gr. EH36 steel material was developed.*

Keywords: FLNG; Steel ASTM A131 Gr. EH36; Cryogenic Leaks.