



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**ANÁLISE TERMOMECAÂNICA DOS EFEITOS DE  
VAZAMENTOS CRIOGÊNICOS ACIDENTAIS EM  
ESTRUTURAS FLNG FABRICADAS COM AÇO ASTM A131  
Gr. EH36.**

**KAIQUE MOREIRA MATOS MAGALHÃES**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ARMANDO SÁ RIBEIRO JUNIOR**

Salvador - BA  
Agosto/2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**ANÁLISE TERMOMECAÂNICA DOS EFEITOS DE  
VAZAMENTOS CRIOGÊNICOS ACIDENTAIS EM  
ESTRUTURAS FLNG FABRICADAS COM AÇO ASTM A131  
Gr. EH36.**

**KAIQUE MOREIRA MATOS MAGALHÃES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Dr. Armando Sá Ribeiro Junior.

Salvador - BA  
Agosto/2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Moreira Matos Magalhães, Kaique  
ANÁLISE TERMOMECÂNICA DOS EFEITOS DE VAZAMENTOS  
CRIOGÊNICOS ACIDENTAIS EM ESTRUTURAS FLNG FABRICADAS  
COM AÇO ASTM A131 Gr. EH36. / Kaique Moreira Matos  
Magalhães. -- Salvador, 2019.  
88 f. : il

Orientador: Armando Sá Ribeiro Júnior.  
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Estruturas) -- Universidade Federal da  
Bahia, Escola Politécnica, 2019.

1. Análise numérica. 2. Termomecânica. 3.  
Vazamentos criogênicos. 4. Tensões térmicas. 5.  
Ensaio experimental. I. Sá Ribeiro Júnior, Armando.  
II. Título.

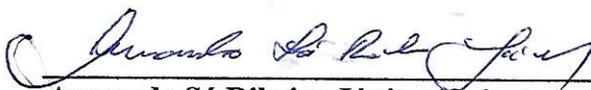


Universidade Federal da Bahia  
Escola Politécnica  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

**Ata de defesa de dissertação**

Aos quinze dias do mês de agosto de 2019, às 10:00 horas, no Auditório Hernani Sobral (Sala de Videoconferência) da Escola Politécnica da UFBA, reuniram-se, os professores Armando Sá Ribeiro Júnior (professor orientador) da Universidade Federal da Bahia, Geraldo José Belmonte dos Santos da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) e Flavio Pietrobon Costa da Universidade do Estado da Bahia (UNEB) para a avaliação da Dissertação do mestrando Kaique Moreira Matos Magalhães, intitulada “*Análise numérica e experimental dos efeitos de vazamentos criogênicos acidentais em estruturas FLNG fabricadas com aço ASTM A131 Gr. EH36*”. O professor Armando, que presidiu a banca, todos os professores e o candidato Kaique Moreira Matos Magalhães estavam na sala de videoconferência da Universidade Federal da Bahia. Após a apresentação, a banca reuniu-se e considerou, por unanimidade, que o candidato foi **APROVADO**, tendo que apresentar as alterações sugeridas pela banca em um prazo máximo de 60 dias.

Salvador, 15 de agosto de 2019

  
Armando Sá Ribeiro Júnior (Orientador)  
Departamento de Construção e Estruturas  
Universidade Federal da Bahia

  
Gerald José Belmonte dos Santos  
Departamento de Tecnologia  
Universidade Estadual de Feira de Santana

  
Flavio Pietrobon Costa  
Departamento de Ciências Exatas e da Terra  
Universidade do Estado da Bahia

---

Data da homologação pelo Colegiado: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2019

\_\_\_\_\_  
Alberto Borges Vieira Júnior  
Coordenador

*"Aos meus pais José Luis (in memoriam) e Erica pelo amor Incondicional"*

# AGRADECIMENTO

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas. Gostaria, por este motivo, de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa se tornasse uma realidade. A todos quero manifestar os meus sinceros agradecimentos.

À **Deus**, presente em todos os dias na minha vida me dando força para nunca desistir e fé para seguir em frente.

Ao meu orientador Professor Dr. **Armando Sá Ribeiro Junior** por todo conhecimento transmitido durante minha formação acadêmica, bem como toda contribuição e confiança em mim depositada na realização deste trabalho.

Ao Professor **Ebenézer Silva Cavalcanti (Bené)** por toda prestatividade na ajuda para preparação do material utilizado durante os testes experimentais.

À Professora Dr. **Vivien Luciene Viaro** que me mostrou os primeiros passos da pesquisa científica.

Ao meu pai **José Luiz Magalhães** (*in memoriam*) por todo carinho, amor e sacrifício para que esse meu sonho se tornasse realidade, o meu maior exemplo e sempre estará presente em meu coração.

À minha mãe **Érica Magalhães** por todo amor maternal e proteção durante esses anos de minha vida, terás sempre a minha primeira virtude (o amor filial).

À minha irmã **Kelly Magalhães** que foi como uma mãe para mim nestes anos longe de casa.

Gostaria de deixar agradecimentos muito especiais. Em primeiro lugar, aos meus Avós **Naguimar Martins** e **Orlando Martins**, pela sólida formação dada até à minha juventude, que me proporcionou ser um homem de carácter e comprometido, sempre em busca do melhor para mim e todos os que estiverem em minha volta.

À **Bianca Barreto**, agradeço todo o seu amor, carinho e pelo apoio ao longo de todo esse período.

À minha madrinha **Lourdes Magalhães** por toda preocupação e zelo, sendo fundamental na minha caminhada principalmente após a perda do meu pai.

Aos colegas do Gitec, em especial à **Icaro Vilasboas** e **Danilo Gomes** pelo apoio durante a realização deste trabalho.

A todos os meus familiares, pois o carinho de vocês é fundamental.

Aos funcionários da Universidade Federal da Bahia pelo empenho em tornar o ambiente mais seguro e eficaz nas realizações de todas as atividades dentro da Universidade.

Aos colegas do curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, pela amizade e companheirismo durante esses anos.

Aos meus amigos mais antigos que nunca estiveram ausentes, agradeço a amizade e o carinho que sempre me disponibilizaram.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante todo o período da pesquisa.

A todos obrigado por permitirem que esta dissertação seja uma realidade.

*“The greater our knowledge increases the greater our ignorance unfolds”  
John F. Kennedy*

# RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise numérica e experimental termomecânica dos efeitos de vazamentos criogênicos acidentais em estruturas fabricadas com aço carbono ASTM A131 Gr. EH36. Neste estudo foram realizados ensaios experimentais para a determinação do gradiente de temperatura e as tensões térmicas induzidas 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 ( $LN_2$ ) em uma porção da peça, região central, através de uma contenção fabricada com poliuretano e EPS (poliestireno expandido), utilizada para obter o isolamento da região de contato entre o fluido criogênico e o aço em contato com o ambiente externo. As deformações térmicas foram determinadas através de extensômetros fixados na placa de aço. Por fim, os resultados dos ensaios experimentais são comparados às análises numéricas, realizadas através do programa ABAQUS®. Desenvolveu-se neste trabalho um modelo computacional que representa de forma satisfatória o gradiente térmico e as tensões induzidas, geradas por um vazamento criogênico em um elemento feito com o material de aço ASTM A131 Gr. EH36.

**Palavras-chave:** Análise numérica; Termomecânica; Vazamentos criogênicos; Tensões térmicas; Ensaio experimental.

# ABSTRACT

This work presents a numerical and experimental thermomechanical analysis of the effects of accidental cryogenic leaks on structures made with carbon steel ASTM A131 Gr. EH36. In this study, some experimental tests were carried out to determine the temperature gradient and induced thermal stresses in a steel plate (ASTM A131 Gr. EH36), widely used in shipbuilding, which could be generated by accidental leakage in some elements of the structures used in LNG (Liquefied Natural Gas) exploration. The thermal gradient was achieved through the application of nitrogen liquid (LN<sub>2</sub>) in a portion of the plate, central region, through a containment made of polyurethane and EPS (expanded polystyrene), used to obtain the isolation of the contact region between the cryogenic fluid and the steel in contact with the external environment. The thermal strain was measured by strain gauges attached to the steel plate. Finally, the results of the experimental tests are compared to the numerical analyzes performed through the ABAQUS® program. A computational model was developed so that satisfactorily represents the thermal gradient and the induced stress generated by a cryogenic leak in an element made with ASTM A131 Gr. EH36 steel material was developed.

**Keywords:** Numerical analysis; Thermomechanical; Cryogenic leaks; Thermal stress; Experimental test.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática de uma estrutura FLNG.....	17
Figura 2 – Diagramas da cadeia de fornecimento para GNL e FLNG.....	25
Figura 3 – Cadeia de fornecimento para GNL e FLNG. ....	27
Figura 4 – Equipamento de descarregamento do líquido criogênico.....	27
Figura 5 – Etapas da cadeia de fornecimento de gás natural liquefeito. ....	28
Figura 6 – Fluxograma da classificação das etapas para garantia da segurança. ....	31
Figura 7 – Configuração de um teste realizado.....	33
Figura 8 – Localização dos termopares.....	34
Figura 9 – Gráfico dos valores da temperatura nos termopares TC1 a TC10.....	35
Figura 10 – Gráfico dos valores da temperatura nos termopares TC11 a TC20.....	35
Figura 11 – Ajuste de curva para $\lambda$ em função da temperatura para aço ASTM A131 Gr. EH36. ....	38
Figura 12 – Ajuste de curva de $\rho c p$ em função da temperatura para aço ASTM A131 Gr. EH36. ....	39
Figura 13 – Dados experimentais e curva ajustada. ....	40
Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental. ....	46
Figura 15 – Sistema de aquisição Lynx® ADS2000.....	47
Figura 16 – Aparato de isolamento da região de contato do líquido criogênico e a chapa. ....	48
Figura 17 – Locações dos termopares e extensômetros (medidas em mm).....	49
Figura 18 – Chapa de aço após instalação dos termopares e rosetas.....	50
Figura 19 – Detalhe da fixação das rosetas .....	51
Figura 20– Região da poça para o contato do líquido criogênico (medidas em mm). ....	52
Figura 21 – Aparato experimental para realização dos testes.....	52
Figura 22 –Roseta de 45° utilizada no experimento.....	53
Figura 23 – Geometria utilizada na análise numérica .....	54
Figura 24 – Regiões para aplicação do coeficiente de convecção.....	55
Figura 25 – Restrição de deslocamento do modelo numérico .....	56
Figura 26 – Malha utilizada no modelo.....	57

Figura 27 – Resultado experimental do TP1.....	59
Figura 28 – Resultado experimental do TP2.....	60
Figura 29 – Resultado experimental do TP3.....	60
Figura 30 – Resultado experimental do TP4.....	61
Figura 31 – Resultado experimental do TP5.....	62
Figura 32 – Resultado experimental do TP6.....	63
Figura 33 – Resultado experimental do TP7.....	63
Figura 34 – Resultado experimental do TP8.....	64
Figura 35 - Resultado experimental do TP9.....	64
Figura 36 - Resultado experimental do TP10.....	65
Figura 37 – Resultados experimentais dos termopares TP1, TP2, TP5, TP6, TP7 e TP10.....	66
Figura 38 – Resultados experimentais dos termopares TP8 e TP9.....	67
Figura 39 – Tensões principais – Roseta 01.....	68
Figura 40 – Tensões principais – Roseta 02.....	68
Figura 41 – Resultado numérico do TP1s.....	70
Figura 42 – Resultado numérico do TP2s.....	70
Figura 43 – Resultado numérico do TP5s.....	71
Figura 44 – Resultado numérico do TP6s.....	71
Figura 45 – Resultado numérico do TP7s.....	72
Figura 46 – Resultado numérico TP10s.....	72
Figura 47 – Resultados numéricos dos pontos onde estão fixados os termopares (inferior e superior).....	73
Figura 48 – Gradiente térmico do modelo numérico (Resultados em Kelvin).....	74
Figura 49 – Tensões principais do modelo numérico – Roseta 01.....	75
Figura 50 – Tensões principais do modelo numérico – Roseta 02.....	75
Figura 51 – Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP1 e TP1s.....	76
Figura 52 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP2 e TP2s.....	77
Figura 53 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP5 e TP5s.....	77
Figura 54 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP6 e TP6s.....	78
Figura 55 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP7 e TP7s.....	78

Figura 56 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP10 e TP10s.  
.....79

Figura 57 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) da Roseta 01...80

Figura 58 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) da Roseta 02...80

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados experimentais de $\lambda$ para o aço carbono ASTM A131 Gr. EH36. .....	37
Tabela 2 – Resultados experimentais de $\rho_{cp}$ para o aço carbono ASTM A131 Gr. EH36. ....	37
Tabela 3 – Composição química do aço carbono ASTM A131 GR. EH36.....	47
Tabela 4 – Características da cola Loctite 496.....	50
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do material ASTM A131 Gr. EH36 .....	56
Tabela 6 – Máxima diferença percentual dos valores de temperatura dos termopares fixados em superfícies opostas da chapa de aço ASMT A131 Gr. EH36 .....	67
Tabela 7 – Máxima diferença percentual dos valores de temperatura do modelo numérico em superfícies opostas da chapa de aço ASMT A131 Gr. EH36 .....	73
Tabela 8 – Máxima diferença entre os valores temperatura (experimental e numérico). .....	79
Tabela 9 – Máxima diferença entre os valores de tensão térmica (experimental e numérico). ....	81

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**GITEC**- Grupo de Inovação Tecnológica.

**GN** - Gás Natural.

**GNLE** - Gás Natural Liquefeito Embarcado.

**FLNG** - *Floating Liquefied Natural Gás.*

**GNL** - Gás Natural Liquefeito.

**DCE** – Departamento de Construção e Estruturas;

**NTNU** - *Norwegian University of Science and Technology.*

**OTC** - *Offshore Technology Conference.*

**OMI** - Organização Marítima Internacional.

**FPSO** - *Floating Production Storage and Offloading.*

**IACS** - *International Association of Classification Societies*

**GAO** - *Government Accountability Office*

**ASS** - *Authentic Stainless Steel.*

**UFBA** – Universidade Federal da Bahia.

**BFGS** - *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*

**IHCP** - *Inverse Heat Conduction Problem*

**SENAI** - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

**MEF** – Método dos Elementos Finitos

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 Considerações Iniciais.....	16
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Objetivo .....	21
1.3.1 Objetivos Gerais.....	21
1.3.1 Objetivos Específicos .....	22
1.4 Organização do texto .....	22
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
2.1 Cadeia de fornecimento de GNL por plantas <i>FLNG</i> .....	24
2.2 Análise de risco em estruturas <i>FLNG</i> .....	28
2.3 Análise térmica em estruturas <i>FLNG</i> .....	32
2.4 Propriedades térmicas dependentes da temperatura.....	36
2.4.1 Condutividade e Capacidade térmica.....	36
2.4.2 Coeficiente de convecção .....	39
2.5 Modelagem matemática do problema termomecânico linear .....	41
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
3.1 Introdução .....	44
3.2 Metodologia da análise .....	44
3.3 Materiais utilizados.....	47
3.4 Procedimento de ensaio.....	48
3.5 Modelo numérico.....	53
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>58</b>
4.1 Introdução .....	58
4.2 Resultados dos ensaios experimentais .....	58
4.2.1 Resultado Experimental de Temperatura .....	59
4.2.2 Resultado Experimental das Tensões.....	67
4.3 Resultados da análise numérica .....	69
4.3.1 Resultado numérico do perfil de temperatura.....	69

4.3.1 Resultado numérico das tensões térmicas.....	74
4.4 Comparação dos resultados numérico e experimental .....	76
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ...</b>	<b>82</b>
5.1 Conclusões.....	82
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	83
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Considerações Iniciais

Os processos de exploração e produção de gás natural (GN) têm merecido destaque nos interesses da indústria e na academia. Neste contexto, há o desafio constante de desenvolver ou aprimorar novas tecnologias que possibilitem a produção, o armazenamento e o transporte de gás natural 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 do GN produzido em poços *offshore* pode ser realizado através de um sistema de tubulação. Contudo este processo normalmente apresenta o custo muito elevado, considerando as distâncias do poço ao continente. A solução encontrada foi liquefazer o gás através de refrigeração, tornando-o assim mais fácil de armazenar e transportar em navios apropriados. Nesse processo, denominado de Gás Natural Liquefeito Embarcado (GNLE), também conhecido pela sigla, *FLNG*, da expressão inglesa "*Floating Liquefied Natural Gas*", o GN é liquefeito e armazenado em vasos criogênicos dos navios e transportado até a estação de armazenagem em terra, onde retorna à sua condição de gás (regaseificação) e é distribuído para uso comercial ou industrial. Esta estrutura pode ser observada na Figura 1.

O *FLNG* é o processo de menor complexidade, econômico e mais seguro com relação à armazenagem e transporte do GN. O gás natural extraído do poço apresenta

impurezas, água e outros líquidos, que devem ser removidos antes do processo de liquefação (MELLO e CARVALHO, 2014). A retirada dos líquidos pesados é realizada por gravidade em tanques. Também são retirados outros elementos como ácidos e metais. O processo de liquefação é realizado através de trocadores de calor que refrigeram o gás à uma temperatura de aproximadamente  $-160^{\circ}$  Celsius diminuindo o seu volume cerca de 600 vezes (FOSS, 2002). O resultado é um produto líquido que pode ser armazenado e transportado em navios.

Figura 1- Representação esquemática de uma estrutura FLNG.



Fonte: SHELL, 2017

Cada vez mais pesquisas estão sendo realizadas na área para uma melhor certificação dos processos relativos principalmente à segurança estrutural das plantas *FLNG*. Em prol dessa busca, muitos engenheiros vêm se especializando nas diversas etapas que constituem a construção e operação dessas estruturas.

Os equipamentos que compõem as plantas de *FLNG* estão submetidos a condições extremas de operação e suscetíveis a temperaturas criogênicas (abaixo de  $-160^{\circ}\text{C}$ ) no caso, por exemplo, de um vazamento acidental do GNL (Gás Natural Liquefeito). Um dos procedimentos adotado é a inclusão de proteção criogênica

(isolamento térmico) para evitar uma possível falha estrutural. Contudo, os critérios para decidir a necessidade, ou não, e o tipo de proteção, que apresenta custo elevado, não foram completamente estabelecidos.

Um aspecto relevante quanto ao projeto de equipamentos utilizados no processo *FLNG* é em relação ao comportamento do material quando submetido às temperaturas criogênicas.

O GNL armazenado, tem uma temperatura criogênica, que é abaixo da transição dúctil-frágil para os aços marinhos (-50°) que compõem os navios de GNL (PARK et al., 2004). Para ocorrer o vazamento basta que aconteça, por exemplo, uma pequena ruptura de um dos vasos de contenção de GNL resultando em um fluxo do líquido criogênico que entrará em contato com as estruturas de aço não projetadas para estas condições de operação (FARIA ,2016).

Com o aumento das preocupações de segurança em virtude de alguns incidentes ocorridos (VANEM et al., 2008), verificou-se a necessidade de um estudo mais amplo dos possíveis impactos que um ataque potencial dos navios possa ter, caso ocorra uma liberação involuntária de carga de GNL. Uma liberação não intencional de GNL tem dois efeitos significativos:

- 1) Os efeitos do GNL criogênico em contato com a estrutura de aço do navio e estruturas de suporte da planta;
- 2) A natureza inflamável do GNL e os possíveis riscos de incêndio para o navio.

Este trabalho terá como enfoque principal os possíveis efeitos do GNL criogênico ao entrar em contato com a estrutura de aço do costado do navio e estruturas de suporte da planta, que inicialmente não foram projetados para esse tipo de situação. Será avaliado o comportamento do aço ASTM A131 GR. EH36 (aço marinho) quando submetido ao gradiente térmico oriundo de um vazamento acidental, com o intuito de propor um modelo numérico que represente este fenômeno. O principal objetivo é elaborar um modelo numérico que apresente uma boa concordância com os ensaios experimentais e, portanto, represente de forma satisfatória o fenômeno físico estudado. A principal vantagem é a facilidade em se trabalhar com este tipo de modelo, sendo possível a realização de diversos testes relacionados ao comportamento da estrutura.

Os tipos e métodos de ensaios realizados são diretamente relacionados à forma como as informações serão usadas na análise computacional, pois em muitos casos a modelagem completa dos danos causados por cargas acidentais é algo complexo. Portanto, a melhor solução para estes casos é se trabalhar com os danos em “cascata”, analisando de forma progressiva cada efeito gerado pela carga acidental que o elemento esteja submetido.

Neste trabalho será realizada a determinação do gradiente térmico e as tensões induzidas em uma chapa de aço ASTM A131 GR. EH36 (representando aqui uma parte do costado do navio) por um modelo numérico, desenvolvido com o programa Abaqus®, além de ensaios experimentais para validação dos resultados obtidos na análise numérica.

## 1.2 Justificativa

O gás natural liquefeito gerou uma grande atenção da indústria energética, porque seu uso pode aliviar as crescentes preocupações com a poluição ambiental produzida por combustíveis fósseis clássicos e usinas nucleares, uma vez que é um combustível fóssil menos poluente que os demais. No entanto, quando as reservas de gás estão localizadas em áreas *offshore* o GNL torna-se um desafio explorá-la porque:

- a) A instalação de condutos para a transferência de GN para instalações de GNL *onshore* é dispendiosa e complexa;
- b) Exige-se muito esforço para escavar e monetizar essas reservas oceânicas com instalações flutuantes onde a liquefação *offshore* de GN é possível.

Portanto, o desenvolvimento da tecnologia flutuante de GNL está se tornando cada dia mais importante. Embora as tecnologias *FLNG* tenham vantagens sobre as tecnologias convencionais de GNL, ainda existem diversos obstáculos. Para superar esses desafios, os projetos modulares relacionados às etapas principais e típicas do processo *FLNG*, os sistemas de pré-tratamento do gás, liquefação, armazenagem e regaseificação devem ser aprimorados.

Acerca dos riscos acidentais referentes a tecnologia *FLNG*, existem diversos fatores que devem ser levados em consideração, principalmente em aspectos relacionados ao meio ambiente com o vazamento acidental de líquidos criogênicos em sistemas marinhos como, por exemplo, mortandade de populações por variação súbita de temperatura, perda de fertilidade no ecossistema, danos à cadeia alimentar e mortandade de corais.

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 (MME, 2015). O gás natural é uma energia carente de enxofre e a sua combustão é completa, liberando como produto da mesma apenas o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e vapor de água, o que faz do gás natural uma energia ecológica e menos poluente. Outra vantagem é a facilidade de adaptação dos equipamentos que utilizam outro tipo de combustível fóssil para o uso de gás natural.

O interesse da indústria do petróleo e gás no processo *FLNG* pode ser evidenciado pelo projeto desenvolvido por um consórcio de empresas liderado pela Shell BP. Para uma análise da dimensão do projeto, a planta de refrigeração tem uma capacidade de armazenamento de GNL com um volume equivalente a 175 piscinas olímpicas e o sistema de refrigeração irá bombear cerca de 50 milhões de litros de água do oceano por hora para auxiliar a liquefação do gás natural. A planta foi construída pela *Samsung Heavy Industries Geoje*, estaleiro situado na Coreia do Sul (SHEEL, 2018).

No Brasil, houve uma iniciativa da Petrobrás na criação de um consórcio para exploração de gás natural na camada de pré-sal utilizando o processo *FLNG*. As informações disponíveis mostram que, após discussões internas dos técnicos da empresa, o processo foi interrompido devido à insegurança relativa a pouca confiabilidade que ainda existe sobre a técnica *FLNG*. Abaixo é apresentada um

trecho da reportagem disponível na *internet* que evidencia a necessidade de maiores estudos nesta área.

*"A decisão sobre a quarta rota para o gás do pré-sal vem gerando embates entre as áreas técnicas da Petrobras. De um lado, Gás & Energia defende a escolha do FLNG. Outra área da companhia que também é favorável ao projeto é a Engenharia. O apoio à alternativa é baseado no argumento de que sua utilização trará mais ganhos para a companhia e que a adoção de gasodutos também contempla riscos. Já o E&P se mostra mais favorável ao gasoduto, alegando tratar-se de uma alternativa já dominada pela Petrobras e sem maiores riscos. Os mais críticos alegam que o FLNG é uma tecnologia nova, ainda carente de mais certificação. De fato, a tecnologia do FLNG ainda não foi testada."*  
(GASNET, 2013).

Diante do exposto, somando a importância do tema na atual condição de exploração de gás natural no país e a carência de estudos conclusivos sobre as problemáticas do *FLNG*, percebe-se uma oportunidade de estudo na compreensão e proposição de modelos mais representativos para problemas em materiais sujeitos a interação com fluidos criogênicos, tema central deste trabalho.

## **1.3 Objetivo**

### **1.3.1 Objetivos Gerais**

Avaliação do gradiente de temperatura e das tensões térmicas induzidas por vazamentos acidentais, que submetem o material a tensões criogênicas, em uma chapa de aço ASTM A131 GR EH36, empregando correlação de resultado da modelagem computacional via MEF, desenvolvido com o programa Abaqus®, e os obtidos por realização de ensaios experimentais, validando as soluções da análise numérica.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa dissertação são:

- Determinar o gradiente térmico de forma experimental na chapa de aço (ASTM A131 GR. EH36), representando parte do costado do navio, devido a um vazamento criogênico acidental;
- Determinar experimentalmente as deformações e tensões térmicas induzidas pelo gradiente de temperatura;
- Desenvolver um modelo numérico, utilizando o Método dos Elementos Finitos com o software ABAQUS®, para simular os efeitos do vazamento criogênico na placa e validar o modelo através da comparação com os resultados dos ensaios experimentais.

### 1.4 Organização do texto

No Capítulo 01 são introduzidos os conteúdos que serão necessários para entendimento do estudo realizado neste trabalho. São apresentados também a justificativa para o desenvolvimento desta dissertação além dos objetivos, gerais e específicos, propostos.

O Capítulo 02 apresenta trabalhos que avaliaram os critérios de falha e comportamento dos aços quando submetidos à temperatura criogênica. A priori é desenvolvida uma revisão bibliográfica referente à análise de risco na estrutura de produção do GNL, em seguida, como o foco do trabalho é avaliar os efeitos das cargas criogênicas ao entrarem em contato com os elementos não projetados para este fim, é realizado um levantamento do efeito da temperatura criogênica nas propriedades do material, assim como as metodologias para modelagem do problema. Alguns trabalhos que abordaram as propriedades térmicas dependentes da temperatura também serão apresentados, para serem utilizados como dados de entrada da análise numérica termomecânica desenvolvida.

Será apresentado no Capítulo 03 a metodologia e o material utilizado neste trabalho, para a análise experimental do gradiente e das tensões térmicas induzidas na placa de aço ASTM A131 GR. EH36. Estes resultados serão utilizados para comparação e validação do modelo numérico desenvolvido, visando representar de forma satisfatório o fenômeno físico estudado.

No Capítulo 04 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais com nitrogênio líquido na chapa de aço ASMT A131 Gr. EH36, propostos no Capítulo 03. Em seguida são mostrados os resultados do perfil de temperatura da análise numérica transiente térmica, nos pontos da chapa onde estão soldados os termopares da análise experimental, para que seja feita uma comparação entre os resultados (numérico e experimental) além das tensões térmicas, que foram medidas através de extensômetros fixados na chapa de aço.

Por fim, no Capítulo 05 são feitas as considerações finais do estudo realizado nesta dissertação, com o intuito de apresentar as conclusões obtidas após as análises experimentais e numéricas do modelo proposto. Ao final deste capítulo são feitas sugestões para trabalhos futuros seguindo a mesma área de concentração do estudo desenvolvido.

# Capítulo 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Cadeia de fornecimento de GNL por plantas *FLNG*

A incerteza e o desequilíbrio no fornecimento e consumo de energia tornaram-se um entrave para o crescimento contínuo da economia global. Existem muitas sugestões de mudança no paradigma do mercado de energia convencional. Esse ambiente de incertezas é principalmente atribuído às crises políticas, geográficas e econômicas como, por exemplo, esgotamento de combustíveis fósseis, carvão e petróleo bruto, o rápido aumento do consumo de energia em países recentemente industrializados, limitação de recursos, além da limitação de emissões de carbono, por convenções de mudança climática, como o protocolo de *Kyoto* (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2010).

No levantamento feito por Won et al. (2014) foram apresentadas as diversas vantagens em decorrência da utilização do GNL como, por exemplo, em função da minoração da poluição ambiental comparados a outras fontes energéticas que envolvem combustíveis fósseis clássicos e usinas nucleares.

Com o volume reduzido de GN, tornou-se viável a entrega de GNL em mercados distantes. De fato, a forte demanda de gás e a descoberta de grandes reservatórios de gás disponíveis resultaram em maior atenção à liquefação do GN. Entre vários tipos de comércio de gás natural, a *FLNG* tem sido um setor de crescimento principal na indústria de GNL desde sua primeira instalação na *Gulf Gateway*, localizada no Golfo do México dos EUA em 2005. No entanto, grande parte das reservas de gás natural estão localizadas em poços *offshore*, exigindo assim

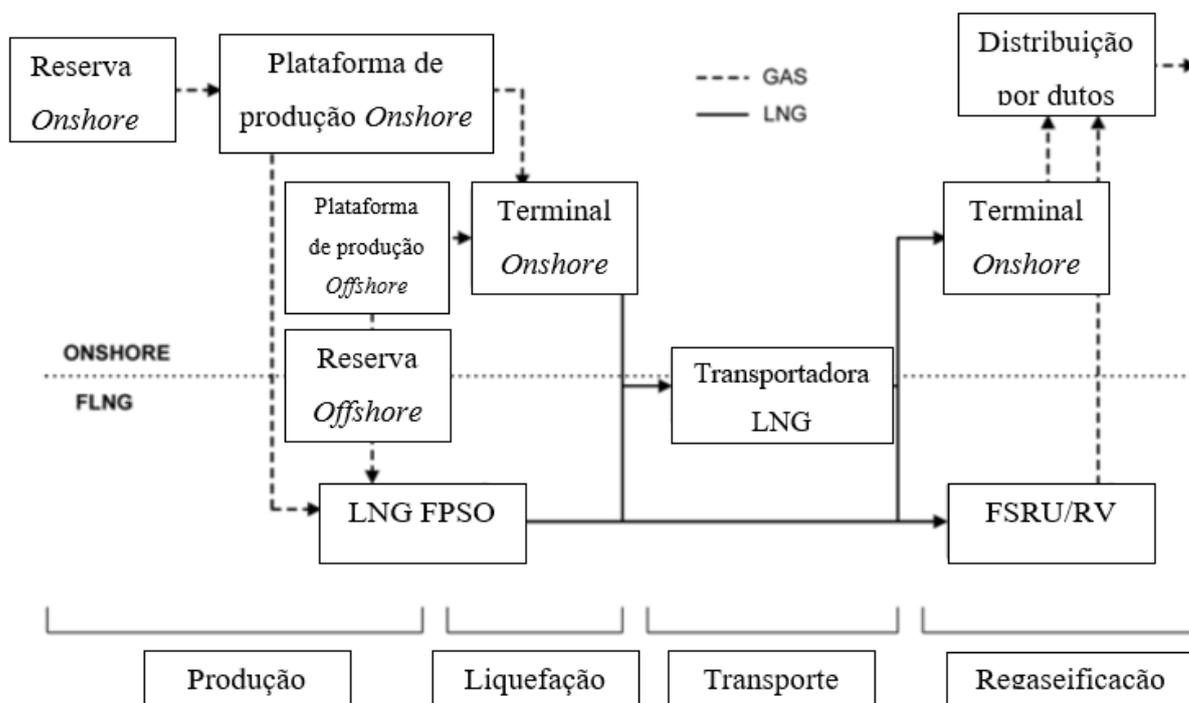
muitos esforços para se escavar e monetizar essas reservas com instalações flutuantes, onde é possível realizar a liquefação do GN.

Embora as tecnologias *FLNG* tenham vantagens em relação às tecnologias convencionais de armazenamento e transporte de GNL, ainda existem vários processos que precisam ser aprimorados, principalmente os aspectos relacionados à segurança operacional.

Os diagramas da cadeia de fornecimento para GNL e *FLNG* são apresentados na Figura 2. Ambas as tecnologias, GNL e *FLNG*, são compostas por quatro processos principais:

- (i) Produção de gás e transporte até o terminal de liquefação;
- (ii) Liquefação, armazenamento e carregamento em transportadores de GNL e *FLNG*;
- (iii) Transporte e descarga;
- (iv) Armazenamento, regaseificação e distribuição.

Figura 2 – Diagramas da cadeia de fornecimento para GNL e *FLNG*.



Fonte: Adaptado de WON et al., 2014.

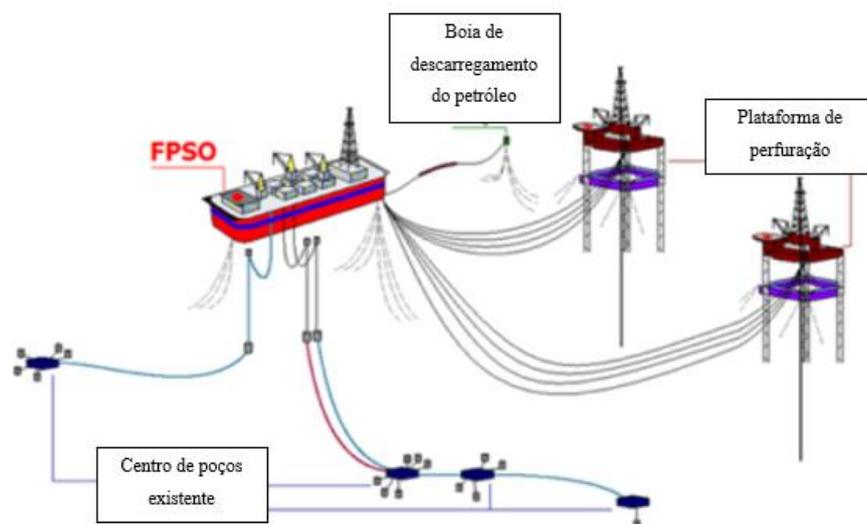
Um aspecto atraente do projeto de *FLNG* são os navios de casco de aço para transportadores de GNL que são bem adaptados para liquefazer ou regaseificar o GN. Essas embarcações podem mover o GNL facilmente entre os campos sempre que necessário, em comparação com outros tipos de plataformas flutuantes. Para instalar um terminal de GNL no mar, as seguintes partes devem ser construídas:

- (i) Produção flutuante;
- (ii) Embarcação de armazenamento e transferência (*FPSO*);
- (iii) Barcaça de liquefação e unidade flutuante de armazenamento e regaseificação (*FSRU*).

Ao contrário dos *FPSO*'s produtores de óleo convencionais, os navios *FPSO* de GNL contêm instalações de liquefação de GNL a bordo. O elemento fixo recebe o gás não tratado por tubulação. Todos os utilitários, instrumentação e braços de carga estão posicionados na plataforma fixa.

Até o momento, no Brasil existe apenas uma *FSRU* operacional, a transportadora de GNL convertida da Golar LNG, enquanto existem vários navios de regaseificação em operação na Argentina, no Reino Unido e nos EUA. Os terminais *FLNG* devem ser operados mesmo em condições climáticas severas, garantindo uma operação segura e eficaz do terminal. A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático, ilustrando o sistema flutuante de produção, armazenamento e descarregamento (*FPSO*) da cadeia de fornecimento de GNL e *FLNG*.

Figura 3 – Cadeia de fornecimento para GNL e FLNG.



Fonte: Adaptado de WON et al., 2014.

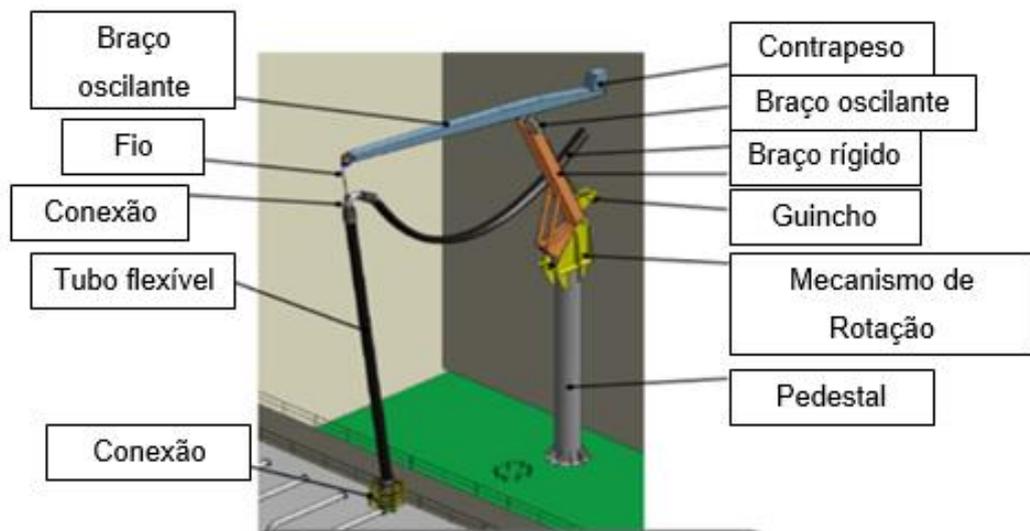
O descarregamento de GN e GNL entre dois navios no mar é uma operação complexa em condições climáticas adversas. Equipamentos específicos que fornecem descarregamento seguro e eficiente são, portanto, importantes para os operadores. Existem muitos tipos de equipamentos e métodos de descarregamento. Pode-se destacar dois equipamentos principais de descarregamento, os braços de carga e as mangueiras criogênicas. Na

Figura 4 é apresentado o esquema de descarregamento do líquido através das mangueiras criogênicas (a) e dos braços de carga (b).

Figura 4 – Equipamento de descarregamento do líquido criogênico.



(a) Mangueiras Criogênicas



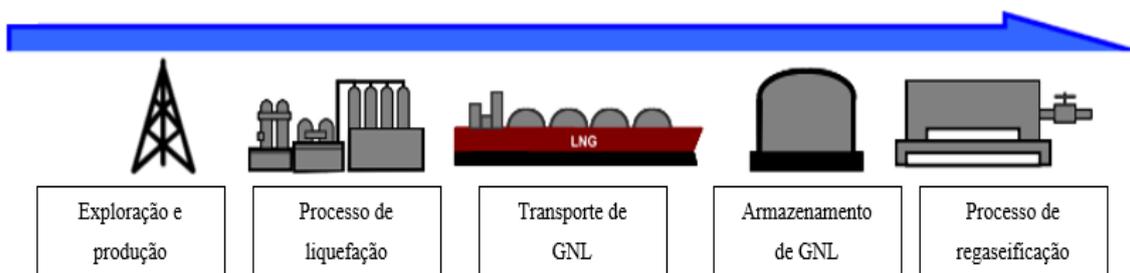
(b) Braços de Carga

Fonte: Adptado de WON et al. 2014.

## 2.2 Análise de risco em estruturas FLNG

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. De acordo com esses autores, a cadeia de fornecimento de gás natural liquefeito pode ser dividida em 5 passos, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Etapas da cadeia de fornecimento de gás natural liquefeito.



Fonte: Adaptado de PALTRINIERI et. al, 2015.

Em uma das análises realizadas por Paltrinieri et. al (2015) estabeleceu-se uma visão geral dos principais riscos relacionados ao tipo de equipamento considerado (tanques de armazenagem, compressores, bombas, colunas e tubulações). Para cada categoria de equipamento foram identificados vários tipos de problemas como, por exemplo, quebra de casco em fase de vapor e líquido, vazamento de gás, ruptura catastrófica, além do colapso de vasos. Essa análise introduz todos os cenários de acidentes atípicos mais importantes identificados para a regaseificação de GNL. 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 que não foram projetados para esse fim.

Em um estudo proposto por Patel et al. (2011) na *OTC (Offshore Technology Conference)*, definiu-se aspectos relativos à segurança operacional e algumas perspectivas regulatórias para plantas *FLNG*, em função, principalmente, da crescente procura na comercialização de campos de gás *offshore* acoplados às previsões da indústria, indicando que a demanda mundial de GN aumentará, levando à um interesse significativo no desenvolvimento de plantas de produção de gás natural liquefeito. Foram apresentadas pelos autores algumas questões adicionais a serem avaliadas, em comparação as preocupações da técnica usual de produção de GNL, em aplicações terrestres, para a produção em ambiente *offshore*, como:

- 1) Planta de produção de GNL (*offshore*);
- 2) Método para manuseio da carga criogênica;
- 3) Extensão do equipamento de manuseio e produção de gás a bordo;
- 4) Equipamentos existentes no convés e nos tanques de armazenamento de GNL;
- 5) Manutenção e inspeção;
- 6) Multiplicidade de operações e complexidade;
- 7) Múltiplos produtos para armazenamento e capacidade de armazenamento no interior.

Nos últimos anos, vários proponentes da tecnologia GNL, desenvolvedores e grandes empresas de petróleo solicitaram fornecer requisitos de classificação para a tecnologia a ser utilizada em uma aplicação *offshore* de uma instalação de produção de GNL. Ao desenvolver requisitos de classificação para uma nova tecnologia, a *ABS (2015) (American Bureau of Shipping)* adota a seguinte metodologia de avaliação:

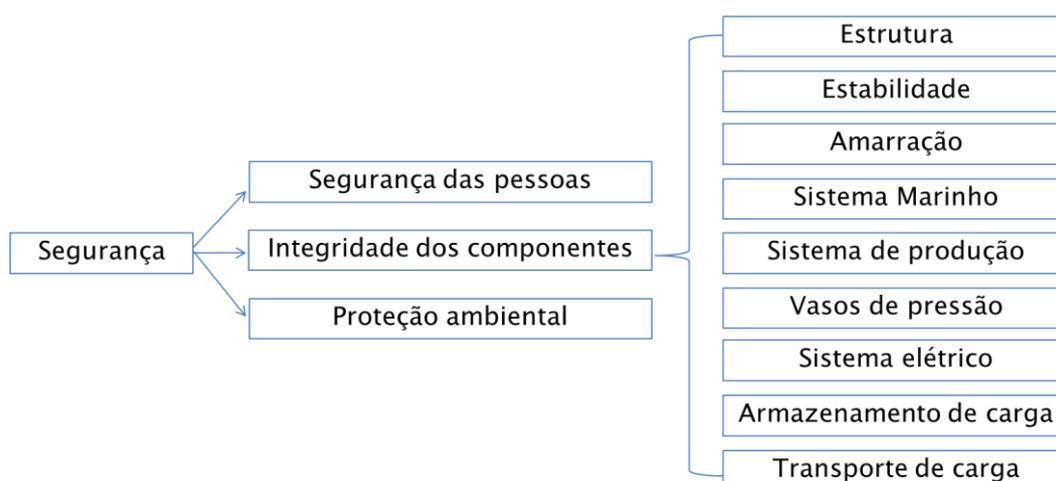
- a) Desenvolver uma compreensão da concepção;
- b) Identificar os novos aspectos do projeto proposto;
- c) Identificar os perigos e preocupações de segurança decorrentes da concepção e dos novos recursos específicos;
- d) Identificar os requisitos e padrões marinhos e offshore existentes e realizar uma análise específica;
- e) Utilizar a análise para identificar as áreas do projeto para as quais não existem atualmente normas marítimas relevantes;
- f) Aplicar os princípios e metodologia de risco para identificação de riscos.

No desenvolvimento de regras, a grande preocupação para a *ABS* é a promoção da segurança à vida, propriedade e meio ambiente. Assim, o foco principal dessas análises é a aplicação segura da tecnologia *FLNG* em unidades flutuantes *offshore* e não a otimização do projeto com relação à eficiência.

Vários conceitos de *FLNG* propostos até hoje têm elementos comuns de perspectivas de tecnologia e aplicação. Todos os conceitos apresentam o uso de várias tecnologias existentes que possuem ampla experiência em aplicações terrestres ou marítimas. O processamento de gás, a liquefação e a tecnologia de fracionamento selecionada são baseadas na experiência terrestre. A tecnologia de armazenamento de carga baseia-se no transporte de gases de petróleo liquefeitos a granel num ambiente marinho como, por exemplo, transportadores de GNL. A tecnologia para casco, amarração, acomodação, produção submarina e integração de instalações de processo vem da experiência do *FPSO offshore*. Considera-se que a nova tecnologia inclui a transferência de carga criogênica em ambiente *offshore* (PATEL et al., 2011).

O desafio para a *FLNG* é determinar a aplicabilidade e a segurança da tecnologia selecionada para aplicação *offshore*. Os regimes regulatórios de segurança *offshore* para a indústria marítima provêm de várias camadas de regulamentação e supervisão, incluindo a Organização Marítima Internacional (OMI) e a jurisdição local. As equipes técnicas desenvolvem e estabelecem requisitos técnicos para a integridade estrutural e mecânica das estruturas marinhas com base em sua própria experiência. Os códigos e padrões da indústria que fornecem requisitos técnicos também podem ser uma base para a integridade estrutural e mecânica de equipamentos ou componentes específicos além da proteção ambiental. A classificação em função da segurança ocorre da maneira apresentada pela Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma da classificação das etapas para garantia da segurança.



Fonte : Adaptado de PATEL et al., 2011.

Um *FPSO* de GNL que é uma combinação de liquefação, armazenamento e descarga de GNL, foi avaliada pela *ABS* como uma nova tecnologia, em relação aos novos desafios dos requisitos de segurança relativos à integridade dos componentes. A listagem de identificação dos principais riscos envolvidos foram:

- 1) Risco de derramamento do líquido criogênico (GNL),
- 2) Incêndio e explosão relativos ao sistema de armazenamento do GNL;
- 3) Modificação das propriedades dos materiais ao entrarem em contato com o GNL, o que poderá ocasionar a falha de alguns componentes.

Magalhães et al. (2018) apresentou uma análise de risco em estruturas ligadas ao processo de exploração do gás natural liquefeito em plantas FLNG, concluindo que a maioria dos riscos, envolvidos no processo de obtenção do GNL, são gerados pela temperatura criogênica que é um fator determinante na integridade tanto operacional como pessoal de todos os envolvidos. Portanto, é de suma importância o estudo do efeito produzido pela temperatura criogênica nos elementos estruturais envolvidos no processo de obtenção e exploração do GNL.

Como para este estudo os materiais estarão em contato com o líquido criogênico, a primeira etapa consiste em conhecer o efeito da temperatura nas propriedades dos materiais, para entendimento do comportamento estrutural quando ele for submetido a tais condições.

### **2.3 Análise térmica em estruturas *FLNG***

Esta parte da revisão tem como objetivo principal buscar um referencial para os parâmetros físicos a serem utilizados na análise numérica, com o intuito de representar de forma satisfatória a troca de calor entre o fluido e o material, para obtenção do gradiente térmico.

O GNL armazenado tem uma temperatura de aproximadamente  $-160^{\circ}\text{C}$ , que está abaixo da transição frágil para os aços marinhos que compõem os navios-tanque de GNL. Devido à natureza complexa deste tipo de evento, o Escritório de Prestação de Contas do Governo dos EUA (GAO) encomendou um estudo em 2010, que foi desenvolvido por Kalan e Petti (2011) sobre o estado atual do conhecimento dos fenômenos relevantes. Os tipos e métodos de testes realizados para o estudo de danos em cascata de GNL estão diretamente relacionados às informações necessárias e usadas no componente de análise computacional do projeto. O objetivo principal das análises foi fornecer uma avaliação da suscetibilidade dos vasos de GNL à danos e possíveis falhas quando submetidos à derramamentos não intencionais de GNL.

O entendimento dos efeitos térmicos dos vazamentos criogênicos pode ser observado no trabalho experimental desenvolvido por Kalan e Petti (2011).

Analisando os modelos em grande escala, além da realização da caracterização à resposta dos materiais. Uma série de testes de fratura estrutural foi conduzida por Kalan e Petti (2011) para investigar o efeito do gás natural líquido fluindo em estruturas de aço. Esses testes foram projetados para induzir grandes tensões térmicas nas placas de aço, devido à contração térmica diferencial, ao mesmo tempo em que diminuem sua ductilidade. O nitrogênio líquido foi escolhido como fluido criogênico para usar no lugar do GNL por representar uma situação mais crítica ao material (o LN<sub>2</sub> atinge -190°C e o GNL -161°C).

Os testes foram feitos em quatro fases sendo que a fase I foi o estágio exploratório inicial, que forneceu dados preliminares para a resposta do material ao LN<sub>2</sub>. Na fase II, placas maiores foram utilizadas e na fase III, estruturas quadradas de 12 pés, significativamente maiores com geometrias mais complexas, foram testadas. A fase final do teste, Fase IV, investigou as diferenças na taxa de transferência de calor (resfriamento) entre o GNL e o LN<sub>2</sub>. Durante os testes os autores desenvolveram um total de 23 experimentos, onde o nitrogênio líquido a -193 °C foi vazado sobre placas de aço enquanto a temperatura em vários pontos foi monitorada com o uso de termopares (TP) (Figura 7).

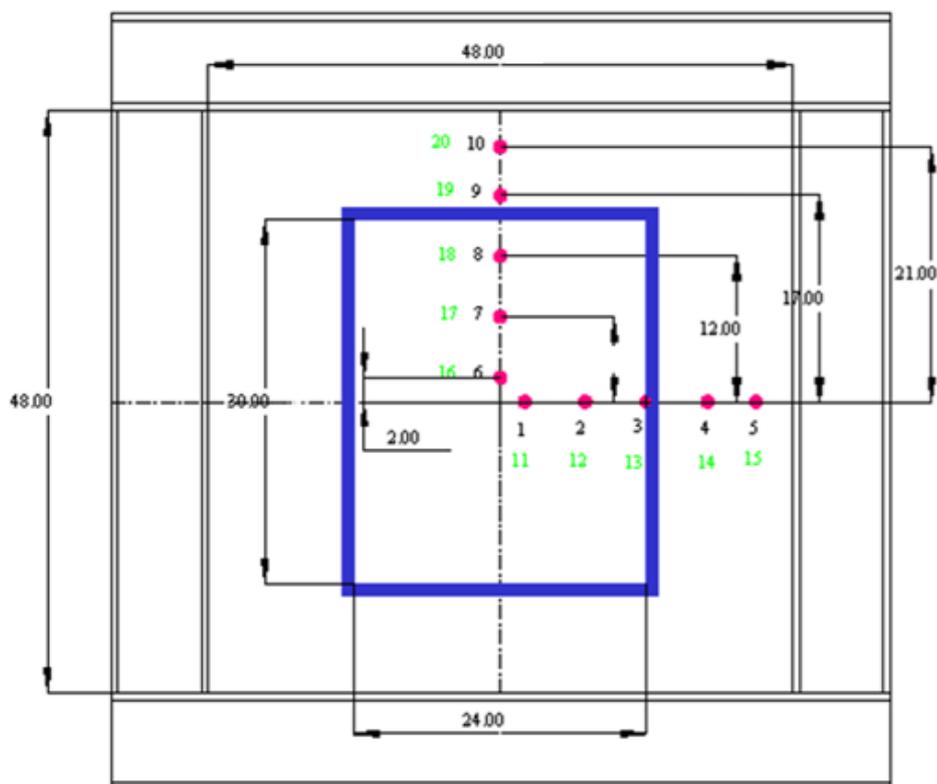
A localização dos termopares é indicada na Figura 8, onde foram medidas as temperaturas na parte superior e inferior da placa. Os termopares denominados TP1 a TP10 são os fixados na superfície superior e os TP11 a TP20 na superfície inferior, utilizados para obtenção do gradiente térmico ao longo da espessura do material.

Figura 7 – Configuração de um teste realizado.



Fonte: KALAN e PETTI, 2011.

Figura 8 – Locação dos termopares.

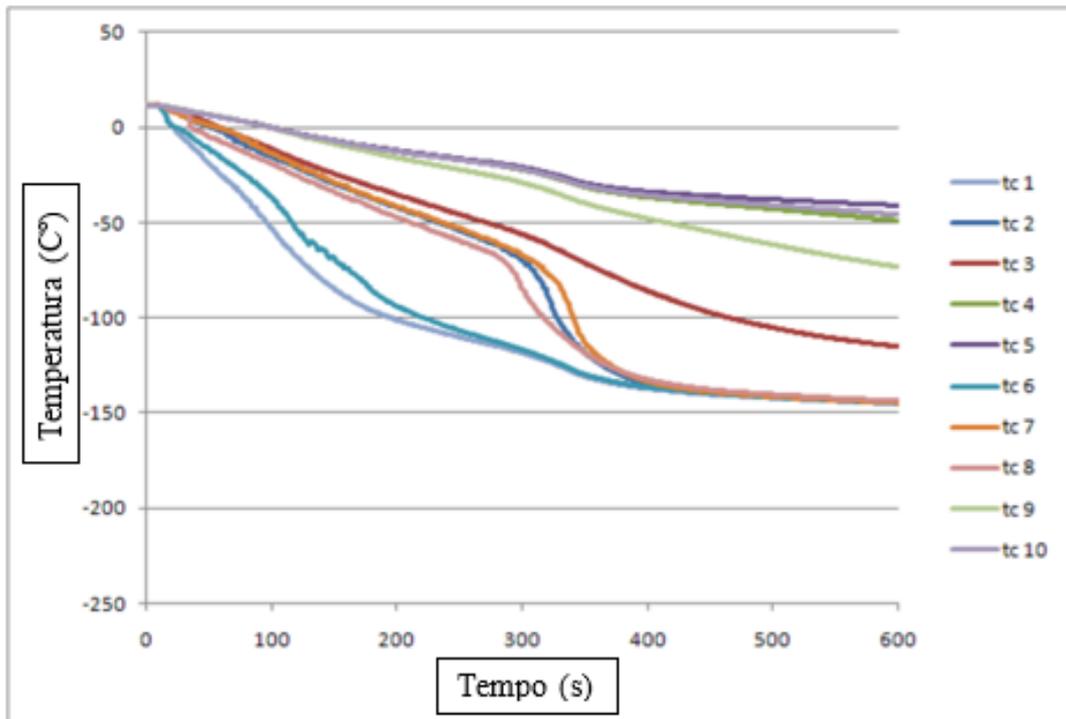


Fonte: KALAN e PETTI, 2011.

Nas Figura 9 e 10 são apresentados os gráficos dos valores da temperatura medidas pelos termopares para um dos testes realizados por Kalan e Petti (2011). Nota-se que a estabilização da temperatura ocorreu aos 500 segundos do teste. A Figura 9 mostra os resultados dos termopares fixados na superfície superior da placa de aço, onde está localizada a região de contenção que estará em contato com o líquido criogênico, e a Figura 10 os termopares na superfície inferior, região oposta a contenção criada para o ensaio experimental.

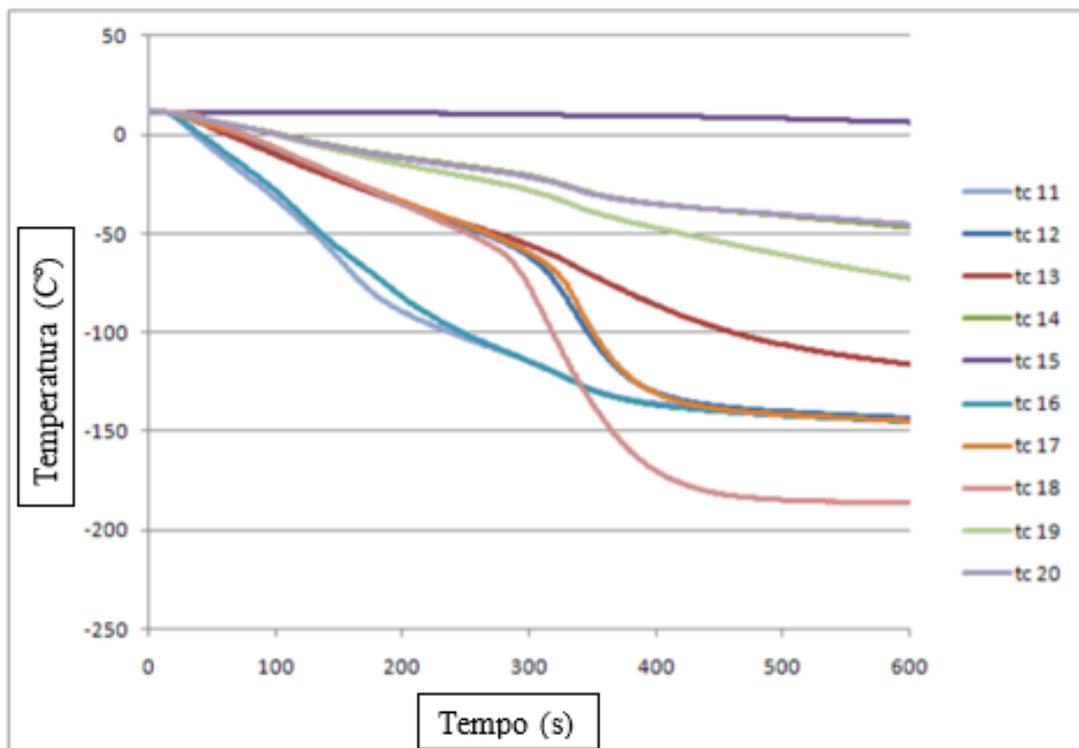
Pela Figura 9 pode-se observar que os termopares que estão fixados dentro da região de contato direto com o líquido criogênico (TP1, TP2, TP3, TP6, TP7 e TP8), mediram uma temperatura de aproximadamente  $-150^{\circ}\text{C}$ , a exceção foi o TP3 que mediu aproximadamente  $-110^{\circ}$ . Essa diferença pode ser explicada ao se observar a Figura 8, onde nota-se que o TP3 está muito próximo da região criada para contenção do líquido, o que pode ter interferido nos valores medidos.

Figura 9 – Gráfico dos valores da temperatura nos termopares TC1 a TC10.



Fonte: adaptado KALAN e PETTI, 2011.

Figura 10 – Gráfico dos valores da temperatura nos termopares TC11 a TC20.



Fonte: adaptado de KALAN e PETTI, 2011.

Diante dos resultados experimentais os autores chegaram à conclusão de que as taxas de resfriamento em seções da chapa de aço marinho dependem de muitos fatores, incluindo o tamanho do elemento, o tamanho da superfície de derramamento, a espessura da placa, o líquido criogênico específico e a presença de um revestimento de superfície.

Não foi encontrado na literatura exemplos de simulação numérica da distribuição de temperatura em um componente devido à uma poça de GNL. Uma maneira simplificada de simular tal efeito seria prescrever a temperatura do gás liquefeito na superfície onde esteja acumulado, mas a sua representatividade não seria adequada uma vez que desta forma não se levaria em conta os efeitos de convecção. Entretanto, para considerar tal efeito, existe a dificuldade em determinar o coeficiente de convecção que deve ser utilizado.

Para a modelagem numérica transiente térmica proposta nesse estudo foi necessária a inserção dos parâmetros referentes às propriedades térmicas do material levando em consideração a sua variação em função da temperatura. Na próxima seção serão apresentados alguns trabalhos que foram realizados, concomitantemente a este, para determinar essas propriedades.

## **2.4 Propriedades térmicas dependentes da temperatura**

### **2.4.1 Condutividade e Capacidade térmica**

Embora existam diversos estudos realizados para determinação das propriedades térmicas em uma variedade de materiais, não foram encontrados trabalhos na literatura sobre o levantamento destes parâmetros para o aço ASTM A131 Gr EH36, material utilizado neste trabalho, uma vez que este material não é utilizado em condições tão severas de temperatura.

O trabalho que será utilizado como principal referência para obtenção da condutividade térmica ( $\lambda$ ) e capacidade de calor volumétrica ( $\rho_{cp}$ ) foi realizado por Vilasboas (2019), onde diferentes fluxos de calor foram aplicados para determinação

de propriedades termofísicas em função da temperatura de materiais metálicos, submetidos à temperaturas criogênicas.

Dois materiais foram utilizados nos experimentos, um fabricado com aço inox AISI 304, e outro de aço carbono ASTM A131 Gr. EH36. Como o experimento proposto nesta dissertação se dará exclusivamente para o material ASTM A131 Gr. EH36, somente estes resultados serão apresentados. A Tabela 1 e 2 apresentam os resultados experimentais da condutividade térmica e da capacidade de calor volumétrica para o aço carbono ASTM A131 Gr. EH36.

Tabela 1 – Resultados experimentais de  $\lambda$  para o aço carbono ASTM A131 Gr. EH36.

Temperatura (K)	Valor otimizado ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Erro Padrão ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
301,207	51,401	0,501
235,076	47,316	0,725
214,689	45,589	0,727
175,079	41,898	1,190
125,930	31,655	0,754

Fonte: VILASBOAS, 2019.

Tabela 2 – Resultados experimentais de  $\rho_{c_p}$  para o aço carbono ASTM A131 Gr. EH36.

Temperatura (K)	Valor otimizado ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ )	Erro Padrão ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ )
301,207	3,790E6	0,014E6
235,076	3,250E6	0,039E6
214,689	3,073E6	0,030E6
175,079	2,801E6	0,037E6
125,930	2.156E6	0.019E6

Fonte: VILASBOAS, 2019.

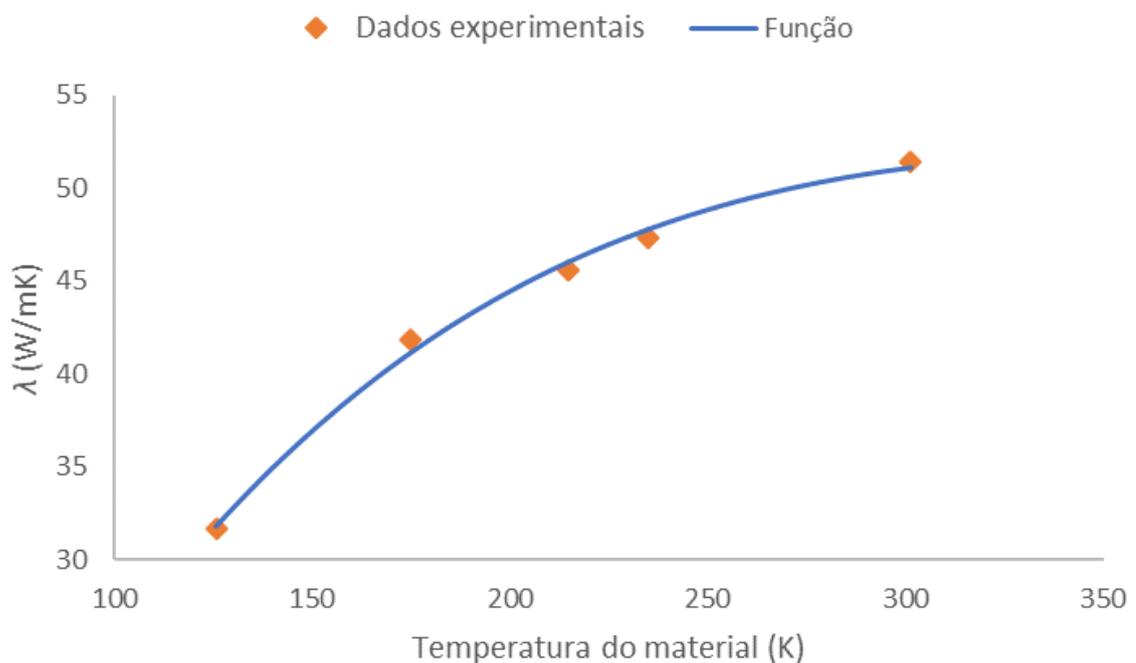
Para cada uma das propriedades foi gerada uma curva de tendência através do método dos mínimos quadrados e respeitando o modelo logarítmico proposto por Marquardt, Le e Radebaugh (2000). As equações estão apresentadas abaixo:

$$\lambda = 10^{(-1.0108 \log_{10} T(K)^2 + 5.1721 \log_{10} T(K) - 4.9013)} \quad (1)$$

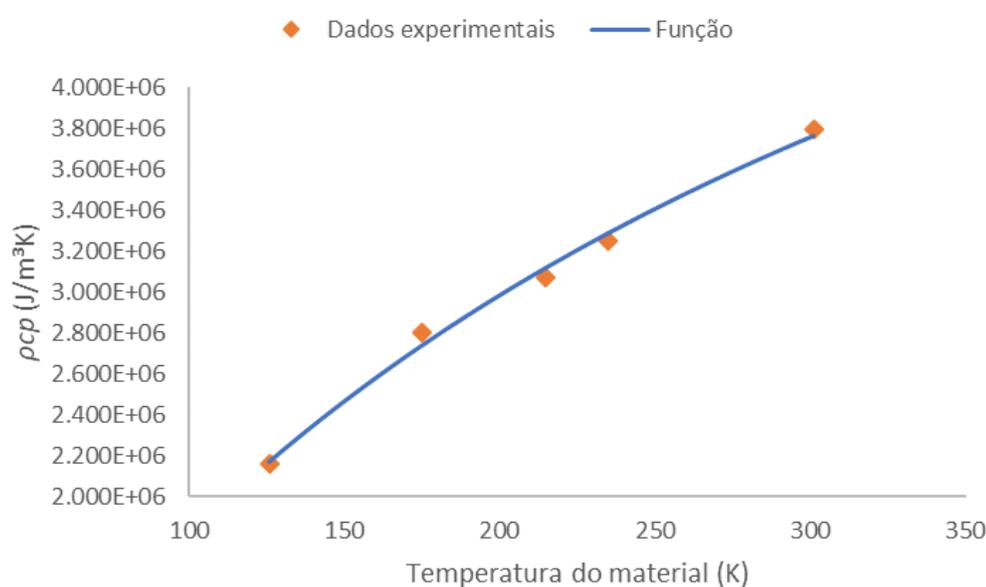
$$\rho_{c_p} = 10^{(-0.3157 \log_{10} T(K)^2 + 2.0771 \log_{10} T(K) + 3.3667)} \quad (2)$$

A Figura 11 e Figura 12 relacionam os dados com os pontos definidos na otimização das Equações 1 e 2

Figura 11 – Ajuste de curva para  $\lambda$  em função da temperatura para aço ASTM A131 Gr. EH36.



Fonte: VILASBOAS, 2019.

Figura 12 – Ajuste de curva de  $\rho c_p$  em função da temperatura para aço ASTM A131 Gr. EH36.

Fonte: VILASBOAS, 2019.

Os resultados apresentados por Vilasboas (2019) demonstram uma curva típica dos materiais metálicos com um comportamento decrescente da propriedade em relação à temperatura. Ao analisar os dados fica notório que a implementação das propriedades constantes na modelagem de derramamento acidental de líquidos criogênicos pode introduzir incertezas nos resultados, pois é evidente a significativa mudança das propriedades com a temperatura.

### 2.4.2 Coeficiente de convecção

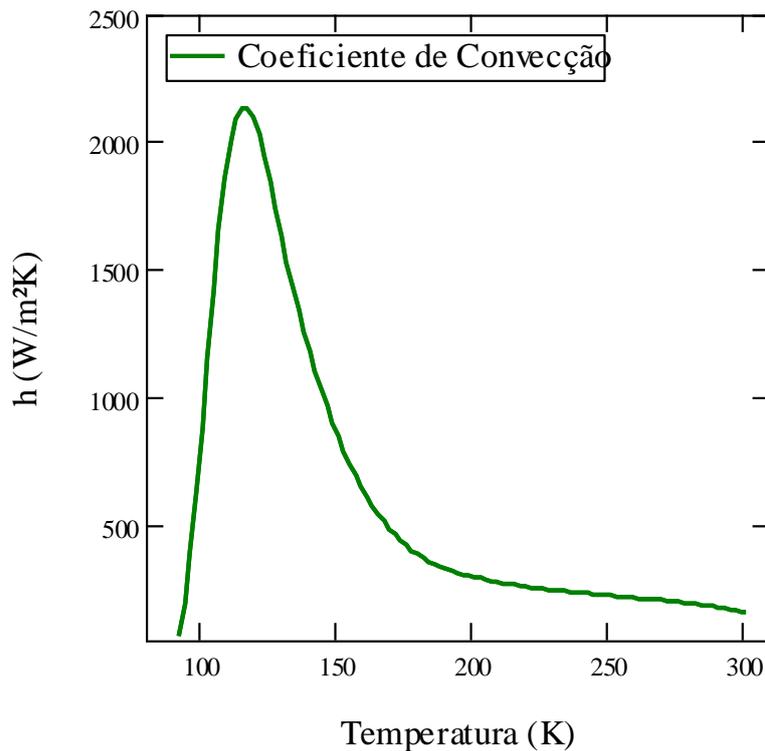
Outra propriedade inserida no modelo numérico para determinação do gradiente térmico da placa de aço utilizada nos ensaios experimentais é o coeficiente de convecção ( $h$ ) entre o nitrogênio líquido e o aço ASTM A131 Gr. EH36.

No trabalho desenvolvido por Silva (2018), levantou-se experimentalmente estes valores. Foram utilizadas duas amostras para a realização dos experimentos, uma em aço naval EH36 e a outra em alumínio 5083.

O coeficiente de convecção foi calculado pelo algoritmo *IHCP* (*Inverse Heat Conduction Problem*) e uma função *OSF* (*Octave Spline Fit*) foi utilizada para ajustar os dados experimentais, relacionando o coeficiente de convecção com a diferença

de temperatura ( $\Delta T$ ) entre a superfície e o nitrogênio líquido. Conseqüentemente, a fim de introduzir estes valores no Abaqus®, o  $\Delta T$  foi adicionado à temperatura do nitrogênio líquido e convertido em um coeficiente de convecção dependente da temperatura da superfície. A Figura 13 apresenta somente as curvas de tendência com os dados obtidos experimentalmente.

Figura 13 – Dados experimentais e curva ajustada.



Fonte: SILVA, 2018

A curva apresentada na Figura 13 demonstra uma tendência típica de fluidos em ebulição. Este mesmo comportamento é demonstrado no trabalho de Jin et al. (2009). No primeiro momento, entre 300 K e 170 K, a camada de nitrogênio gasoso entre o fluido e a superfície de troca atua com um isolamento e o coeficiente de troca tem um comportamento praticamente constante e com um valor baixo. Já entre 170 K e 110 K a película começa a sumir e o valor do coeficiente cresce, atingindo o seu máximo em aproximadamente 110 K. Na parte final do resfriamento o coeficiente de troca fica cada vez menor até atingir o ponto de mínimo.

## **2.5 Modelagem matemática do problema termomecânico linear**

A análise termomecânica desenvolvida neste trabalho, pelo método dos elementos finitos, envolve a inserção das propriedades térmicas dependentes da temperatura que foram descritas na seção 2.4. Nesta seção, o aspecto mecânico do problema também será abordado, a fim de investigar como a carga térmica afeta o comportamento mecânico da chapa de aço. Muitas das conclusões e dos resultados da análise térmica anterior deverão ser levados em consideração no desenvolvimento do modelo termomecânico.

A teoria clássica de termoelasticidade, inicialmente formulado por Duhamel em 1937 e posteriormente concluída por Neumann em 1885, tem o objetivo de encontrar os campos de deslocamentos e tensões de um sólido provocado pela distribuição temperatura. A análise termomecânica desenvolvida neste trabalho, via método dos elementos finitos, envolve a utilização das propriedades térmicas dependentes da temperatura que foram descritas na seção 2.4. Nesta seção, a modelagem matemática dos problemas acoplados a apresentada, de forma que a interação entre os problemas de evolução de calor e de elastoestática linear é explicitada, tornando evidente que o acoplamento é unidirecional. Ou seja, a carga térmica afeta o comportamento mecânico, mas não o contrário, permitindo investigar com mais facilidade como a carga térmica afeta o comportamento mecânico da chapa de aço. Muitas das conclusões e dos resultados da análise térmica anterior deverão ser levados em consideração no desenvolvimento do modelo termomecânico. Conforme comportamentos, os problemas podem ser resolvidos em sequência, desacoplando os comportamentos físicos térmicos e mecânicos. Nessa direção pode-se seguir a estratégia de Kodur e Dwaikat (2009) que realizaram estudos numéricos termomecânicos em vigas e colunas submetidas às cargas térmicas e mecânicas em duas etapas distintas: Primeiro resolveu o problema térmico e segundo, usando a carga térmica calculada, resolveu o problema mecânico. Os resultados da primeira etapa foram armazenados e prescritos como condição de contorno da etapa seguinte pelos perfis de temperatura versus tempo.

De outra forma, Jeffers e Sotelino (2011) desenvolveram uma metodologia, denominada acoplada, para análise termomecânica de elementos estruturais com o auxílio do programa comercial Abaqus®, quando o comportamento térmico afeta o mecânico e o comportamento mecânico afeta o térmico reciprocamente. Com isso o processo de solução deve ser realizado simultaneamente, requerendo a existência de elementos finitos com graus de liberdade de temperatura e deslocamento no modelo para a formulação primal. Esse tipo de análise é obrigatória quando o comportamento mecânico possui fratura, dano, plasticidade, dentre outros, os quais são processos irreversíveis que geram calor, afetando, assim, o problema térmico. Para o caso do acoplamento unidirecional a estratégia pode ser adotada, mas seu uso não é obrigatório.

A modelagem matemática do problema termomecânico acoplado é obtida a partir das leis de conservação de massa, momento linear e energia, além das equações constitutivas. Nesse sentido, dado um corpo sólido que ocupa o domínio  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$  com contorno  $\Gamma$ , o problema é dado como:

Problema Termomecânico Quase-estático: Encontrar o campo vetorial de deslocamentos  $u(x_1, x_2, x_3, t)$ , juntamente com os campos tensoriais de tensão  $\sigma(x_1, x_2, x_3, t)$  e deformação  $\varepsilon(x_1, x_2, x_3, t)$ , e o campo escalar de temperatura  $\theta(x_1, x_2, x_3, t)$ , juntamente com o campo vetorial de fluxo de calor  $q(x_1, x_2, x_3, t)$ , tal que:

$$\frac{\partial \sigma_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{i3}}{\partial x_3} + f_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \text{ em } \Omega \times (0, T] \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda_{\varepsilon_{kk}} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \beta (\theta - \theta_0) \delta_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3 \text{ em } \Omega \times (0, T] \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right\} \quad i, j = 1, 2, 3 \text{ em } \Omega \times (0, T] \quad (5)$$

E adicionalmente as condições de contorno prescritas de deslocamento e carga distribuída:

$$u = g \text{ em } \Gamma_D \times (0, T], \quad (6)$$

e:

$$t = \sigma n = h \text{ em } \Gamma_N \times (0, T] \quad (7)$$

$$\text{com } \Gamma = \Gamma_D \cup \Gamma_N \text{ e } \Gamma_D \cap \Gamma_N = \emptyset \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial x_3} \right) + Q = \rho C_v \text{ em } \Omega \times (0, T] \quad (9)$$

$$q = -k\nabla\theta \text{ em } \Omega \times (0, T], \quad (10)$$

E as condições de contorno e iniciais do problema de calor, dadas por:

$$\theta = \gamma \text{ em } \Gamma_\theta \quad (11)$$

$$q = -k\nabla\theta = r \text{ em } \Gamma_q \quad (12)$$

$$ak\nabla\theta + b\theta = c \text{ em } \Gamma_r \quad (13)$$

$$\theta_0 = \varphi \text{ em } \Omega \times t = 0 \quad (14)$$

Com  $\Gamma = \Gamma_\theta \cup \Gamma_q \cup \Gamma_r$  e  $\Gamma_\theta \cap \Gamma_q \cap \Gamma_r = \emptyset$ , onde,  $f = \{f_1 \ f_2 \ f_3\}^T$  é o vetor força de corpo;  $\rho$  e  $C_v$  são a massa específica e o calor específico a volume constante do material;  $\lambda = \nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$  e  $\mu = E / 2(1 + \nu)$  são os coeficientes de Lamé, propriedades mecânicas do material,  $E$  e  $\nu$  são o módulo de elasticidade longitudinal e coeficiente de Poisson, respectivamente;  $\beta = \alpha E / (1 - 2\nu)$  é a propriedade do material associada à tensão térmica por unidade de temperatura, e  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear;  $\theta_0$  é a temperatura de referência inicial;  $k$  é a condutividade térmica isotrópica do material e  $Q$  a fonte ou sumidouro de calor por unidade de volume. Vale salientar que as propriedades de material são todas dependentes da temperatura, tornando o problema não-linear.

# Capítulo 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

---

### 3.1 Introdução

Pode-se observar, através dos trabalhos citados anteriormente, que para a determinação do gradiente térmico e das tensões induzidas na chapa de aço devido ao vazamento de um líquido criogênico, exige-se o conhecimento de diversos fatores que influenciam diretamente nos resultados. Serão apresentados a seguir a metodologia para realização dos ensaios experimentais bem como os materiais utilizados.

### 3.2 Metodologia da análise

Primeiramente é necessária uma melhor compreensão do problema em questão. Pretende-se identificar o gradiente de temperatura provocado pelo contato do GNL na superfície de uma estrutura do sistema FLNG e as correspondentes tensões térmicas, considerando uma placa como uma porção da estrutura.

Para melhor entendimento da metodologia do trabalho, ela foi dividida em três fases. Muitas das informações necessárias para esta etapa foram obtidas no trabalho de Kalan e Petti (2011), porém alguns aspectos não descritos pelos autores foram discutidos e soluções propostas.

Na primeira fase da metodologia desenvolveu-se o projeto e a montagem do sistema de ensaios para realização dos experimentos. A estrutura do sistema de ensaios foi composta de equipamentos para aquisição de dados, medição dos valores de temperatura (termopares) e deformações (extensômetros), além de instrumentos para controle e segurança do processo experimental. Também nesta etapa foi projetado o dispositivo de armazenamento do fluido refrigerante enquanto este é depositado sobre a placa (utilizou-se uma caixa fabricada em poliuretano, conforme sugerido por Kalan e Petti (2011)). O passo seguinte foi a montagem dos componentes para realização dos testes. Neste caso, foi utilizado inicialmente, como fluido refrigerante, uma mistura de álcool etílico e gelo seco apenas para testar o funcionamento dos termopares e extensômetros instalados na placa.

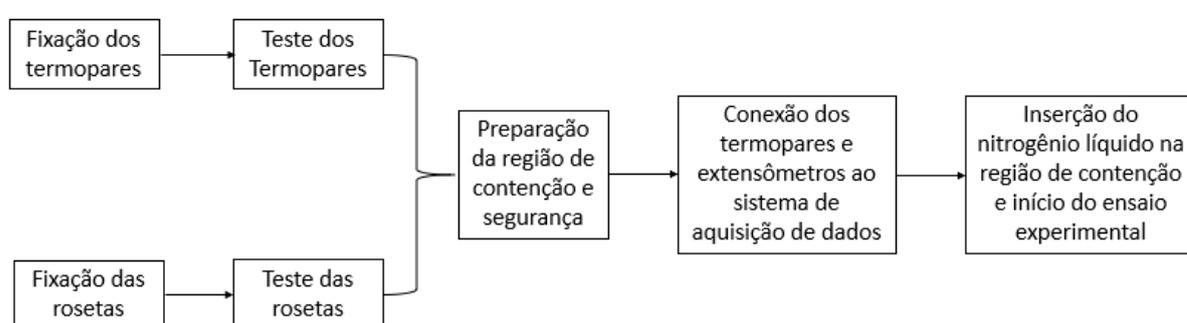
Na segunda fase foi realizada uma análise numérica preliminar para obtenção de uma estimativa do gradiente térmico na placa de aço, embora ainda seja uma análise sem a inserção de todas as propriedades necessárias para a representatividade do estudo, ela serviu como base para estimar a temperatura na região onde estarão fixadas as rosetas, pois ela influencia diretamente no tipo de fixação a ser utilizada nos extensômetros.

Uma vez concluído o projeto do sistema de ensaios e as análises numéricas iniciais, foram realizados ensaios para levantamento dos dados experimentais. O ensaio experimental foi executado com uma placa de dimensões 600mmx400mmx25,4mm, fabricada com aço-carbono ASTM A131 Gr. EH36. Durante o ensaio, uma cápsula contendo o fluido criogênico foi posicionada para simular um vazamento causando um gradiente térmico na estrutura.

No experimento foi utilizado o  $NL_2$  como líquido criogênico, para simular o GNL, buscando uma melhor segurança durante o ensaio, uma vez que ele representa de forma satisfatória as temperaturas atingidas pelo GNL, conforme pode-se observar no estudo desenvolvido por Kalan e Petti (2011).

A placa foi montada no sistema de ensaios com os termopares e extensômetros devidamente posicionados. Em seguida inseriu-se o fluido criogênico no dispositivo de armazenamento enquanto a temperatura dos pontos é registrada. O nível de fluido criogênico foi ser mantido de forma que toda a superfície da poça esteja coberta durante o ensaio. A Figura 14 apresenta um fluxograma da metodologia utilizada na segunda fase do trabalho.

Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Autor. Inserção

Após a realização do ensaio, os dados de leitura dos extensômetros e termopares foram tratados e apresentados graficamente de forma que a sua consistência possa ser avaliada.

A última fase da metodologia consistiu na simulação numérica dos experimentos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o programa ABAQUS®. As simulações numéricas realizadas inicialmente, na segunda fase, foram repetidas empregando modelos mais apurados. Desta forma, foram feitas simulações numéricas da refrigeração da placa ensaiada, considerando os efeitos de convecção e condução térmica. Não considerou-se o vazamento do fluido criogênico, sendo que a troca de calor entre o fluido e a placa simulada por convecção. Também se desenvolveu as análises termomecânicas para determinar as tensões na placa devido ao gradiente térmico.

Por fim, comparou-se os valores calculados pela análise numérica aos resultados do ensaio experimental para validação do modelo, ou seja, se o comportamento real (experimental) pode ser representado pelo modelo numérico proposto nesse estudo.

### 3.3 Materiais utilizados

As propriedades do material são de fundamental importância para uma correta representatividade do estudo, por isso é necessário buscá-las em fontes confiáveis ou, quando possível, realizar ensaios para obtê-las. Nesse trabalho o material analisado foi uma placa de aço ASTM A131 GR. EH36.

Foi realizada a sua caracterização no laboratório do SENAI-CIMATEC localizado na cidade de Salvador/Ba por Silva (2018). A sua composição química é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – 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

Fonte: Autor.

Para a medida dos termopares foram utilizados termopares do tipo T (Cobre-Constantan). Este tipo de termopar é sugerido em função das temperaturas criogênicas que a estrutura será submetida durante os ensaios experimentais. Utilizou-se duas rosetas à 45° fixados em lados opostos da poça de contenção criada além do sistema de aquisição de dados ADS2000 (Figura 15) além do programa AqDados® para tratamento dos resultados experimentais.

Figura 15 – Sistema de aquisição Lynx® ADS2000.

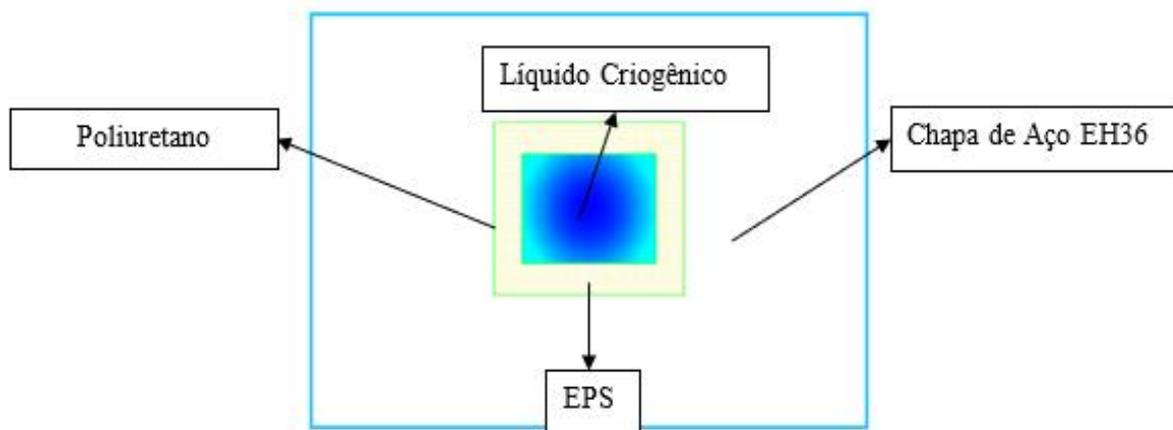


Fonte: Autor.

### 3.4 Procedimento de ensaio

O primeiro aspecto relevante para realização dos ensaios experimentais foi o desenvolvimento da região de contenção da poça, que restringiu a região de contato do líquido criogênico com a chapa de aço. O material para fixá-lo na chapa teve que ser resistente às baixas temperaturas ( $-190^{\circ}$ ). Tentou-se inicialmente um isolamento de silicone e polietileno para a região da poça, mas não se obteve sucesso, pois ao entrar em contato com a temperatura criogênica o material falhou. Com isso outra solução foi a utilização do poliuretano (espuma expansiva) e poliestireno (EPS). Após os testes verificou-se que estes materiais atenderam aos requisitos de isolamento e segurança do experimento. A Figura 16 apresenta um desenho esquemático do aparato desenvolvido para isolamento da superfície de contato do  $\text{LN}_2$  com a chapa de aço.

Figura 16 – Aparato de isolamento da região de contato do líquido criogênico e a chapa.



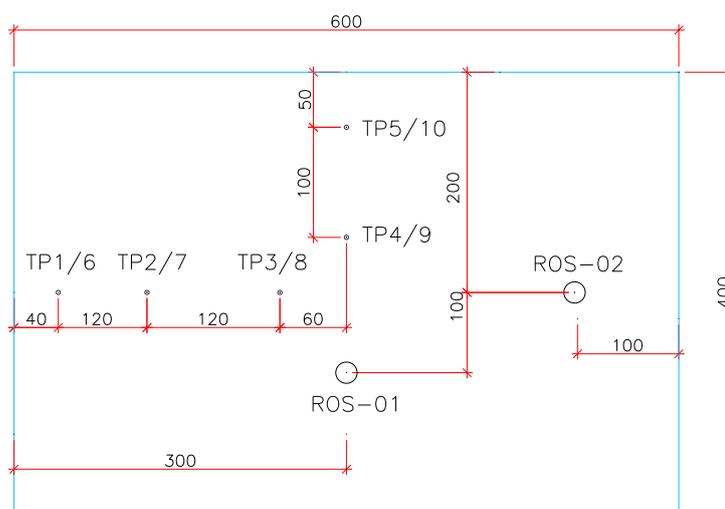
Fonte: Autor.

Os termopares também foram testados em relação a sua fixação e influência nas medições. O primeiro procedimento foi a realização de uma solda capacitiva, posteriormente foi realizada outro tipo de solda, a 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. Chegou-se à conclusão de que a variação entre os valores medidos foi pequena, logo adotou-

se a solda de estanho. A disposição dos termopares ao longo da placa foi definida baseado no trabalho de Kalan e Petti (2011).

Nas superfícies superior e inferior da placa foram fixados, através de soldas, dez termopares do tipo T (Cobre-Constantan). Este tipo de termopar foi escolhido em função das temperaturas criogênicas que foram submetidos durante os ensaios experimentais. Dois termopares (TP) foram fixados, para cada região, nas partes superior e inferior da placa, por exemplo, o termopar TP1 se encontra na superfície superior da placa e o TP6 na mesma posição, porém na superfície inferior. Esses termopares possibilitaram a determinação do gradiente de temperatura ao longo da espessura. Em seguida foram instaladas duas rosetas para medição das deformações durante o experimento. As denominações ROS-01 e ROS-02 são referentes às rosetas instaladas para obtenção das tensões térmicas. A Figura 17 ilustra a locação dos termopares e extensômetros fixados no corpo de prova.

Figura 17 – Locações dos termopares e extensômetros (medidas em mm).



Fonte: Autor.

Na Figura 18 pode-se observar a placa instrumentada para realização dos ensaios. A fixação dos 10 termopares e duas rosetas são mostradas. Vale destacar que os termopares que ficaram em contato direto com o líquido criogênico, TP3 e TP4 (como indicados na Figura 17), foram isolados para impedir possíveis interferências que o contato do fio com as baixas temperaturas do líquido poderia causar.

Figura 18 – Chapa de aço após instalação dos termopares e rosetas.



Fonte: Autor.

Existem diversos procedimentos para fixação dos extensômetros na chapa de aço, um dos mais usuais é o por colagem. Uma grande variedade de colas pode ser utilizada, mas neste trabalho foi empregada a LOCTITE 496. A escolha do tipo de cola varia em função da sua característica, tais como: Pressão por colagem, condição de endurecimento, faixa de temperatura de operação e condição de estocagem. A Tabela 4 resume essas características da cola LOCTITE 496.

Tabela 4 – Características da cola Loctite 496.

Característica	
Pressão por Colagem	0,1 a 1 kgf/cm <sup>2</sup>
Condição de endurecimento	5 a 20 segundos
Faixa de temperatura	-40°C a 80° C
Condição de estocagem	Não expor diretamente a luz

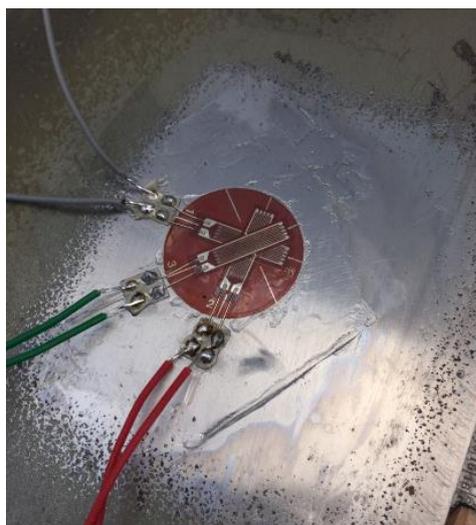
Fonte: COWDREY et. al, 1995.

Para fixar o extensômetro no corpo de provas, aplicou-se a cola na área de colagem do próprio corpo de prova, e então ele é colocado na posição requerida, permitindo o endurecimento da cola com uma pressão aplicada no conjunto. O tempo de cura da cola foi em média 10 segundos, conforme pode ser observado nas especificações da Tabela 4.

Para garantia da utilização na faixa de temperatura da cola foram realizadas análises numéricas para estimar a temperatura na região onde eles foram fixados. Durante os primeiros ensaios experimentais também foram utilizados termopares em regiões próximas da fixação para garantir que esses limites não sejam atingidos e comprometam a eficiência da cola.

Na Figura 19 é possível observar em detalhe o acabamento para fixação das rosetas utilizadas nos ensaios experimentais.

Figura 19 – Detalhe da fixação das rosetas

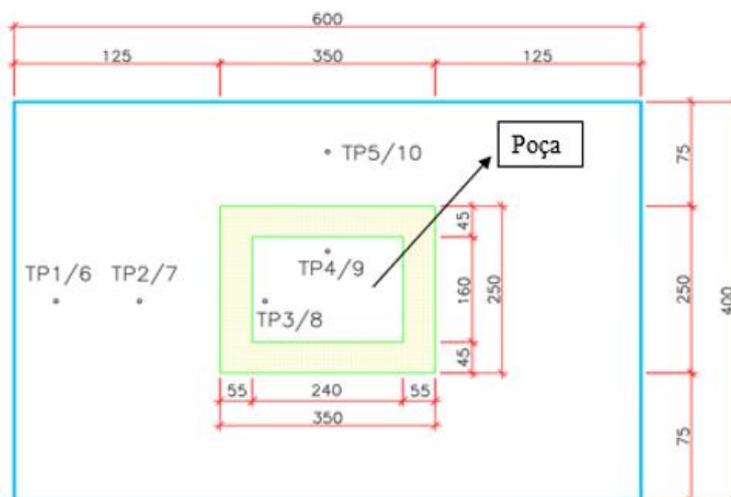


Fonte: Autor.

Após a soldagem dos fios nos extensômetros a tensão foi aferida para verificação de fuga de tensão, ou seja, para comprovação de que os extensômetros foram fixados de maneira correta.

Utilizou-se uma caixa de EPS para possibilitar a aplicação do fluido criogênico na região central da placa, onde foi derramado o nitrogênio líquido (LN<sub>2</sub>) para aferição dos dados experimentais. A contenção da região na superfície de contato do LN<sub>2</sub> com a placa possui dimensões internas de 240x160 mm, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20– Região da poça para o contato do líquido criogênico (medidas em mm).



Fonte: Autor.

Na Figura 21 é apresentada uma foto do aparato utilizado no ensaio, com destaque para a caixa de contenção do fluido criogênico, o posicionamento dos termopares e a utilização de 3 suportes metálicos para garantir o nível da chapa de aço no momento dos ensaios experimentais. Na região de contenção foi utilizada uma caixa maior de EPS para a segurança dos ensaios experimentais, caso ocorresse uma falha na parte de contenção do líquido criogênico.

Figura 21 – Aparato experimental para realização dos testes.

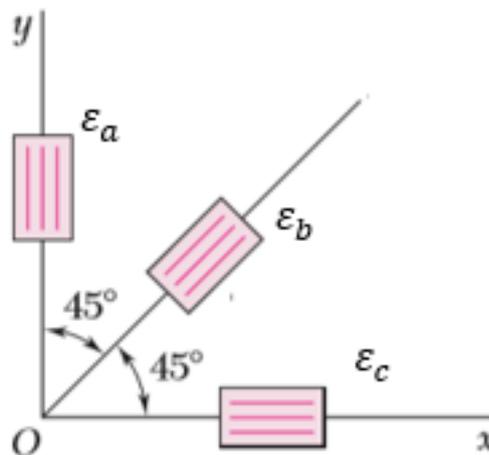


Fonte: Autor.

Um dos objetivos do trabalho é determinar as tensões térmicas induzidas pelo líquido criogênico na chapa de aço. Para isso se fez necessário medir a deformação

em pelo menos três diferentes direções  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ , e  $\varepsilon_c$  (Figura 22). Essas medidas correspondem às deformações nas direções das grades de medição do extensômetro que pode ser observado na Figura 19.

Figura 22 –Roseta de 45° utilizada no experimento.



Fonte: Autor.

Os valores das tensões foram calculados utilizando as relações entre as propriedades do material e os valores das deformações medidos pelos extensômetros, de acordo com a Equação (19) e (20). E Equação (15) relaciona as deformações medidas com o ângulo  $\theta$ .

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (15)$$

Onde  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , e  $\gamma_{xy}$  são as deformações calculadas pelas (Equações (16), (17) e (18)). Que são determinadas através das Equações (16), (17) e (18).

$$\varepsilon_a = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_1 \quad (16)$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_2 \quad (17)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_3 \quad (18)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} + [\sigma_x - \nu \sigma_y] + \alpha \Delta T \quad (19)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} + [\sigma_y - \nu \sigma_x] + \alpha \Delta T \quad (20)$$

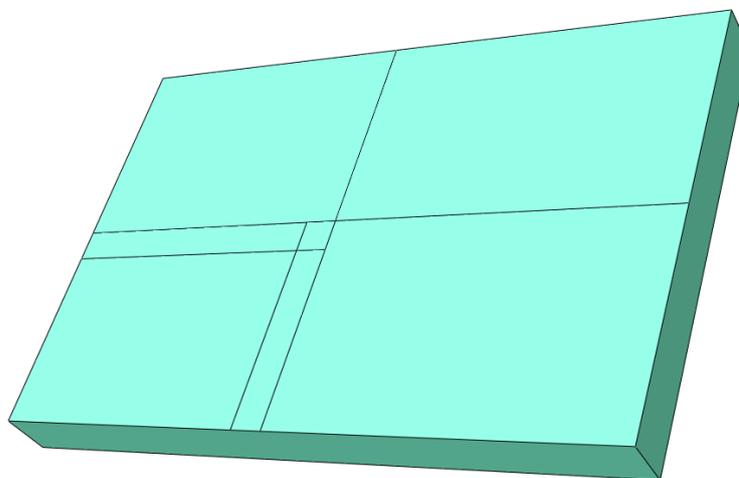
Onde  $E$  representa o módulo de deformação longitudinal,  $\nu$  o coeficiente de Poisson,  $\alpha$  o coeficiente de dilatação térmica e  $\Delta T$  a variação de temperatura.

### 3.5 Modelo numérico

Foram realizadas análises numéricas termomecânicas, utilizando o Método dos Elementos Finitos, para simular o ensaio experimental. Com as dimensões estabelecidas do corpo de provas (Figura 17) para os experimentos, utilizado para validação do modelo numérico, procedeu-se com a modelagem computacional.

Devido à simetria, apenas  $\frac{1}{4}$  do componente foi modelado (Figura 23). O tempo de análise foi estipulado em 800 segundos, tempo necessário para equalização da temperatura, medida pelos termopares durante o ensaio experimental.

Figura 23 – Geometria utilizada na análise numérica



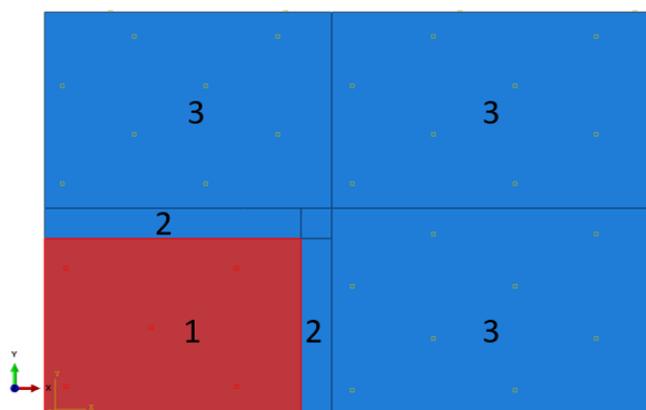
Fonte: Autor.

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 que foi utilizada na análise numérica foi determinado por Silva (2018). A

condutividade térmica ( $\lambda$ ) e capacidade de calor volumétrica ( $\rho_{cp}$ ) foram determinadas por Vilasboas (2019). No programa foram inseridos os valores desses coeficientes considerando a dependência com a variação da temperatura

O modelo proposto e ilustrado na Figura 24 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 (2018), e na zona que não estará em contato direto com o LN<sub>2</sub> (Superfície 3) o  $h = 30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , representando a convecção não forçada com o meio ambiente. A análise foi feita seguindo o mesmo procedimento realizado no ensaio experimental. A temperatura inicial da análise foi 298,15 K (média das temperaturas dos termopares aferidas no início do ensaio experimental).

Figura 24 – Regiões para aplicação do coeficiente de convecção.



Fonte: Autor.

Para obtenção das tensões térmicas induzidas no modelo numérico foi necessário a inserção das propriedades mecânicas dos materiais. A Tabela 5 mostra todas as propriedades inseridas. Como não foram encontradas na literatura as propriedades mecânicas variando com as temperaturas criogênicas, para o aço ASMT A131 Gr. EH36, que a chapa será submetida, a priori foi considerado no modelo

numérico essas propriedades constantes, verificando a posteriori que o resultado apresentou uma boa conformidade com os resultados experimentais.

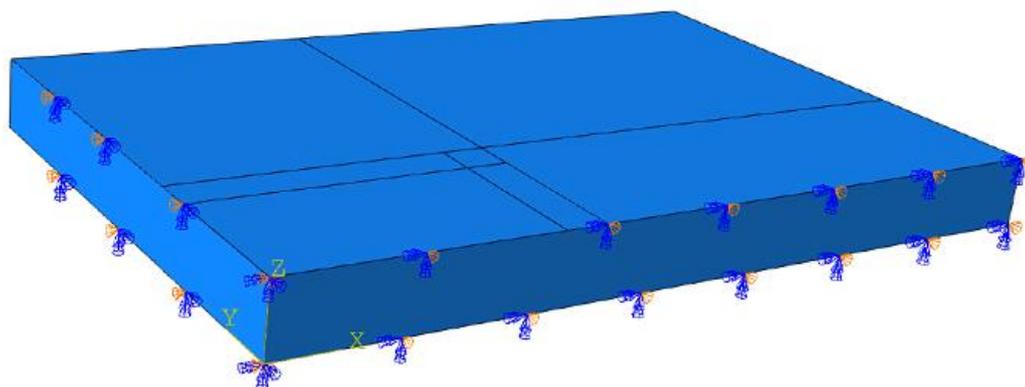
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do material ASTM A131 Gr. EH36

Propriedade	Valor
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	7850
Módulo de deformação longitudinal (GPa)	205
Coefficiente de Poisson	0,27

Fonte: Matweb (2019).

Como a chapa foi modelada considerando a sua simetria, ou seja, com apenas  $\frac{1}{4}$  do seu comprimento real, as faces que ficaram “seccionadas” foram restringidas para representar as condições de simetria do problema. A Figura 25 mostra a restrição que servirá também para obtenção das tensões térmicas induzidas que surgirão devido ao gradiente de temperatura.

Figura 25 – Restrição de deslocamento do modelo numérico

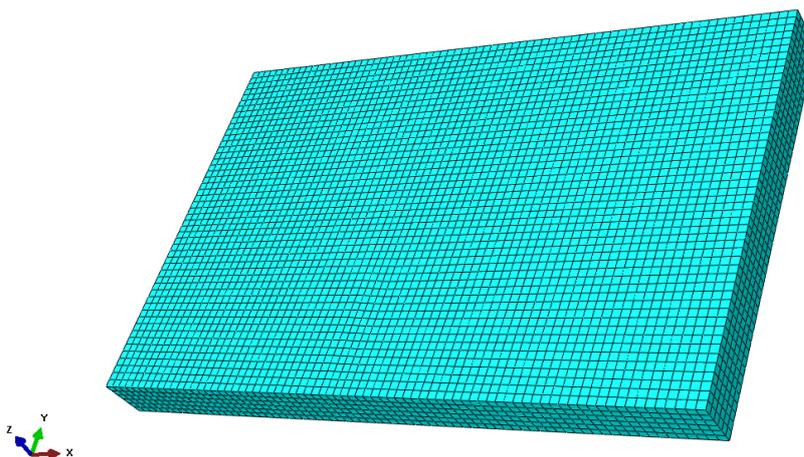


Fonte: Autor.

Como o modelo possui uma geometria aproximadamente uniforme, não foi necessário realizar o refino da malha em nenhuma região, por isso foi considerada uma densidade de malha constante ao longo de toda a placa. A malha do modelo

numérico, apresentada na Figura 26, foi utilizada para o processamento dos resultados e definida após as análises para verificação de sua convergência e influência nos resultados numéricos, utilizando elementos acoplados de temperatura e deslocamento (3D).

Figura 26 – Malha utilizada no modelo.



. Fonte: Autor.

Foram utilizados elementos do tipo sólido, pois um dos objetivos do trabalho era avaliar o gradiente térmico ao longo da espessura da chapa de aço ASTM A131 Gr. EH 36. Após a criação da malha com densidade constante ao longo de todo elemento foram gerados 9760 elementos hexaédricos. Os elementos na região dos pontos de fixação dos termopares e extensômetros foram identificados, para que os resultados do modelo numérico pudessem ser comparados aos do ensaio experimental.

Utilizou-se uma análise acoplada dos efeitos térmicos e mecânicos. Após a realização das análises foram gerados os valores dos perfis de temperatura nos pontos onde termopares foram soldados e os valores das tensões térmicas induzidas pelo gradiente térmico.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos valores de temperatura, medidos pelos termopares, e as tensões térmicas induzidas na chapa de aço ASMT A131 Gr. EH36, devido ao gradiente térmico gerado pelo contato de um líquido criogênico (LN<sub>2</sub>) no ensaio experimental, além dos resultados para o gradiente térmico e tensões induzidas calculadas pelo modelo numérico. Esses valores serão comparados, para verificação da sua representatividade. Com isso, pretende-se analisar a confiabilidade do modelo numérico em relação ao fenômeno físico estudado.

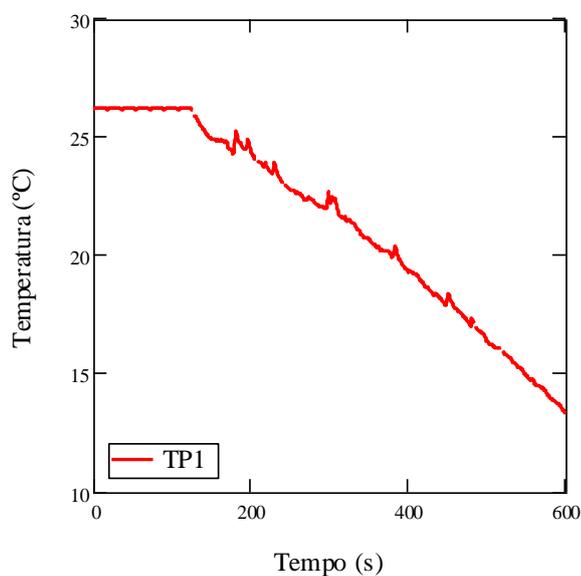
### 4.2 Resultados dos ensaios experimentais

Nesta seção serão descritos os resultados do ensaio experimental para avaliação do gradiente de temperatura (Seção 4.2.1) e tensão térmica (Seção 4.2.2) induzida na chapa de aço ASMT A131 Gr. EH36. Os experimentos seguiram a metodologia apresentada no Capítulo 3 e o objetivo principal é a validação do modelo numérico proposto neste estudo.

### 4.2.1 Resultado Experimental de Temperatura

Os gráficos das Figura 27 e Figura 28 mostram os resultados de temperatura na chapa medida pelos termopares TP1 e TP2, respectivamente. Ambos os termopares estão fixados na superfície superior da placa, sendo o TP1 o mais distante do centro da caixa utilizada para contenção do contato do líquido criogênico com o aço, conforme Figura 26.

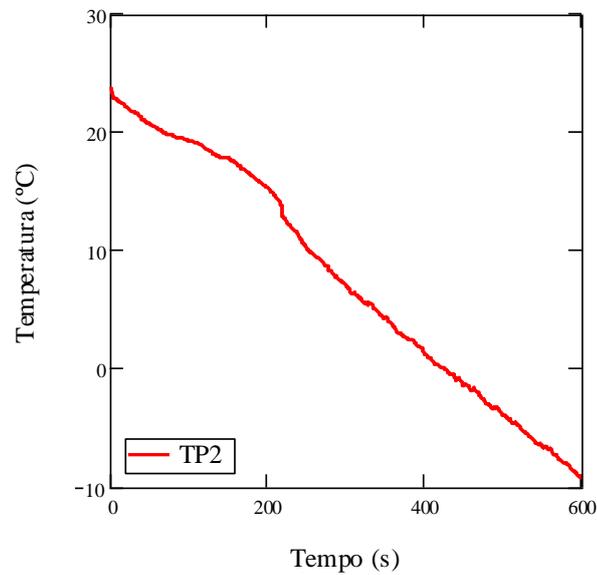
Figura 27 – Resultado experimental do TP1.



Fonte: Autor.

Vale destacar que o valor de temperatura medido pelo TP1 se manteve constante durante um período de tempo e logo depois houve uma variação com o comportamento aproximadamente linear até o valor de aproximadamente 13°C, atingida ao final do ensaio experimental.

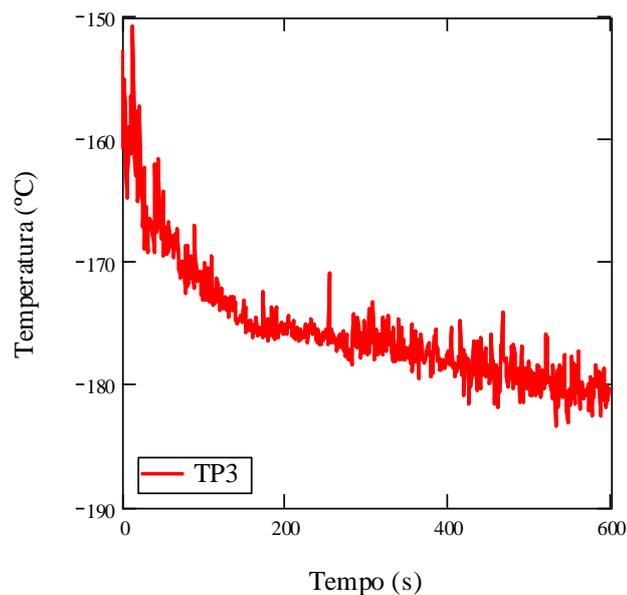
Figura 28 – Resultado experimental do TP2.



Fonte: Autor.

O TP2 se encontra fixado mais próximo da região de contenção, por isso o início da queda de temperatura nesse ponto foi anterior a do termopar TP1. A temperatura final de que chegou a  $-10^{\circ}\text{C}$  no final do ensaio experimental. A Figura 29 apresenta o resultado experimental de temperatura do TP3, que é o termopar instalado dentro da poça, ou seja, está em contato direto com o LN.

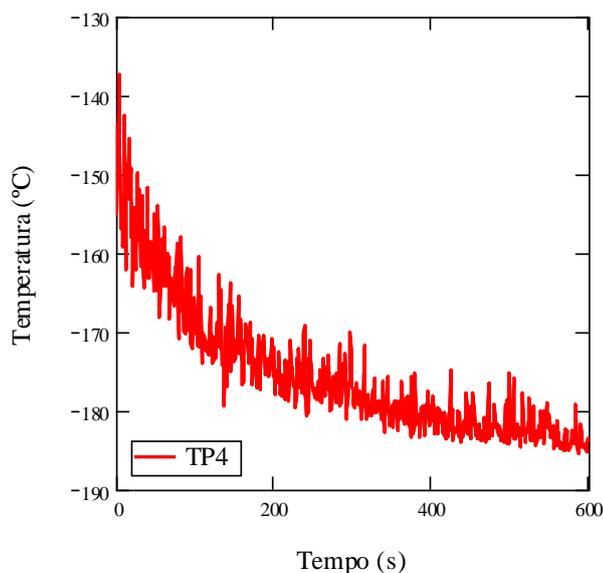
Figura 29 – Resultado experimental do TP3.



Fonte: Autor.

A Figura 30 mostra os resultados experimentais do TP4 que também está fixado na região de contato direto com o líquido criogênico. Pode-se notar que este ponto atingiu, durante o experimento, uma temperatura abaixo de  $-180^{\circ}\text{C}$ , sendo bem representativo para as condições propostas neste trabalho.

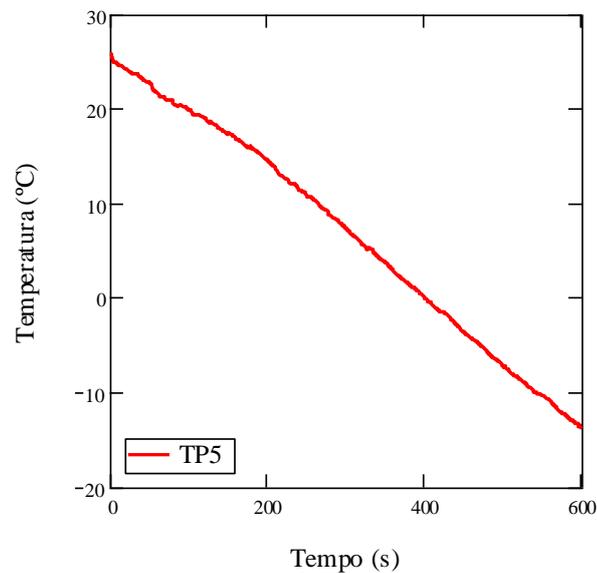
Figura 30 – Resultado experimental do TP4.



Fonte: Autor.

A Figura 31 apresenta os resultados experimentais do perfil de temperatura medido pelo termopar TP5. O seu comportamento é bem similar ao TP2, isso se explica pelo fato de estarem aproximadamente na mesma distância da região de contenção, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 31 – Resultado experimental do TP5

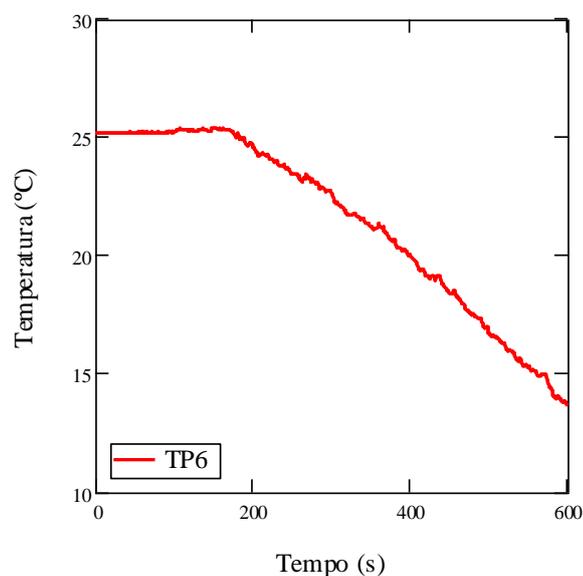


Fonte: Autor.

Como um dos objetivos do trabalho é avaliar o gradiente térmico ao longo da espessura da chapa de aço, foram fixados termopares com a mesma distância em relação ao centro da placa, mas em extremidades opostas (nas superfícies superior e inferior). Esses termopares são TP6, TP7, TP8, TP9 e TP10 que são opostos aos TP1, TP2, TP3, TP4 e TP5, respectivamente.

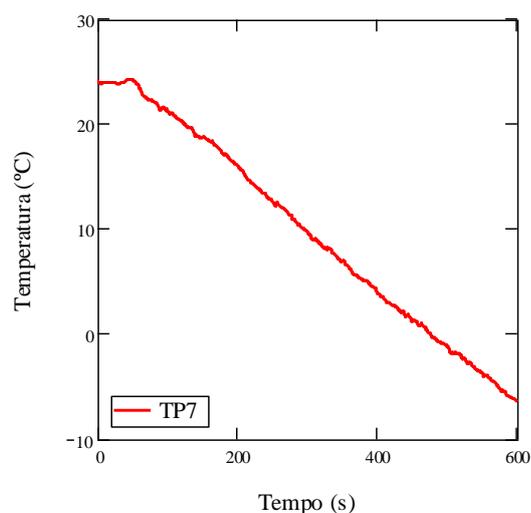
A Figura 32 e a Figura 33 apresentam os resultados experimentais dos valores de temperatura durante os testes dos termopares TP6 e TP7, fixados na superfície inferior da placa e que são opostos ao TP1 e TP2.

Figura 32 – Resultado experimental do TP6.



Fonte: Autor.

Figura 33 – Resultado experimental do TP7.

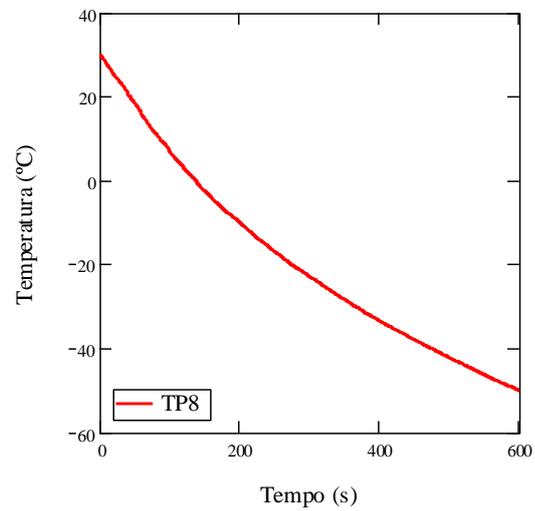


Fonte: Autor.

Os termopares TP8 e TP9 são opostos aos fixados dentro da região de contato direto com o líquido criogênico (TP3 e TP4, respectivamente). Pode-se observar pela Figura 33 que o comportamento do perfil de temperatura medido pelo termopar TP8 é bem diferente do TP3, isso acontece pelo fato do termopar ficar em contato direto com o LN2, não sendo uma aquisição ideal para efeito de comparação do gradiente térmico

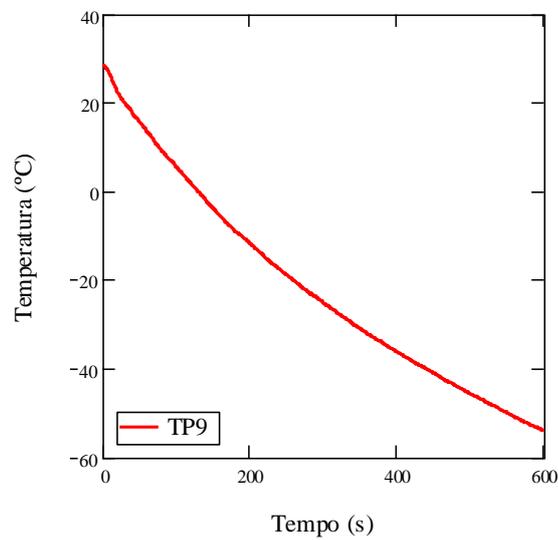
ao longo da espessura. O mesmo pode ser observado na Figura 35, quando são apresentados os valores de temperaturas registradas pelo termopar TP9.

Figura 34 – Resultado experimental do TP8.



Fonte: Autor.

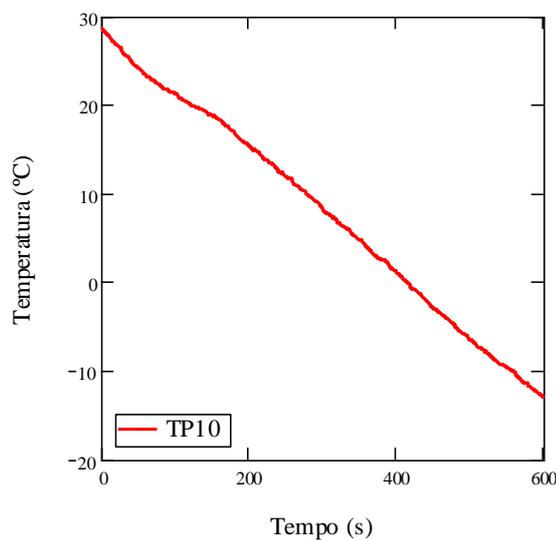
Figura 35 - Resultado experimental do TP9.



Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 36 apresenta a variação da temperatura durante o ensaio experimental para o TP10.

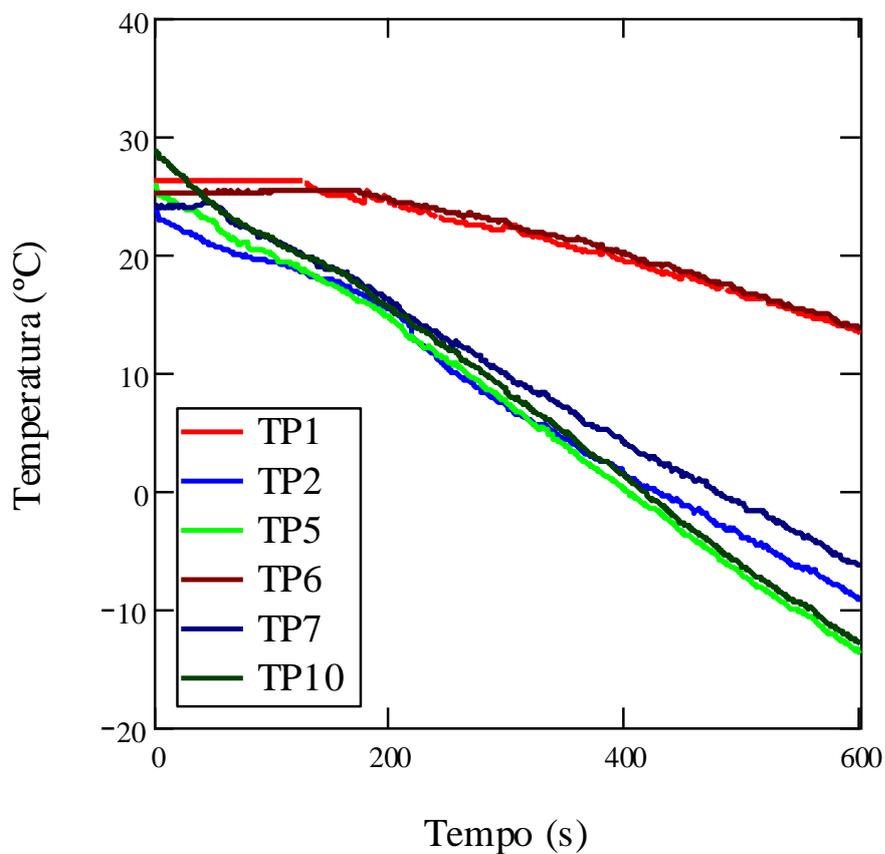
Figura 36 - Resultado experimental do TP10.



Fonte: Autor.

Para avaliar o gradiente térmico ao longo da espessura da chapa de aço (ASTM A131 Gr. EH36) a Figura 37 apresenta os valores da temperatura dos termopares, TP1, TP2, TP5 que estão fixados na parte superior da chapa que são comparados com os TP6, TP7 TP8, TP9 e TP10. Vale destacar que os termopares TP3 e TP4 não foram inseridos nessas análises pois são os únicos em contato direto com o líquido criogênico, com isso seus valores ficaram bem abaixo dos demais termopares, não servindo para efeito de comparação do gradiente térmico encontrado durante o ensaio experimental.

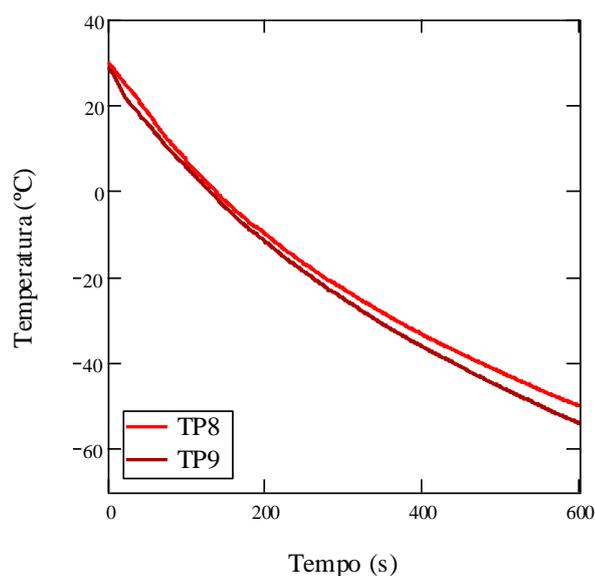
Figura 37 – Resultados experimentais dos termopares TP1, TP2, TP5, TP6, TP7 e TP10.



Fonte: Autor.

Os termopares que apresentaram a maior variação do gradiente térmico ao longo da espessura foram o TP2 e TP7. Em todos os demais a variação da temperatura ao longo da espessura durante o ensaio experimental pode ser considerada desprezável. Fica evidente também, com a Figura 38 que o comportamento dos termopares TP8 e TP9 são bem semelhantes.

Figura 38 – Resultados experimentais dos termopares TP8 e TP9.



Fonte: Autor.

As maiores diferenças de temperatura registradas entre os termopares fixados em superfícies opostas da placa de aço podem ser observadas pela Tabela 6.

Tabela 6 – Máxima diferença percentual dos valores de temperatura dos termopares fixados em superfícies opostas da chapa de aço ASMT A131 Gr. EH36

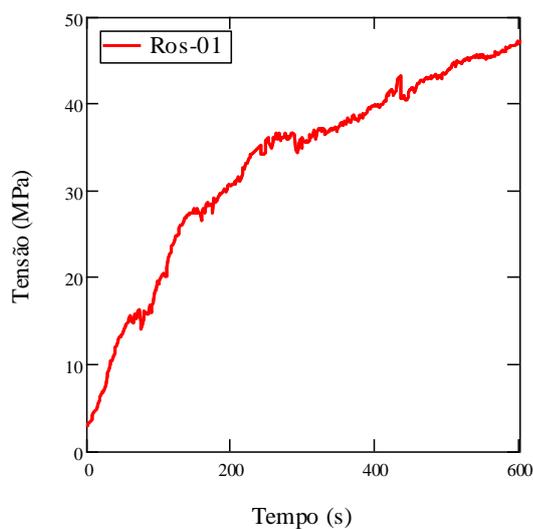
TERMOPARES	TP1/TP6	TP2/TP7	TP5/TP10
Máxima Diferença percentual de Temperatura	5,01%	0,17%	1,08%

Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Resultado Experimental das Tensões

A Figura 39 e Figura 40 apresentam valores da tensão máxima, calculados pela equação (número da equação), a partir dos dados experimentais de deformações, em função do tempo de realização do ensaio experimental.

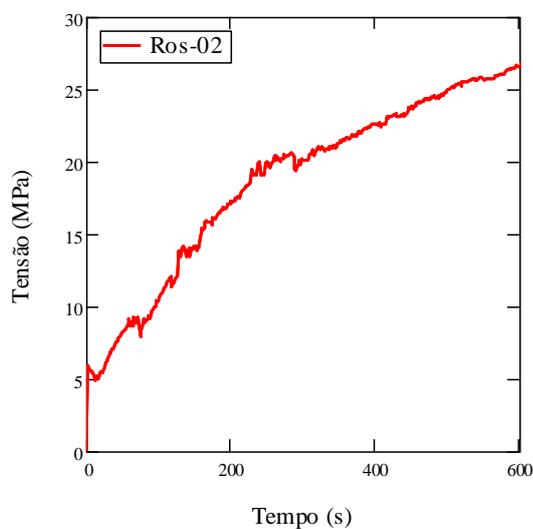
Figura 39 – Tensões principais – Roseta 01



Fonte: Autor.

Conforme pode ser observado na Figura 39, o valor da tensão térmica induzida pelo gradiente nos primeiros 3 minutos de análise obteve um crescimento linear, depois desse período, o seu comportamento passou a ter uma inclinação menor, atingindo no final do experimento o valor próximo à 50MPa. Os ruídos apresentados no gráfico são em função da sensibilidade dos extensômetros no momento da aquisição dos valores de deformações.

Figura 40 – Tensões principais – Roseta 02



Fonte: Autor.

O mesmo acontece para os resultados da Ros-02 (Figura 40), mas vale destacar que na direção onde a Ros-02 está fixada os valores finais de tensão (aproximadamente 26 MPa) deram bem abaixo da Ros-01. Este fato deve-se ao diferencial na distribuição das tensões nas direções ortogonais devido à geometria diferencial da placa, com dimensões distintas na horizontal e na vertical

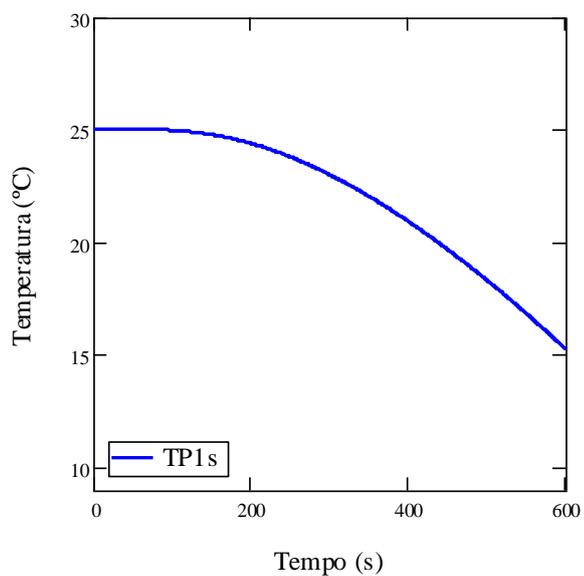
### **4.3 Resultados da análise numérica**

Os resultados apresentados nesta seção são referentes aos perfis de temperatura e tensões térmicas do modelo numérico obtidos pelas análises descritas na Seção 4.1. Os valores de temperatura em função do tempo, mostrados nos gráficos dos resultados numéricos, são em função das posições onde estão fixados os termopares nos ensaios experimentais e as tensões térmicas em relação as rosetas instaladas na chapa.

#### **4.3.1 Resultado numérico do perfil de temperatura**

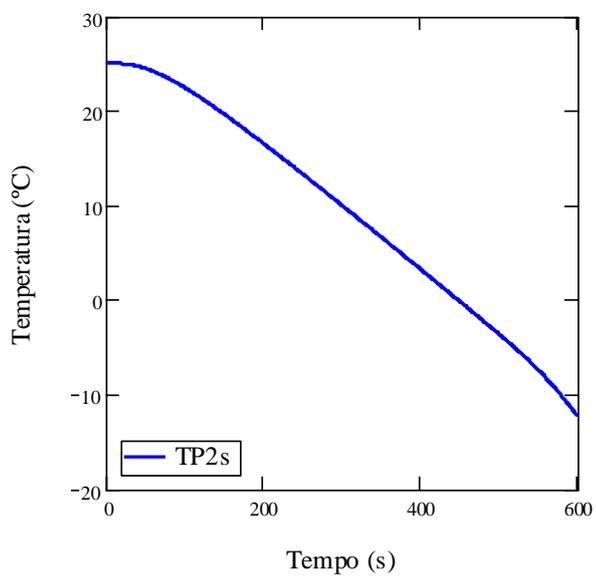
A Figura 41, Figura 42 e Figura 43 representam os perfis de temperatura dos resultados numéricos nas análises realizadas pelo programa ABAQUS®, referentes às posições dos termopares TP1s, TP2s e TP3s (o sub-índice “s” denota os resultados da simulação numérica) que estão fixados na parte superior da chapa de aço. Esses resultados serão utilizados para efeito de comparação com os resultados experimentais na próxima seção.

Figura 41 – Resultado numérico do TP1s



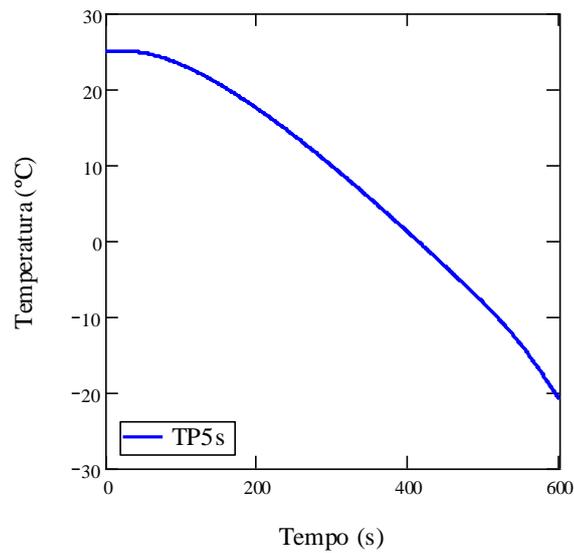
Fonte: Autor.

Figura 42 – Resultado numérico do TP2s.



Fonte: Autor.

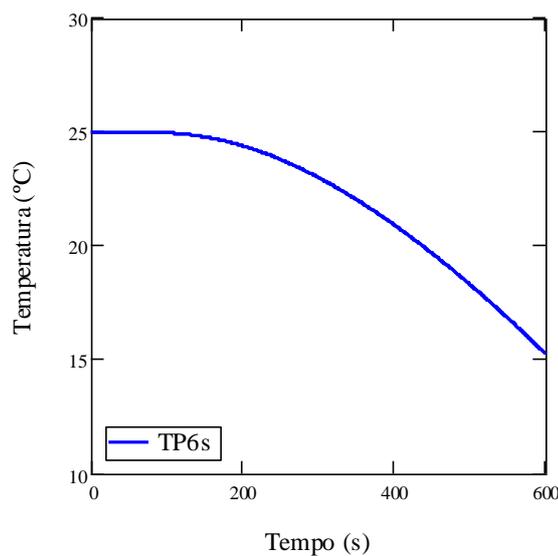
Figura 43 – Resultado numérico do TP5s.



Fonte: Autor.

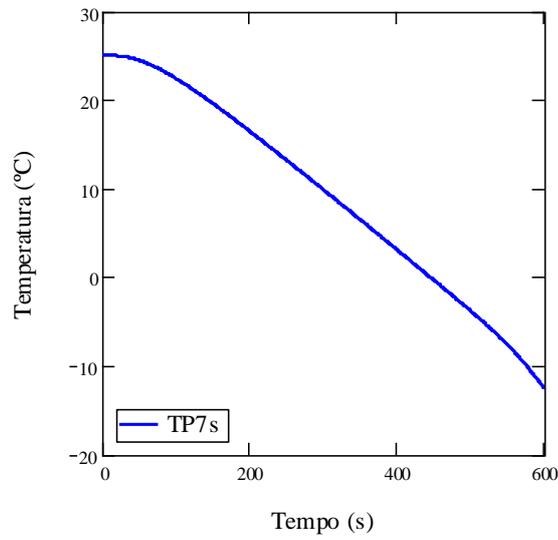
A Figura 44, Figura 45 e Figura 46 apresentam os resultados do modelo numérico para os termopares TP6s, TP7s e TP10s. Que são os pontos do modelo numérico que representam os termopares TP6, TP7 e TP10 fixados para medição dos valores de temperatura do ensaio experimental.

Figura 44 – Resultado numérico do TP6s.



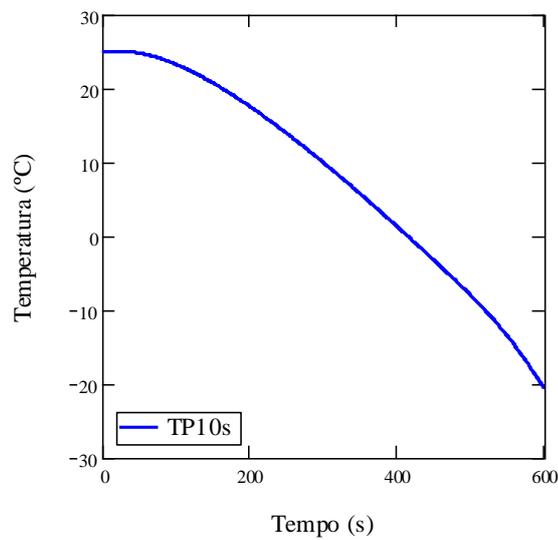
Fonte: Autor.

Figura 45 – Resultado numérico do TP7s.



Fonte: Autor.

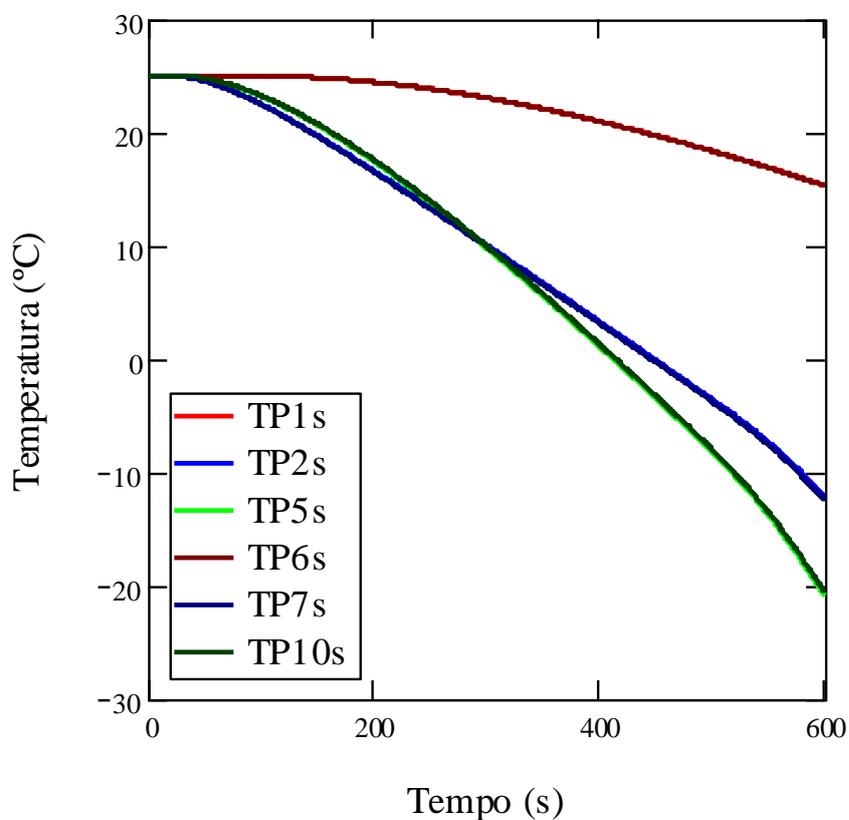
Figura 46 – Resultado numérico TP10s.



Fonte: Autor.

Para observar a variação da temperatura ao longo da espessura da chapa de aço, na Figura 47 é apresentada a comparação dos valores obtidos pela análise numérica em ponto opostos, um na superfície superior e outro na inferior.

Figura 47 – Resultados numéricos dos pontos onde estão fixados os termopares (inferior e superior).



Fonte: Autor.

Pela Figura 47 pode-se observar, através do resultado numérico, que a variação da temperatura no período estabelecido para análise, ao longo da espessura da chapa de aço foi desprezável. A Tabela 6 apresenta as diferenças máximas de temperatura nos pontos opostos à espessura da chapa;

Tabela 7 – Máxima diferença percentual dos valores de temperatura do modelo numérico em superfícies opostas da chapa de aço ASMT A131 Gr. EH36

Pontos	TP1s/TP6s	TP2s/TP7s	TP5s/TP10s
Máxima Diferença percentual de Temperatura	0,12%	0,21%	1,65%

Fonte: Autor.

Os valores do gradiente de temperatura na parte superior da placa, do modelo numérico são mostrados na Figura 48.

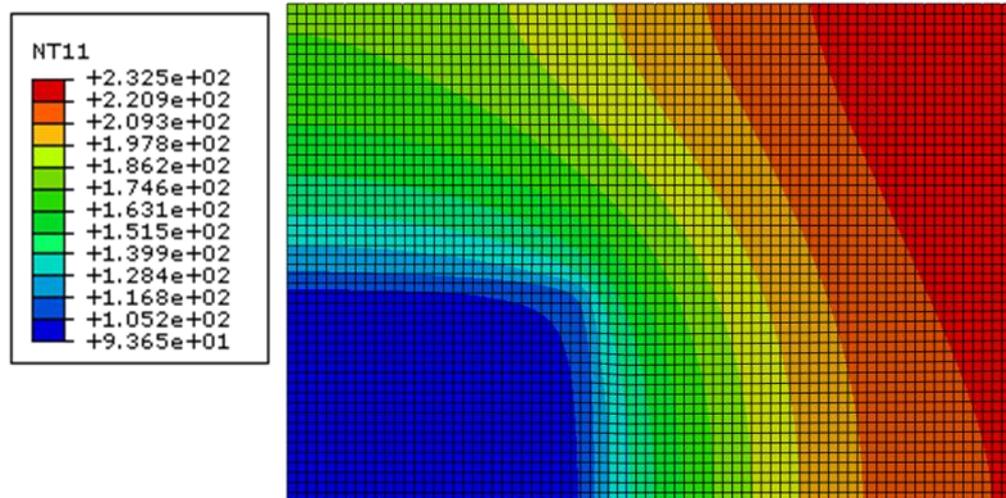
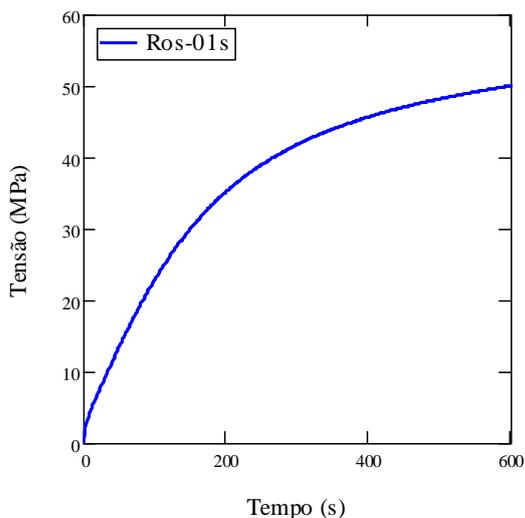


Figura 48 – Gradiente térmico do modelo numérico (Resultados em Kelvin)

### 4.3.1 Resultado numérico das tensões térmicas

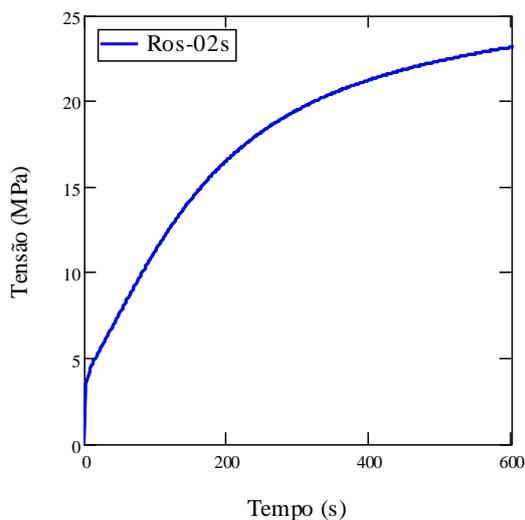
Nesta seção serão apresentados os resultados da análise numérica da determinação das tensões térmicas induzidas na chapa do material ASMT A131 Gr. EH36. A Figura 49 e Figura 50 apresentam os resultados da tensão principal nos pontos onde estão fixados as rosetas 01 e 02 respectivamente.

Figura 49 – Tensões principais do modelo numérico – Roseta 01



Fonte: Autor.

Figura 50 – Tensões principais do modelo numérico – Roseta 02.



Fonte: Autor.

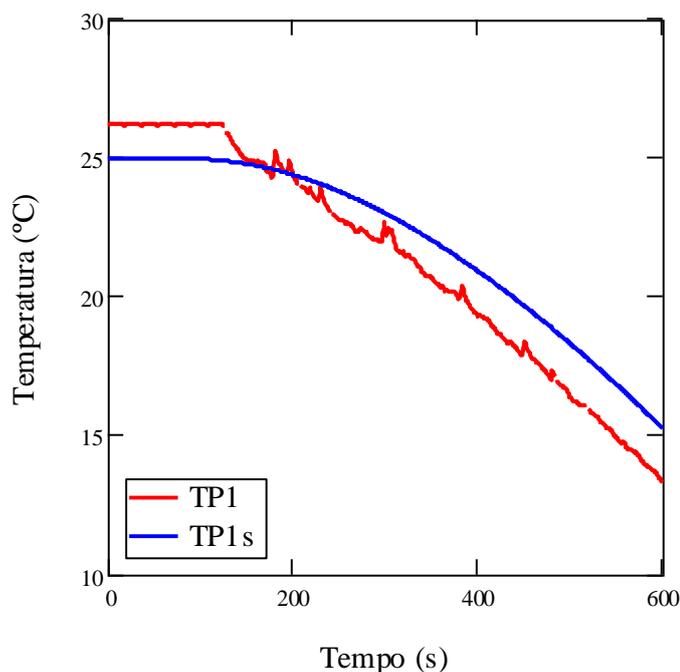
Conforme esperado os valores das tensões térmicas induzidas na chapa de aço apresentaram um aumento em relação ao gradiente de temperatura que o material foi submetido durante a análise, que representou um vazamento de um líquido criogênico no material que, a priori, não foi projetado para esse tipo de carga.

#### 4.4 Comparação dos resultados numérico e experimental

Analisando os resultados da Figura 47 e comparando com os da Figura 37 observa-se uma concordância entre eles, uma vez que nos testes experimentais o valor da variação da temperatura ao longo da espessura foi bem pequeno.

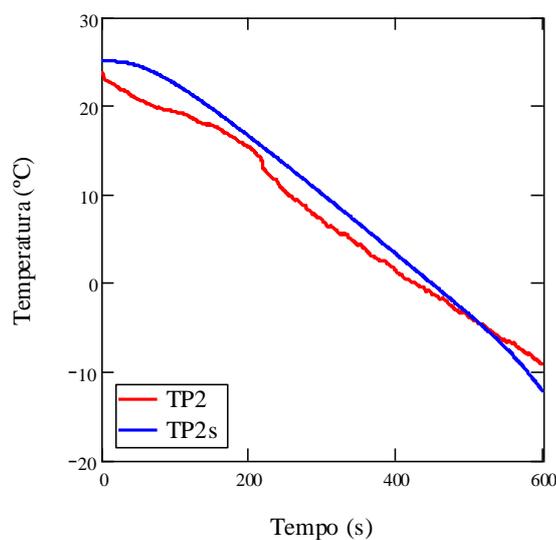
A seguir serão apresentadas as comparações, de cada termopar em função dos resultados experimentais com os obtidos na análise numérica. O intuito desta comparação é avaliar a representatividade dos valores numéricos com os experimentais. A Figura 51, Figura 51 e Figura 53 apresentam as comparações entre os valores de temperatura dos termopares fixados na superfície superior da chapa.

Figura 51 – Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP1 e TP1s.



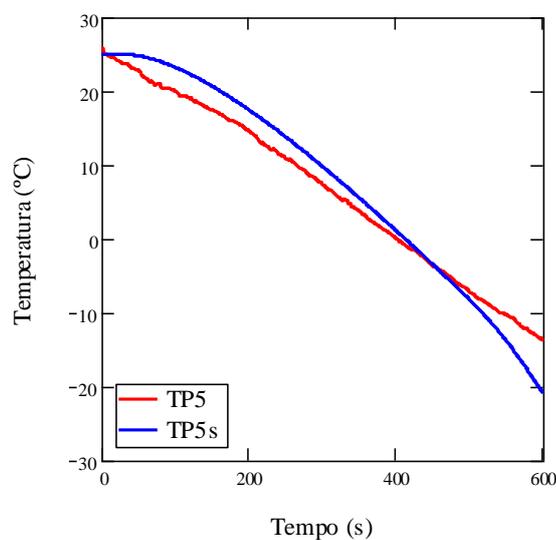
Fonte: Autor.

Figura 52 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP2 e TP2s.



Fonte: Autor.

Figura 53 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP5 e TP5s.

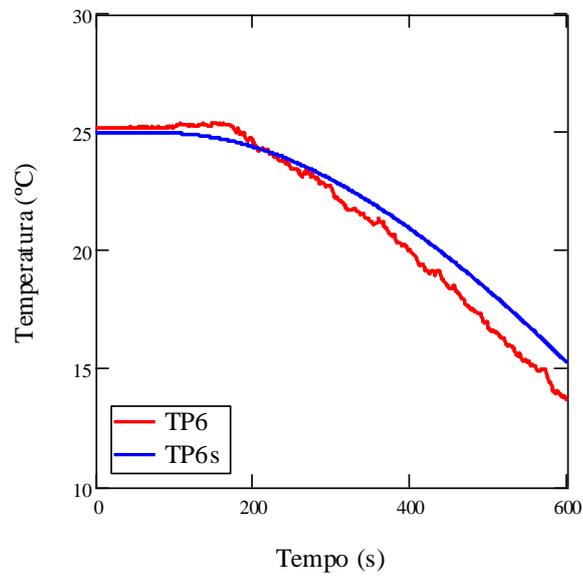


Fonte: Autor.

Nota-se pelos perfis de temperatura, para cada termopar analisado, que o comportamento global da distribuição de temperatura entre os modelos numérico e experimental ao longo do comprimento da chapa de aço analisada é bem semelhante.

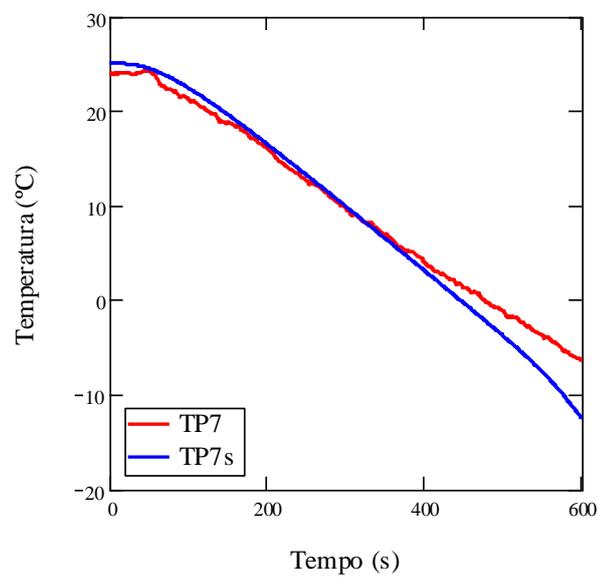
Na Figura 54, Figura 55 e Figura 56 são apresentados os termopares fixados na superfície inferior.

Figura 54 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP6 e TP6s.



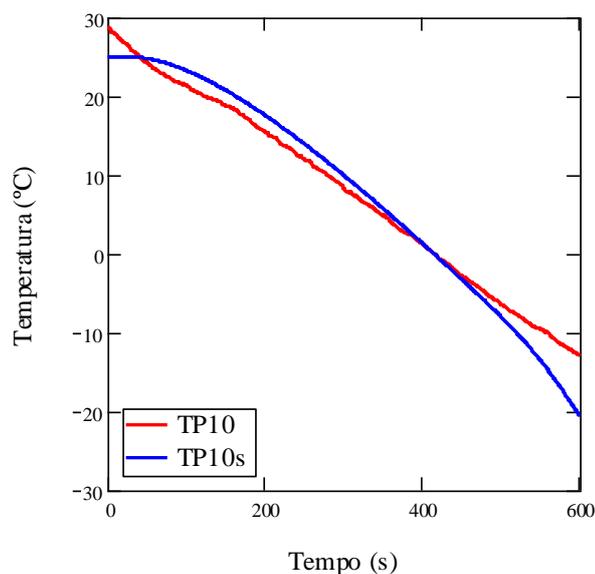
Fonte: Autor.

Figura 55 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP7 e TP7s.



Fonte: Autor.

Figura 56 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) do TP10 e TP10s.



Fonte: Autor.

Assim como nos termopares fixados na superfície superior da chapa, aqueles posicionados parte inferior apresentam um bom comportamento em relação à variação temporal da temperatura quando são comparados os resultados numéricos com os experimentais.

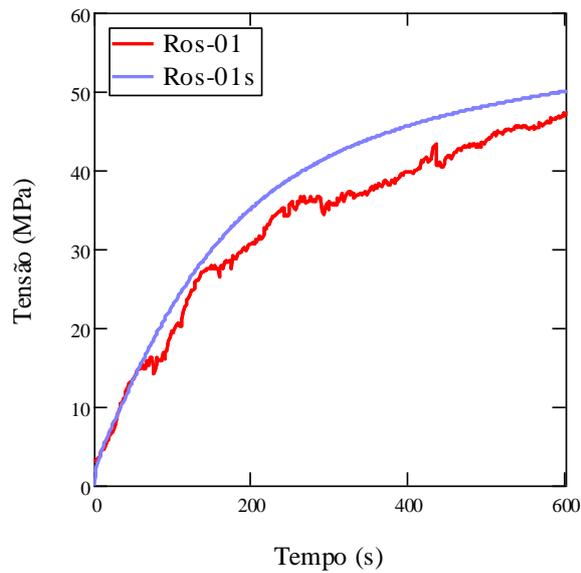
Tabela 8 – Máxima diferença entre os valores temperatura (experimental e numérico).

Termopares	TP1/ TP1s	TP2/ TP2s	TP5/ TP5s	TP7/ TP7s	TP10/ TP10s
Máxima Diferença percentual de Temperatura	9,26%	8,30%	8,37%	7,13%	10,40%

Fonte: Autor.

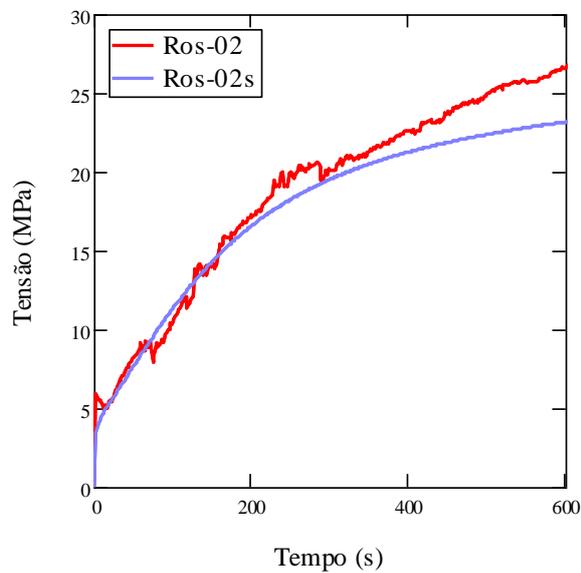
As variações das tensões térmicas induzidas na chapa de aço do material ASMT A131 Gr. EH36 no modelo numérico e no ensaio experimental são comparadas pela Figura 57 e Figura 58 para a Roseta 01 e Roseta 02 respectivamente

Figura 57 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) da Roseta 01



Fonte: Autor.

Figura 58 - Comparação dos resultados (numérico x experimental) da Roseta 02



Fonte: Autor.

Pode-se observar pelas Figuras 56 e 57 que os resultados, das tensões térmicas induzidas, do modelo numérico e experimental apresentam comportamentos semelhantes. Nota-se, porém, que para a Roseta 01 o modelo numérico apresentou um resultado final de tensão superior ao encontrado no experimento, o que não

aconteceu para a Roseta 02, onde o resultado experimental foi maior do que o calculado pelo modelo numérico.

Tabela 9 – Máxima diferença entre os valores de tensão térmica (experimental e numérico).

Rosetas	ROS 01	ROS 02
Máxima diferença percentual da diferença de tensão (Mpa)	9,58%	10,81%

Fonte: Autor.

# Capítulo 5

## CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho propôs a elaboração de procedimentos numéricos para simular o efeito de vazamento de GNL baseado no método dos elementos finitos em estruturas típicas de plantas FLNG. O modelo proposto foi utilizado para simular o vazamento de líquido criogênico em uma placa fabricada com aço ASTM A131 Gr. EH36, material utilizado em estruturas offshore, simulando uma parte do costado de um navio. O modelo foi validado a partir de resultados obtidos através de um experimento onde foi simulado o vazamento de nitrogênio líquido em uma placa. Durante o ensaio foram medidos valores de temperatura e tensões em alguns pontos da placa.

As propriedades térmicas dependentes da temperatura para o aço naval EH36, necessárias para modelagem numérica do problema, determinadas por Vilasboas (2019) e Silva (2018) permitiram uma boa representatividade física do fenômeno estudado.

Os termopares que foram utilizados para medição da variação da temperatura nos ensaios experimentais ao longo da espessura e comprimento foram comparados e os que apresentaram a maior variação do gradiente, ao longo da espessura, foram aqueles que estavam em contato direto com o fluido criogênico. Em todos os demais a variação da temperatura ao longo da espessura durante o ensaio experimental pode ser considerada desprezível. Este fato foi também observado no modelo numérico,

portanto, pode-se dizer que a variação do gradiente térmico ao longo da espessura da chapa de aço é desprezível, para as condições que foram realizados os experimentos.

Para validação completa do modelo todos os resultados numéricos (obtidos pelas análises termomecânicas) foram comparados aos testes experimentais, através dos termopares e extensômetros fixados no corpo de prova. Os resultados das tensões térmicas experimentais, calculados pelos valores de deformações medidos pelos extensômetros, apresentaram resultados com uma boa concordância em relação ao modelo numérico, comprovando que o modelo numérico possui uma boa representatividade do fenômeno físico analisado, podendo ser utilizado para futuras análises envolvendo o gradiente térmico deste material quando for submetido à temperaturas criogênicas em determinada região do elemento estrutural com o material ASTM A131 Gr. EH36.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Neste trabalho foi proposto um modelo numérico representativo do gradiente térmico em uma chapa de aço ASTM A131 Gr. EH36 que é um material amplamente utilizado na construção naval. Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se a modelagem, por exemplo, de uma estrutura em escala real do sistema FLNG, de equipamentos e suportes que poderão sofrer um vazamento criogênico acidental.

Como foi desenvolvido um modelo numérico representativo das tensões térmicas induzidas no material ASTM A131 Gr. EH36, pode-se através desse estudo ampliar as análises devido ao gradiente de tensão gerado pela carga térmica, por exemplo, na verificação da estabilidade de trincas nos componentes estruturais.

Novas análises para aprimoramento do modelo podem ser realizadas, principalmente relacionadas à simulação do escoamento do líquido criogênico no material além da análise de efeitos de incêndios devido ao GNL sobre navios FSPO, de transporte do FNLG e estruturas.

# REFERÊNCIAS

---

ABS. **Guide for Building and Classing Floating Offshore Liquefied Gas Terminals**. Houston: American. Bureau of Shipping, 2015.

BORESI, A. P., CHONG, K. P. e LEE, J. D. **Elasticity in Engineering Mechanics**. 3a. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011

CAROLLO, L. F. **Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo de Calor para a Estimção Simultânea de Propriedades Termofísicas de Materiais Metálicos em Função da Temperatura Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo de Calor para a Estimção Simultânea de Proprieda**. Tese de doutorado - Universidade Federal de Itajubá - 2016.

COWDREY, S. FERGUSON, C. LENNOX, A.F. MAURI, P. MULLER, M. NEUMAYER, R. ORME, B. editors. **Loctite worldwide design handbook** 2nd ed. Loctite Corp, 1995.

DING, J., WANG, Y. **Realistic modelling of thermal and structural behavior of unprotected concrete filled tubular columns in fire**. Journal of Constructional Steel Research, vol. 64, pp. 1086-1102, 2008.

FARIA, M. V. C.L., **Potencial de aplicação de uma liga FE-C-Ni em conexão flangeada de conectores de dutos flexíveis sob condição criogênci**a. Dissertação de mestrado – Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro – RJ, abril, 2016.

FOSS, M.M., **Introduction to LNG**, Center for Energy Economics, Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Tex., in: Energy Economics Research, 2012.

FUNG, Y.C; TONG P.; CHEN, X. **Classical and computational solid mechanics**. World Scientific Publishing Company, 2001.

GASNET. <http://www.gasnet.com.br/termetricas/ciclo.asp>. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br/termetricas/ciclo.asp>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics**. Disponível em: [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html)> Acesso em 12 de agosto de 2018.

---

JEFFERS, A. E.; SOTELINO, E. D. **Fiber heat transfer element for modeling the thermal response of structures in fire.** Journal of Structural engineering, v. 135, n. 10, p. 1191-1200, 2009.

JIN, T., HONG, J. P., ZHENG, H., TANG, K., GAN, Z. H. **Measurement of boiling heat transfer coefficient in liquid nitrogen bath by inverse heat conduction method.** Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 10(5), 691-696. 2009.

KALAN, R. J.; PETTI, J. P. **LNG Cascading Damage Study Volume I: Fracture Testing Report.** v. I, n. December, 2011.

KODUR, V., DWAIKAT, M. **Response of steel beam-columns exposed to fire.** Engineering Structures, vol. 31, pp. 369-379, 2009.

MAGALHÃES, K. M. M.; RIBEIRO JUNIOR, A. S.; SANTOS, G. J. B. **Análise de risco em estruturas ligadas ao processo de exploração do gás natural liquefeito em plantas FLNG.** III Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e V Workshop de Engenharia de Petróleo (CONEPETRO). 2018

MARQUARDT, E. D.; LE, J. P.; RADEBAUGH, Ray. **Cryogenic Material Properties Database. 11th International Cryocooler Conference,** v. 12, n. 6, p. 1–7, 2000.

MELLO, F. S.C., CARVALHO, M.L., **Comparação de tecnologias de processos de liquefação de gás natural para a produção de GNL.** Rio de Janeiro, 2014, 381 p., Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MME, **Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural** – Ministério de Minas e Energia – 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, W. S., CHUN, M. S., HAN, M. S., KIM, M. H., LEE, J. M. **Comparative study on mechanical behavior of low temperature application materials for ships and**

---

**offshore structures: Part I—Experimental investigations.** Materials Science and Engineering: 528(18), 5790-5803, (2011).

PATEL, H. N., RYNN, P. G., WANG, X., DAS, B., & PHAM, M. **Safety and Regulatory Perspective for Floating LNG plant Offshore (FLNG).** OTC Brasil. doi:10.4043/22668-ms. 2011

RIBEIRO, A. C. N., **Avaliação da Soldagem do aço Naval Microligado soldado pelo processo arco submerso com um e dois arames.** Dissertação de mestrado—Universidade Federal de Campina grande – PB, julho, 2015

SHELL. <https://worldmaritimenews.com/archives/tag/shell/>. Disponível em: <<https://worldmaritimenews.com/archives/tag/shell/>>. Acesso em 18 de maio 2018.

SILVA, D.G, JUNIOR, A.S.R. **Determinação do coeficiente de convecção do nitrogênio líquido em ebulição pelo método inverso de condução de calor.** Relatório interno, GITEC- Grupo de Inovação Tecnológica da Universidade Federal da Bahia, 2018.

VANEM, E., ANTÃO, P., OSTVIK, I., DE COMAS, F.D.C., 2008. **Analysing the risk of LNG carrier operations.** Reliability Engineering & System Safety 93, 1328-1344. 2008.

VILASBOAS, Icaro Figueiredo. **Determinação das propriedades termofísicas dependentes da temperatura do aço naval ASTM A131 GR. EH36 submetido a temperaturas criogênicas.** 87 páginas. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós graduação em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

WON, W; LEE, S. K.; CHOI, K.; KWON Y. **Current trends for the floating liquefied natural gas (FLNG) technologies.** Korean Journal of Chemical Engineering, v. 31, n. 5, p. 732–743, 2014.