



AVALIAÇÃO DE TENSÕES ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
NOS TUBOS DE FORNOS DE PIRÓLISE SUJEITOS A CARBURIZAÇÃO E
CAMADAS DE COQUE

Lucas Correia de Oliveira

SALVADOR-BA/BRASIL
DEZEMBRO 2023



AVALIAÇÃO DE TENSÕES ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
NOS TUBOS DE FORNOS DE PIRÓLISE SUJEITOS A CARBURIZAÇÃO E
CAMADAS DE COQUE

Lucas Correia de Oliveira

Defesa de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do IFBA, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Costa da Silva.

Linha de pesquisa: Caracterização e integridade estrutural.

SALVADOR-BA/BRASIL

DEZEMBRO 2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

0482a Oliveira, Lucas Correia de

Avaliação de tensões através do método de elementos finitos nos tubos de fornos de pirólise sujeitos a carburização e camadas de coque / Lucas Correia de Oliveira; orientador Ivan Costa da Silva -- Salvador, 2023.

91 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1. Carburização. 2. Método de elementos finitos. 3. Tensões. 4. Coque. I. Silva, Ivan Costa da, orient. II. TÍTULO.

CDU 66.046.562

INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

“Avaliação De Tensões Nos Tubos Das Serpentinhas Do Forno De Pirólise Com
Variação De Carburização, Camada De Coque E Temperatura”

Lucas Correia de Oliveira

Produto (s) Gerado (s): *Relatório Final de Pesquisa*

Orientador: Prof. Dr. Ivan Costa da Silva – Orientador PPGEM/IFBA

Banca examinadora:

Ivan Costa da Silva
Prof. Dr. Ivan Costa da Silva – Orientador PPGEM/IFBA

Maria Cléa Soares de Albuquerque
Prof.^a Dr.^a Maria Cléa Soares Albuquerque – Examinadora PPGEM/IFBA

Ivo Andrei de O. L. Lima
Prof. Dr. Ivo Andrei de Oliveira Lino Lima – Examinador Externo Braskem

Francirley Paz Silva
Prof. Dr. Francirley Paz Silva - Examinador Externo UFAL

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 15/12/2023

Resumo do trabalho de conclusão de curso da pesquisa apresentada ao IFBA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

AVALIAÇÃO DE TENSÕES ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NOS TUBOS DE FORNOS DE PIRÓLISE SUJEITOS A CARBURIZAÇÃO E CAMADAS DE COQUE

Lucas Correia de Oliveira
Dezembro/2023

Orientador: Prof. Dr. Ivan Costa da Silva
Programa: Engenharia de Materiais

Os fornos de pirólise são equipamentos críticos em uma planta de etileno para o processo de craqueamento de hidrocarbonetos. Geralmente, a reação de craqueamento ocorre nos tubos de serpentinas radiantes, que podem ser aquecidos até 1000 °C ou temperaturas mais elevadas. Os fornos, nessas condições severas de temperatura, formam um ambiente propício para o aparecimento de coque e carburização. Esses fatores juntos apresentam elevados riscos de falha no equipamento, especialmente durante uma parada de emergência. Para compreender como a carburização e o coque influenciam na geração de tensões nos tubos das serpentinas do forno, adotou-se o método de elementos finitos neste trabalho. O objetivo foi criar modelos capazes de reproduzir as tensões nos tubos quando eles estão sujeitos a variações nos níveis de carburização e na espessura da camada de coque em diferentes temperaturas. Foram simuladas as combinações mais críticas que podem resultar em falhas durante o resfriamento do forno. Diferentes modelos de elementos finitos foram utilizados, incluindo análises lineares e não lineares, com camadas de coque de 5 e 10 mm de espessura, e espessuras de paredes carburizadas variando de 0%, 25%, 50%, 75% a 100%. Os resultados indicaram que, na ausência da camada de coque, não ocorreram tensões acima do limite de escoamento do material. No entanto, com a formação dessa camada, as tensões aumentaram em torno de 10 vezes, especialmente com 75% de carburização e uma redução de temperatura de 1000°C para 200°C, o que poderia resultar na propagação de trincas e na falha dos tubos.

Palavras Chave: Carburização, método de elementos finitos, tensões, coque.

Abstract of the research qualification submitted to the IFBA as part of the requirements for obtaining a master's degree in Materials Engineering

**STRESS EVALUATION USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN
PYROLYSIS FURNACE TUBES SUBJECTED TO CARBURIZATION AND COKE
LAYERS**

Lucas Correia de Oliveira

december/2023

Advisor: Prof. Dr. Ivan Costa da Silva

Materials Engineering Program

Pyrolysis furnaces are critical equipment in an ethylene plant for the hydrocarbon cracking process. Typically, the cracking reaction occurs in the radiant coil tubes, which can be heated to 1000°C or higher temperatures. Furnaces under these severe temperature conditions create an environment conducive to coke and carburization, both of which pose high risks of equipment failure, especially during an emergency shutdown. To understand how carburization and coke influence stress generation in the furnace coil tubes, the finite element method was adopted for this study. The objective is to evaluate the stresses experienced by the tubes when subjected to variations in carburization levels and coke layer thickness at different temperatures in order to identify the most critical combinations that could lead to failure during furnace cooling. Finite element models were used, incorporating both linear and nonlinear analyses, with different coke layer thicknesses (5 and 10 mm) and various levels of carburization (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%). The results indicated that without a coke layer, stresses exceeding the material's yield strength would not appear. However, with the formation of this layer, stresses increased around 10 times. This suggests that with 75% carburization and a temperature reduction from 1000°C to 200°C, crack propagation could occur, leading to tube failure.

Keywords: carburization, finite element method, stresses, coke.

*“Não a nós, Senhor, nenhuma glória para
nós, mas sim ao teu nome, por teu amor e
por tua fidelidade”*

Sl.115:1

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente ao Eterno Deus pela oportunidade dada por Ele a mim para escrever este trabalho, pela força, saúde, disposição e inteligência, sei que sem Ele nada seria feito.

Agradeço ao professor Ivan por todo o suporte que me foi dado, foram muitas horas de discussões e sua orientação foi fundamental para conseguir concluir este trabalho.

Quero agradecer à minha esposa Vívian Oliveira por todo o apoio, incentivo e força que ela me deu para que eu conseguisse conquistar este importante passo na minha vida profissional e acadêmica e a toda compreensão que ela teve durante esse longo período de árduo trabalho.

Agradeço também a minha família, meu pai, Domingos, minha mãe, Filomena e meus irmãos, Gildete, Domingos Júnior, Ana Rita e em especial meu irmão Antônio Jackson que sempre me deu exemplo e me incentivou a estudar.

Agradeço à CEC Engenharia, que me deu todo o apoio para iniciar esta jornada, sobretudo ao meu superior Alexandre Paes que foi e está sendo fundamental para o meu desenvolvimento profissional e também à equipe de Mecânica em nome da Máriam Midlej.

Quero agradecer aos professores Paulo Moura e Ivo Andrei que me incentivaram a trabalhar com este tema.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer a todos os professores do programa PPGEM que participaram da minha formação e a Instituição por permitir o acesso a um ensino tão necessário atualmente.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral	15
1.2	Objetivos específicos	16
1.3	Justificativa	16
2	Revisão bibliográfica	17
2.1	FORNOS DE PIRÓLISE	17
2.2	LIGAS UTILIZADAS NOS FORNOS	20
2.3	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS TUBOS	21
2.3.1	Cromo	21
2.3.2	Níquel	22
2.3.3	Silício	23
2.3.4	Nióbio	23
2.3.5	Manganês	24
2.4	FORMAÇÃO DO COQUE	24
2.5	DECOQUE E PARADA DE EMERGÊNCIA	27
2.6	CARBURIZAÇÃO	27
2.7	MECANISMOS DE FALHAS NOS TUBOS	29
2.8	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	32
3	Material e Métodos	41
3.1	MATERIAL	41
3.1.1	Coque	44
3.1.2	Material Carburizado	45
3.1.3	Equipamentos Utilizados	47
3.2	MÉTODOS	47
3.2.1	Análise Linear	47
3.2.2	Análise não linear	53

3.2.3	Limitações e aproximações dos modelos.....	60
4	Resultados e discussão	61
4.1	análise linear	61
4.1.1	Modelos sem coque	61
4.1.2	Camada de coque com 5 mm	64
4.2	análise não linear	68
4.2.1	Camada de coque com 5 mm	68
4.2.2	Camada de coque com 10 mm	77
5	Conclusões.....	86
5.1	Sugestão de trabalhos futuros.....	87
	REFERÊNCIAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo simplificado de um forno de Pirólise	18
Figura 2 - Arranjo das tubulações na serpentina.....	19
Figura 3 - Esquemático da região da serpentina.....	20
Figura 4 - Resistência à corrosão em função da quantidade de cromo	22
Figura 5 - Coque formado por mecanismo catalítico.....	25
Figura 6 - Coque não catalítico	26
Figura 7 - Diferentes camadas de coque numa tubulação	26
Figura 8 - Modelo da evolução microestrutural da oxidação e carburização.....	28
Figura 9 - Avaliação metalúrgica de um tubo sob efeito da carburização. (a) Visão das trincas internas e (b) detalhe da trinca	29
Figura 10 - Trinca longitudinal de um tubo de serpentina	30
Figura 11 - Formação de trinca longitudinal e fratura dúctil	30
Figura 12 - Fratura frágil nos tubos da serpentina, por conta da carburização e tensões geradas no resfriamento do forno	31
Figura 13 - propagação da trinca no tubo da serpentina	32
Figura 14 - Campos de aplicação do MEF: (a) indústria de óleo e gás, (b) indústria naval, (c) esportes, (d) indústria aeroespacial, (e) naval voltada para defesa	33
Figura 15 – Discretização dos modelos	35
Figura 16 - Modelo de elementos finitos com malha e carregamentos	37
Figura 17 - Condições de contorno e carregamento do modelo.....	38
Figura 18 - Modelo de elementos finitos com condições de contorno e carregamentos	39
Figura 19 - Modelo de elementos finitos da serpentina do forno.....	40
Figura 20 - Coeficiente de expansão térmica.....	42
Figura 21 - Módulo de Elasticidade	42
Figura 22 - Variação do limite de escoamento e limite de resistência à tração	43
Figura 23 - Variação do alongamento em função da temperatura	43
Figura 24 - Ensaio do material carburizado e não carburizado	45
Figura 25 - Coeficiente de dilatação dos materiais.....	46
Figura 26 - Seção transversal do tubo analisado	48

Figura 27 – (a) Vista isométrica da peça em CAD 3D, (b) vista da seção transversal	48
Figura 28 - Aplicação da malha do modelo linear elástico	49
Figura 29 - Modelo de Elementos finitos com malha criada de 0,5 mm	50
Figura 30 - Condições de contorno do modelo linear	50
Figura 31 - Tipos de análises não lineares no Ansys	54
Figura 32 - Exemplo de gráfico para material bilinear	54
Figura 33 - Modelo axissimétrico com 5 mm de coque	56
Figura 34 - Modelo axissimétrico com coque de 10 mm	56
Figura 35 - Condições de contorno do modelo não linear	57
Figura 36 - Malha dos modelos da análise não linear	58
Figura 37 - Distribuição das tensões combinadas de von Mises do modelo 13	62
Figura 38 - Tensões máximas principais do modelo 13	63
Figura 39 - Tensões mínimas principais do modelo 13	64
Figura 40 - Tensões combinadas de von Mises do modelo 37	65
Figura 41 - Tensão equivalente de von Mises para camada de coque de 5 mm	68
Figura 42 - Gráfico das tensões combinadas de von Mises para 5 mm de coque	70
Figura 43 - Tensões máximas principais	71
Figura 44 - Gráfico da tensão máxima principal em função da variação de espessura	72
Figura 45 - Gráfico das tensões máximas principais para 5 mm de coque	74
Figura 46 - Deformação total da peça	75
Figura 47 - Detalhe da distribuição das deformações	75
Figura 48 - Tensão equivalente de von Mises	77
Figura 49 - Gráfico das tensões combinadas de von Mises para 10 mm de coque	79
Figura 50 - Tensões máximas principais	80
Figura 51 - Gráfico da tensão máxima principal em função da variação de espessura – 10 mm	80
Figura 52 - Gráfico das tensões máximas principais para 10 mm de coque	83
Figura 53 - Deformação total da peça	84
Figura 54 - Detalhe da distribuição das deformações	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da liga HP40 G4852.....	41
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas da liga HP 40 G4852 à 25°C.....	41
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas para o material novo	44
Tabela 4 - Propriedades do Coque	44
Tabela 5 - Propriedades Mecânicas do material carburizado.....	46
Tabela 6 - Modelos avaliados sem o coque	51
Tabela 7 – Modelos avaliados com coque de 5 mm	52
Tabela 8 - Modelos com coque de 5 mm para análise não linear	59
Tabela 9 - Modelos com coque de 10 mm para análise não linear	60
Tabela 10 - Tensões combinadas de von Mises sem camada de coque	62
Tabela 11 - Tensões combinadas de von Mises para 5 mm de coque	66
Tabela 12 - Tensões combinadas de von Mises para 5 mm de coque	69
Tabela 13 - Tensões máximas principais para 5 mm de coque	73
Tabela 14 – Deformações totais analisadas para coque de 5 mm.....	76
Tabela 15 - Tensões combinadas de von Mises para 10 mm de coque	78
Tabela 16 - Tensões máximas principais para 10 mm de coque	82
Tabela 17 – Deformações totais analisadas para coque de 10 mm.....	85

1 INTRODUÇÃO

Os fornos de pirólise são equipamentos críticos em uma planta de etileno para o processo de craqueamento de hidrocarbonetos. Geralmente, a reação de craqueamento ocorre nos tubos de serpentinas radiantes, que podem ser aquecidos até 1000 °C ou temperaturas mais elevadas (HAN et al., 2019)

Na indústria petroquímica, as ligas centrifugamente fundidas 25Cr35NiNb são comumente usadas como materiais para tubos de forno de pirólise de etileno devido à sua resistência à ruptura por fluência de 100.000 horas e à resistência à corrosão por carburização em altas temperaturas (CHEN et al., 2015).

Essas ligas substituíram as superligas tradicionais à base de níquel e possuem propriedades equivalentes em condições de fluência, com excelente resistência à oxidação em altas temperaturas. Na maioria dos casos, essas ligas complexas são usadas em sua condição original de fundição, mas, durante o serviço, ocorrem envelhecimento e transformações de fase (SKINDARAS; VALIULIS; SPYCHALSKI, 2014).

Os fornos, sob estas condições severas de temperatura, formam um ambiente propício para o aparecimento do coque e da carburização, que juntos oferecem elevados riscos para falha do equipamento.

Durante o craqueamento, após um período de operação, ocorre a formação de uma camada de coque na superfície interna do tubo, esta camada age como um material refratário, devido ao baixo coeficiente de dilatação térmica, além de reduzir a seção transversal do tubo disponível para a matéria prima passar, impactando a eficiência do processo.

Os tempos de operação dos craqueadores industriais variam de 30 a 100 dias, após os quais, a unidade deve ser retirada de produção para a remoção do coque. Tipicamente, a produção precisa ser interrompida por 48 horas, o que tem um efeito considerável na economia (GEERTS et al., 2020)

Durante a parada do forno para a remoção do coque, chamada de decoque, ou em uma parada de emergência, pode ocorrer a falha dos tubos da serpentina, por conta da restrição à contração da parede da tubulação pelo coque.

Além da formação indesejada do coque, outro fator que impacta na resistência das serpentinas do forno é a carburização que, de forma simplificada, corresponde à difusão de carbono na matriz do aço.

De acordo com Harston e Ropital (2007), a carburização provoca uma redução significativa da ductilidade e tenacidade da liga e com o aumento do volume do material metálico carburizado, ocorre a geração de tensões entre a região carburizada e não carburizada, sendo este um dos principais motivos para a ocorrência de trincas nas serpentinas dos fornos.

A carburização também reduz a resistência mecânica de ligas em altas temperaturas, devido à precipitação de vários tipos de carbonetos ricos em cromo. A precipitação de carbonetos não apenas reduz o teor de Cr e aumenta a solubilidade de carbono na matriz, mas também deteriora a plasticidade, ductilidade e resistência à fluência em alta temperatura (SHEN et al., 2016).

Como forma de entender como a carburização e o coque influenciam na geração de tensões nos tubos das serpentinas do forno, o método de elementos finitos foi adotado para este trabalho.

Segundo Rao (2005), a ideia básica no método dos elementos finitos é encontrar a solução de um problema complicado substituindo-o por um mais simples. Uma vez que o problema real é substituído por um mais simples, é possível encontrar uma solução aproximada para o fenômeno.

Atualmente, os procedimentos de elementos finitos são amplamente utilizados em análises de problemas de engenharia, como na análise de sólidos e de estruturas e na transferência de calor e fluidos. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é útil em praticamente todos os campos da análise de engenharia (BATHE, 2016).

Através da modelagem do fenômeno pode-se obter vários níveis de tensões e deformações, como tensões combinadas de von Mises, tensões máximas principais, tensões mínimas principais e deslocamentos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as tensões solicitantes nos tubos das serpentinas do forno de pirólise, quando estão submetidos a variações de níveis de carburização e de camada de coque em diferentes temperaturas, a fim de descobrir as combinações mais críticas

que podem gerar falha durante o resfriamento do forno, que pode ocorrer no decoque ou durante uma parada de emergência.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as propriedades mecânicas do material novo, carburizado e do coque que possam ser empregadas nos modelos;
- Desenvolver modelos de elementos finitos com diferentes níveis de carburização, camada de coque e temperatura;
- Estabelecer relações entre o nível de carburização, variações de temperatura, e espessura do coque com os valores de tensões na seção transversal do tubo;
- Estimar em qual cenário, ao ocorrer um resfriamento, algum tubo pode sofrer a falha ou ser mais propenso à propagação de trinca.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os fornos de pirólise são equipamentos largamente utilizados na indústria petroquímica para a produção de hidrocarbonetos leves. Neste processo, as serpentinas do forno são as partes mais críticas do equipamento, cujas falhas podem levar ao desligamento completo do sistema, explosão e/ou outras consequências destrutivas (KHODAMORAD et al., 2012).

Arelado a estas falhas, estão alguns mecanismos de dano, como a carburização, por exemplo, e também formações de camadas de coque, por questões operacionais do forno. Isto aliado a variações de temperatura podem trazer grandes prejuízos à planta por conta da fratura dos tubos das serpentinas (Harston e Ropital, 2007), (OTEGUI; BONA; FAZZINI, 2015).

Modelos de elementos finitos têm sido utilizados para estudar diversos fenômenos físicos, inclusive nestes componentes, porém não foram encontrados modelos que combinem os efeitos conjuntos da carburização, coque e resfriamento repentino do forno (SANTOS et al., 2015), (Shen et al., 2016), (FUYANG et al., 2022), (POPOVA; ORYSHCHENKO, 2023).

Portanto, este trabalho propõe utilizar modelos por elementos finitos para determinar as condições em que tensões oriundas da carburização, formação da camada coque e do resfriamento podem levar a deformações e propagação de trincas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordadas seções sobre o forno de pirólise, bem como os materiais das tubulações das serpentinas, da influência dos elementos de liga nestes materiais. Posteriormente será tratado sobre a formação do coque durante a operação e também sobre a formação da carburização bem como sua influência nas propriedades mecânicas da tubulação e como isso influencia na formação das tensões.

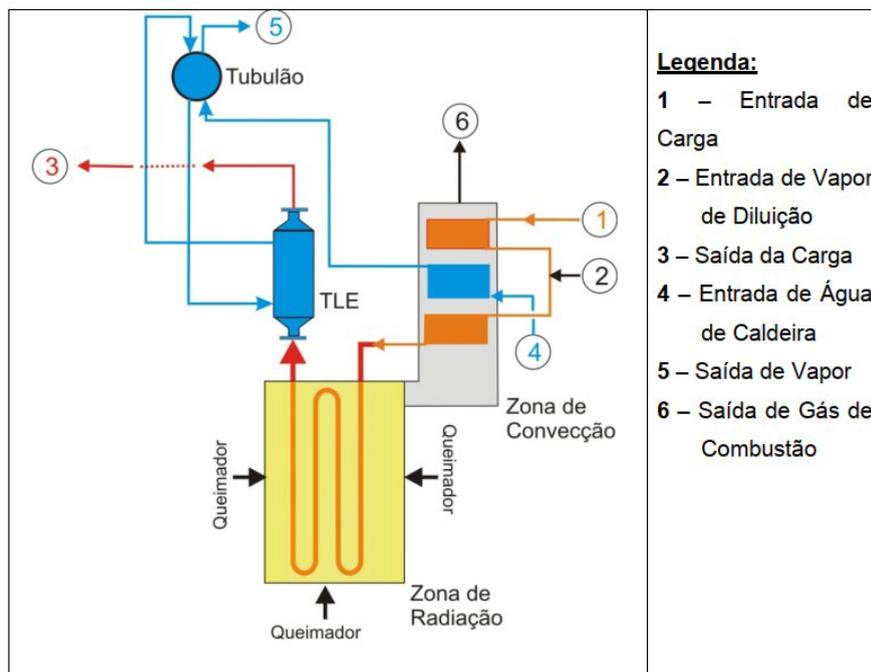
2.1 FORNOS DE PIRÓLISE

Fornos de pirólise são usados na produção de olefinas, como o etileno, que é um importante componente em larga escala para muitos tipos de materiais, como plásticos, resinas e fibras (BAUKAL; VACCARI; CLAXTON, 2019).

A pirólise é uma reação em fase gasosa realizada a uma temperatura em torno de 1000°C. Como a reação é altamente endotérmica, costuma ser realizada em serpentinas tubulares dentro de um forno aquecido. A tecnologia comercial dos fornos e das serpentinas podem ser concedidas por licença através de fornecedores, como Kellogg Brown & Root, ABB Lummus, Stone & Webster, Linde, KTI-Technip (THAM, 2023).

Cada projeto, tem as suas peculiaridades, mas no geral o funcionamento do forno de Pirólise ocorre conforme o arranjo exibido na Figura 1.

Figura 1 – Arranjo simplificado de um forno de Pirólise



Fonte: SANTANA, 2010

As duas zonas principais do forno são a seção de convecção e radiação, onde estão localizados os tubos da serpentina. Cada seção do equipamento desempenha um papel importante para o craqueamento. De forma simplificada, as funções dos itens principais, citado na Figura 1, são descritas abaixo:

- **Entrada de carga:** nesta etapa, a matéria prima utilizada no processo é inserida no forno e pré-aquecida através dos tubos de convecção;

- **Entrada de vapor de diluição:** região onde ocorre o controle de temperatura do processo;

- **Zona de radiação:** onde ocorrem as reações de craqueamento. Nesta seção os tubos da serpentina ficam expostos às chamas oriundas da queima do gás combustível;

- **TLE (Transfer Line Exchanger):** são resfriadores especiais, que tem por objetivo diminuir a temperatura do fluido vindo da região de radiação, evitando desta forma reações secundárias de coqueamento;

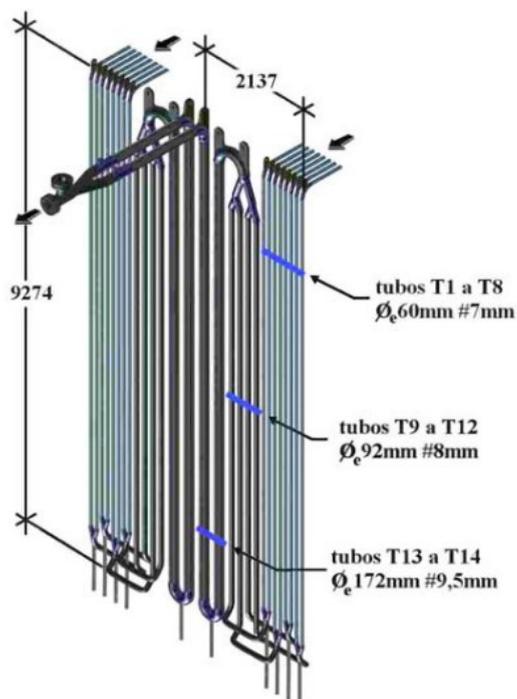
- **Saída de carga:** Saída do material craqueado;

- **Saída de vapor:** Como forma de aproveitar o calor retirado do fluido do processo a água que passa pelo TLE é utilizada na geração de vapor.

Conforme indicado acima, a região mais crítica do forno é a seção da radiação, pois os tubos estão em contato direto com as chamas. Desta forma o desenvolvimento de materiais capazes de resistir a temperaturas próximas de 1000°C é fundamental para o funcionamento do equipamento.

Na seção de radiação, o arranjo das serpentinas, que ocorre de forma vertical, pode mudar de acordo com cada fabricante de forno, conforme Figura 2.

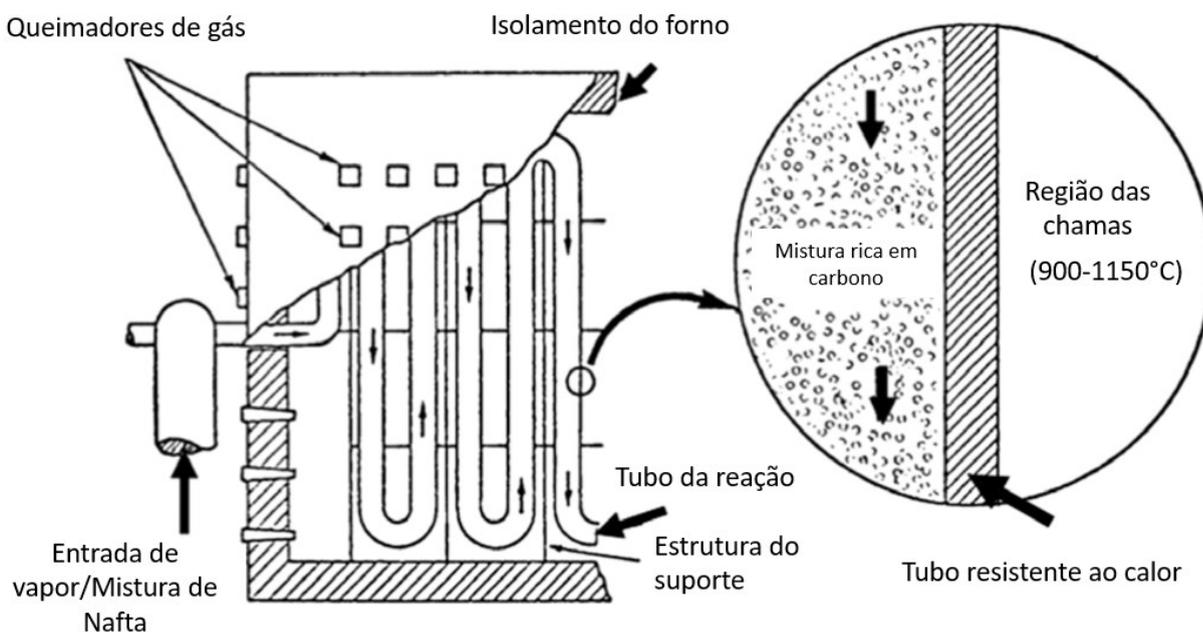
Figura 2 - Arranjo das tubulações na serpentina



Fonte: (SILVEIRA et al., 2002)

A disposição dessas serpentinas geralmente é na vertical com diferentes seções de tubos, por onde o produto passa internamente e na parte externa ocorre o contato direto com as chamas. A Figura 3 representa como ocorre o processo na seção de radiação.

Figura 3 - Esquemático da região da serpentina



Fonte: (TAWANCY, 2009)

O processo de craqueamento de matéria-prima de hidrocarbonetos gasosos ocorre nos tubos do forno, que são aquecidos na superfície externa. Normalmente, os hidrocarbonetos gasosos dentro dos tubos criam um ambiente de carburização, cuja extensão depende do processo específico e das condições de operação (TAWANCY, 2009).

Desta forma, desenvolver ligas que consigam trabalhar nestes ambientes extremos e que tenham uma vida útil considerável é extremamente importante para o desenvolvimento dos equipamentos.

2.2 LIGAS UTILIZADAS NOS FORNOS

Os aços resistentes ao calor são amplamente utilizados em componentes de alta temperatura de fornos de pirólise, especialmente para tubos, devido às boas propriedades de alta temperatura e resistência à oxidação e carburização. Após serviço prolongado em altas temperaturas, danos materiais também podem ocorrer na liga (YANG et al., 2023).

A família de ligas de Fe-Cr-Ni, a qual pertence a classe de aços resistentes ao calor, tem passado por diversas modificações nas composições químicas para buscar a combinação ideal de propriedades necessárias para cada aplicação específica (SWANEPOEL; ESCHBACH, 2021).

Com o avanço tecnológico no desenvolvimento das ligas, geralmente as composições químicas, protegidas por patentes dos fabricantes, recebem algumas denominações básicas como ASTM A297, A351, A567, A608 e sufixo “HP” ou “HK”. A primeira letra “H” indica que o material é apropriado para uso em altas temperaturas, enquanto a segunda letra, a qual pode variar de “A” a “Z”, indica o teor de Cr e Ni da liga, em ordem crescente (SANTANA, 2010).

O aço HP (Fe-25Cr-35Ni) é uma das mais importantes ligas austeníticas, resistentes ao calor, que combina resistência à fluência e à atmosferas oxidantes. Essa classe de aço substituiu as ligas superausteníticas tradicionais à base de níquel, com uma redução substancial de custos e propriedades como resistência à fluência, à oxidação em alta temperatura e ao desgaste por poeira metálica (MOHAMMADNEZHAD et al., 2018).

A liga modificada HP40Nb MA, com o nome comercial Centralloy G4852 Micro, a qual é objetivo deste estudo, contém nominalmente 25% de cromo, enquanto o níquel é elevado para 35%. Adições de 1,5% de nióbio, 0,4% de carbono e quantidades menores de tungstênio são feitas para fornecer à liga, resistência adequada à tração e à ruptura por fluência a temperaturas de até 1130 °C (SWANEPOEL; ESCHBACH, 2021).

No item a seguir, será abordado sobre a influência dos elementos de liga na resistência dos tubos.

2.3 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS TUBOS

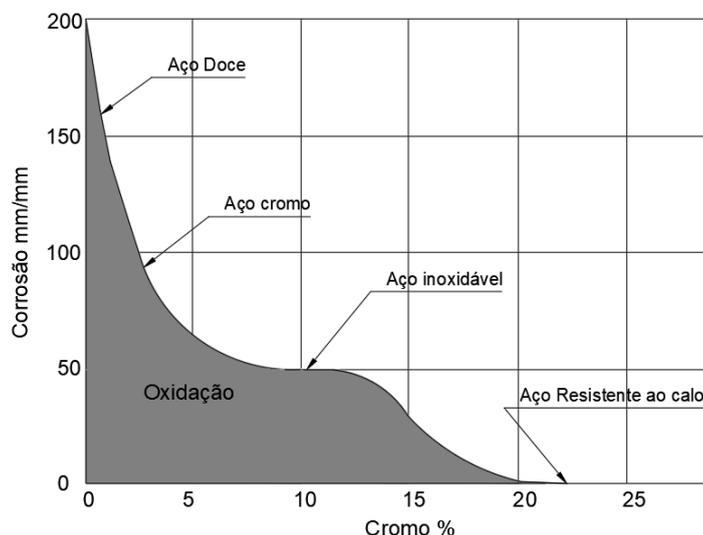
Os elementos de liga têm funções importantíssimas para melhora das propriedades mecânicas e para aumentar a resistência à corrosão, carburização, dentre outros mecanismos de dano.

2.3.1 Cromo

Um dos elementos principais que compõem as ligas HP é o cromo, que tem papel fundamental para a formação da camada passiva. Em atmosferas oxidantes, sob altas temperaturas e para um teor de Cr superior a 20%, ocorre à formação de uma camada protetora superficial estável de Cr_2O_3 (RAMANARAYANAN et al., 1998).

O percentual de cromo é muito importante para a resistência à corrosão. Como estas ligas, resistentes ao calor, possuem mais de 20% de cromo, sua resistência a esse mecanismo de dano é bastante elevada, conforme o gráfico da Figura 4.

Figura 4 - Resistência à corrosão em função da quantidade de cromo



Fonte: (BIEHL, 2002)

A solubilidade do carbono nestes óxidos é praticamente nula, ocorrendo a passagem de carbono somente através de poros e/ou falhas na camada de óxidos. Para a faixa de temperaturas de 800-1000 °C, quando há uma camada de óxidos aderente e não porosa, a carburização é desprezível. Os problemas com a carburização passam a ser encontrados quando ocorre um descascamento ou decomposição desta camada de óxidos protetora (BIEHL, 2002).

O cromo, além de melhorar as propriedades mecânicas a altas temperaturas, através da formação de carbonetos, é o elemento responsável pela resistência à corrosão por gases quentes (SANTANA, 2010).

Gommans e Jakobi (2002) afirmam, que uma maior quantidade de cromo torna a liga mais resistente à oxidação, entretanto introduz uma instabilidade na estrutura, principalmente porque proporciona a formação de fase sigma, a menos que seja compensada com a adição de Ni e outros elementos.

2.3.2 Níquel

Além do cromo, outro elemento muito importante para a característica de resistência destas ligas HP é o níquel, um dos principais elementos de liga nos aços inoxidáveis e das superligas. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A principal função do níquel em ligas Fe-Cr-Ni, com altas concentrações de Ni é a de tornar a estrutura austenítica, aumentando também a resistência à fluência. O níquel apresenta características magnéticas, mas, quando está na forma de solução sólida, em ligas de Fe-Cr-Ni, exibe comportamento paramagnético. A sua influência sobre a austenita é a de aumentar ligeiramente a dureza, mas tende a reter mais carbono na mesma (BIEHL, 2002).

Ao níquel também é atribuída à melhoria na resistência a choque térmico, à fadiga térmica e, principalmente, à carburização, uma vez que, à medida que se aumenta o teor de Ni, a solubilidade e a difusibilidade de carbono na liga diminuem. Outros elementos, tais como carbono, manganês e nitrogênio, ainda que não necessariamente presentes com esse objetivo, podem agir de forma complementar nesse papel (SANTANA, 2010).

2.3.3 Silício

O silício, em condições oxidantes, e quando presente em teores acima de 1,7 % na liga, pode reagir com o oxigênio formando uma camada de SiO_2 , o que fisicamente dificulta a penetração de carbono na matriz (BIEHL, 2002).

Destaca-se que, além da formação de camada protetora, o silício também atua no sentido de reduzir a difusibilidade e a solubilidade do carbono nessa classe de material, papel compartilhado pelo níquel e pelo cobalto (SANTANA, 2010).

Swanepoel e Eschbach (2021) afirmam que adições de Si melhoram a resistência à carburização da liga em atmosferas carburizantes, Lothongkum et al. (2006) ponderam, no entanto, que a adição de silício em grande quantidade pode melhorar esta propriedade, mas diminui a resistência à fluência e à ruptura.

2.3.4 Nióbio

O nióbio, em conjunto com o titânio, forma carbonetos de elevada estabilidade em substituição aos carbonetos de cromo (LOTHONGKUM; THAWEEPORNKHASEMSUKH; WANGYAO, 2006).

Um dos efeitos da inclusão de nióbio está associado ao fato de que esse elemento promove o ancoramento de discordâncias, devido à sua capacidade de formação de carbonetos, o que resulta em um aumento da resistência à fluência (BIEHL, 2002).

2.3.5 Manganês

O manganês, junto com outros elementos como o nitrogênio e o carbono podem ajudar a estabilizar a austenita em conjunto com o níquel (SANTANA, 2010), porém (HERNÁNDEZ, 2015) afirma que o manganês em solução sólida beneficia a absorção de íons Cl^- em aços inoxidáveis austeníticos, exercendo, portanto, um efeito negativo na resistência à corrosão por pite.

2.4 FORMAÇÃO DO COQUE

A formação do coque é um efeito indesejável durante a operação de um forno de pirólise, uma vez que durante a produção, o carbono se deposita nas paredes internas dos tubos, promovendo um aumento da temperatura para que ocorra a reação de pirólise, elevando os custos e degradação dos tubos (MENG; IGUCHI; KOJIMA, 2001).

Geerts et al. (2020) afirmam que poucos modelos fundamentais descrevem a formação de coque e até hoje nenhum deles considera todos os mecanismos da sua deposição. Segundo Van Speybroeck et al. (2007), a formação de coque em unidades de craqueamento térmico é um fenômeno complexo.

No estágio inicial, o coque é formado através de um mecanismo catalítico, principalmente após a perda da camada protetora do óxido (cromo, silício ou alumínio), facilitando a exposição dos elementos químicos níquel e ferro, existentes no material do tubo, os quais têm a capacidade de catalisar a reação de formação do coque (SANTANA, 2010). Uma vez que a superfície metálica esteja coberta com coque catalítico, um mecanismo não catalítico passa a predominar (WAUTERS; MARIN, 2001).

O mecanismo heterogêneo catalítico é dominante nas condições de início de operação em serpentinas do forno limpas. Esse crescimento inicial de coque causa a formação de uma camada fibrosa na parede do reator. Essas fibras poliméricas crescem, se agrupam, se ligam e se reticulam, gerando resistência à difusão para que os monômeros se adicionem aos locais catalíticos (GEERTS et al., 2020), conforme exibido na Figura 5.

Figura 5 - Coque formado por mecanismo catalítico



10 μm

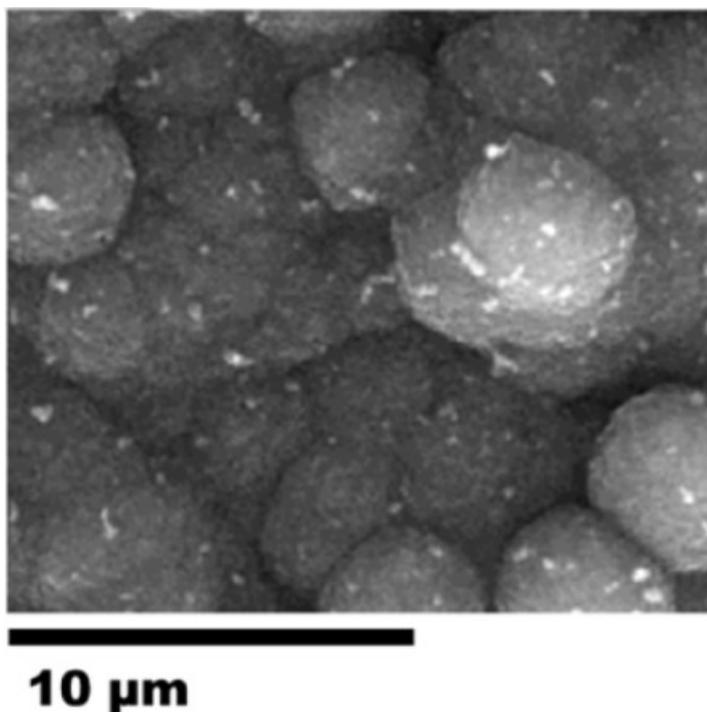
Fonte: (GEERTS et al., 2020)

Durante a fase inicial do serviço, quando os tubos ainda estão limpos, a camada de óxido de cromo serve para reduzir a formação de coque, enquanto a camada de níquel serve como um acelerador para a sua formação (GEERTS et al., 2020).

Kane (1991) chama atenção para este ponto, pois segundo ele a presença de uma maior quantidade de Ni em relação ao Cr na liga favorece a formação do coque catalítico na superfície metálica e isto pode ser agravado se houver conversão dos carbetos $M_{23}C_6$ em M_7C_3 , onde M pode ser ferro, cromo e níquel.

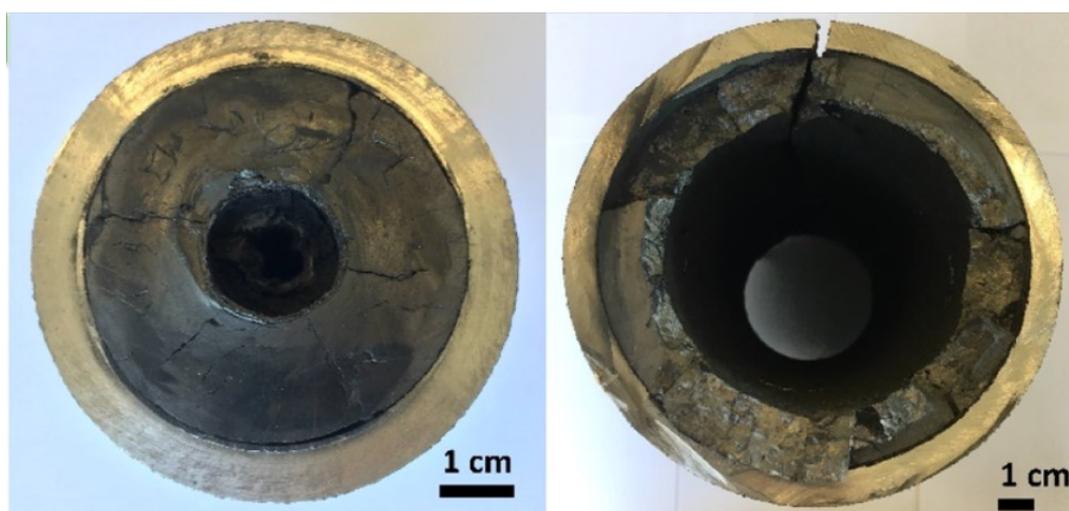
Uma vez que a superfície metálica esteja coberta com coque oriundo do mecanismo catalítico, um mecanismo heterogêneo não catalítico passa a predominar (WAUTERS; MARIN, 2001). Geralmente, concentra-se a atenção no segundo processo, uma vez que o período de formação catalítica de coque é muito curto em relação ao tempo total de operação (VAN SPEYBROECK et al., 2007).

Este mecanismo catalítico está presente durante toda a operação de um reator de craqueamento a vapor e este tipo de coque é mais duro e compacto, por conta das condições de temperatura. A Figura 6 indica a geometria do coque não catalítico.

Figura 6 - Coque não catalítico

Fonte: (GEERTS et al., 2020)

Conforme o avanço da operação do forno, mais camadas de coque vão sendo depositadas na seção transversal do tubo, o que prejudica a eficiência do processo e eleva o risco de falha durante a parada do sistema. A Figura 7 indica diferentes camadas de coque numa tubulação.

Figura 7 - Diferentes camadas de coque numa tubulação

Fonte: (GEERTS et al., 2020)

A imagem do lado esquerdo apresenta quase um fechamento total da seção transversal do tubo, levando o forno a operar numa temperatura mais elevada para aquecer o fluido interno. Para evitar estes cenários é que são feitos os decoques.

2.5 DECOQUE E PARADA DE EMERGÊNCIA

O intervalo de tempo entre desligamentos para limpar o interior dos tubos do processo, é entendido como decoque, porém ao se fazer isso o forno é retirado de operação. Ultimamente tem-se buscado aumentar este intervalo para tornar o processo de produção mais eficaz (BAUKAL; VACCARI; CLAXTON, 2019).

Dependendo de vários fatores, esses fornos de craqueamento normalmente são desligados após períodos de operação de 5 a 100 dias ou mais. O final de campanha de cada forno é determinado pelas máximas temperaturas de metal verificadas nas paredes dos tubos durante o período de operação. Os valores máximos de temperatura de metal são definidos pelo fabricante e o principal critério é a característica metalúrgica do material (SANTANA, 2010).

As paradas para decoque ocorrem de certa forma programada, já as paradas de emergência, ocorrem quando alguma anormalidade operacional acontece. Neste caso, os tubos saem da temperatura de operação, algo em torno de 1000°C para a temperatura ambiente, enquanto no decoque a temperatura do forno é controlada.

Neste cenário, devido a formação do coque e a elevada variação de temperatura podem ocorrer falhas nos tubos por conta da diferença entre coeficientes de expansão térmica.

2.6 CARBURIZAÇÃO

A carburização é um mecanismo de degradação em alta temperatura, causado pelo ingresso e difusão de carbono a partir do meio em componentes metálicos existentes em vários processos industriais, dos quais se destacam aqueles relacionados à produção de etileno por craqueamento térmico. Neste caso, o metal é considerado carburizado se o teor de carbono na liga exceder ao valor nominal deste elemento químico no material, que corresponde a sua condição original, antes de entrar em serviço pela primeira vez (METALS HANDBOOK, 1998).

O dano por carburização tem sido a principal razão para a substituição dos tubos das serpentinas a curto prazo. A degradação das propriedades microestruturais e mecânicas destas peças é um fator importante na redução da vida útil do aço HP (SILVA et al., 2023).

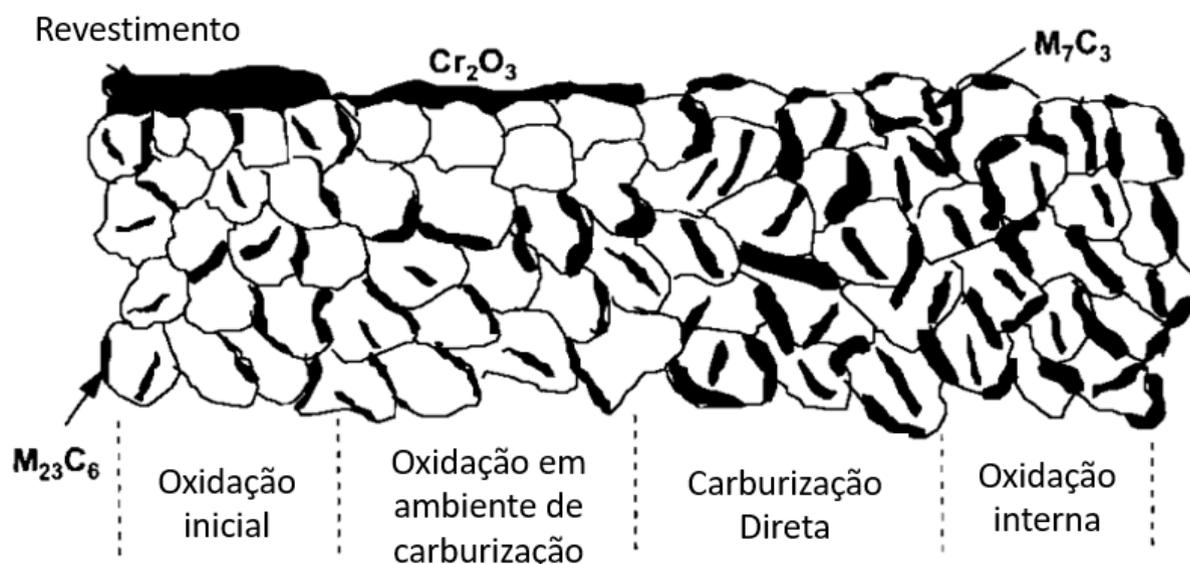
Este mecanismo de degradação resulta na formação de uma camada de carbono no interior das seções mais quentes das serpentinas durante a operação, aumentando o peso líquido do tubo e promovendo a difusão de carbono na matriz da liga com o tempo e a temperatura crescente (SANTOS et al., 2015).

A carburização pode degradar tanto a resistência a condições ambientais quanto a resistência mecânica de ligas em altas temperaturas devido à precipitação de vários tipos de carbonetos ricos em cromo. E essa condição pode ser agravada pela formação de uma camada de coque aderente. A camada de coque existente atua como um isolante térmico, exigindo uma temperatura mais alta para manter o processo, o que acelera a taxa de carburização, bem como o dano por fluência (SHEN et al., 2016).

Quando o material da tubulação é submetido à condição de operação em torno de 1000°C, a camada de óxido de cromo (Cr_2O_3) torna-se instável termodinamicamente, favorecendo, então, a difusão do carbono do meio para a matriz e, portanto, a carburização (BIEHL, 2002).

Conforme demonstrado na Figura 8, em temperaturas entre 550°C até 950°C, a liga ao ser exposta a um ambiente oxidante, favorável à carburização, aumenta-se a quantidade dos carbonetos M_7C_3 e M_{23}C_6 .

Figura 8 - Modelo da evolução microestrutural da oxidação e carburização

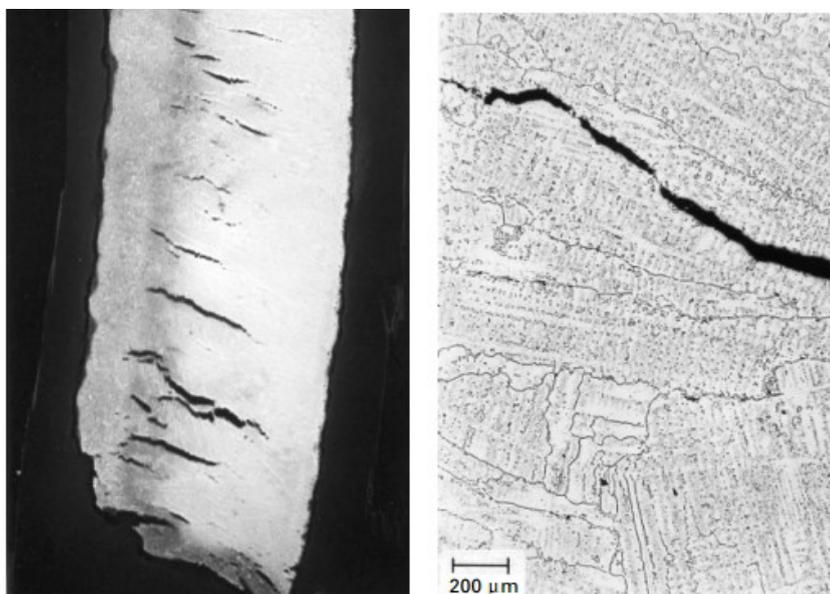


Fonte: (RAMANARAYANAN et al., 1998)

Com a barreira protetiva de cromo sendo instabilizada e em paralelo a isso a presença do coque, o carbono começa a se difundir na matriz do aço. Desta forma, a condição inicial da liga de paramagnética altera-se para ferromagnética.

Segundo Harston e Ropital (2007) a carburização provoca uma redução significativa da ductilidade e tenacidade da liga e com o aumento do volume do material metálico carburizado, surgem tensões entre a região carburizada e não carburizada, sendo este um dos principais motivos para a ocorrência de trincas nas serpentinas dos fornos, conforme Figura 9.

Figura 9 - Avaliação metalúrgica de um tubo sob efeito da carburização. (a) Visão das trincas internas e (b) detalhe da trinca



Fonte: (HARSTON; ROPITAL, 2007)

2.7 MECANISMOS DE FALHAS NOS TUBOS

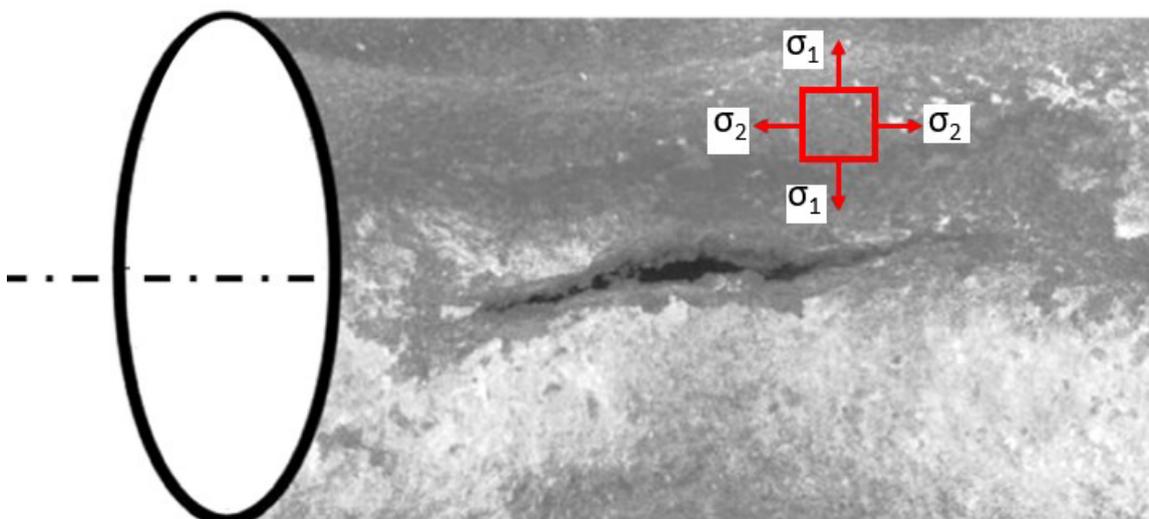
Mohammadnezhad et al. (2018) afirmam que a precipitação de carbeto, devido à carburização, gera mudanças nas propriedades mecânicas, que normalmente resultam em maior resistência, porém, em perda de ductilidade à temperatura ambiente, levando a potenciais problemas de reparo durante paralisações.

Essas mudanças no material provocam falhas nos tubos das serpentinas que podem ser de forma frágil, ou até dúctil, quando não há um nível alto de degradação. Segundo Santana (2010) historicamente as falhas registradas nas serpentinas localizada na radiação dos fornos podem apresentar predominantemente, dois

aspectos, ou seja, rompimento com comportamento dúctil e ocorrência de fratura frágil.

As trincas, conforme descrito nas referências, dentre elas, Santana (2010) Tawancy (2009) e na experiência de campo é de propagação longitudinal, devido às tensões circunferenciais que são geradas durante a parada de emergência do forno. Conforme a Figura 10, pode ser visto que a causa da propagação das trincas são as tensões σ_1 .

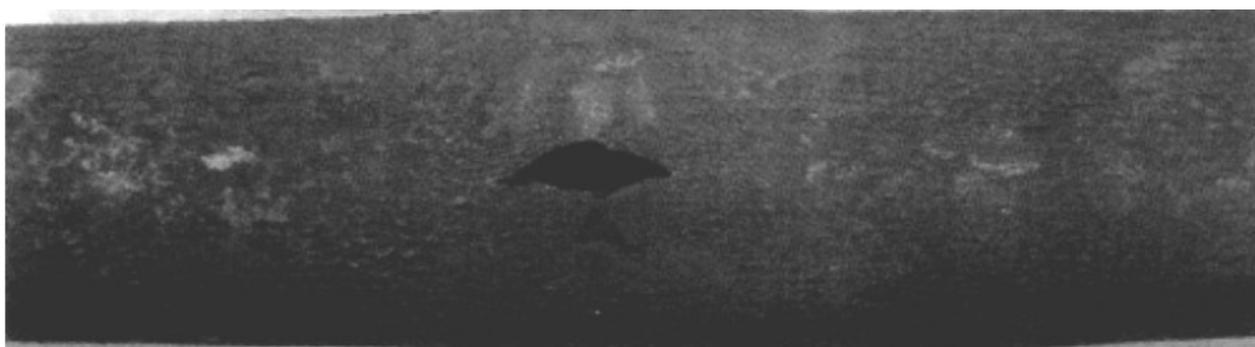
Figura 10 - Trinca longitudinal de um tubo de serpentina



Fonte: (TAWANCY, 2009), adaptado pelo autor.

No caso da fratura dúctil, que ocorre precedida de deformação plástica, há uma associação sinérgica entre a carburização e a fluência. Segundo Santana (2010), com a carburização há um aumento no volume específico do material, com a precipitação de novos carbonetos que, por sua vez, elevará as tensões internas e conseqüentemente a um incremento na taxa de deformação por fluência, conforme indicado na Figura 11.

Figura 11 - Formação de trinca longitudinal e fratura dúctil



Fonte: (HARSTON; ROPITAL, 2007)

O comportamento da fratura frágil também se dá por trincas longitudinais, porém não se observam deformações aparentes na região, conforme Figura 12. Este mecanismo de fragilização está associado à perda de tenacidade causada pela carburização.

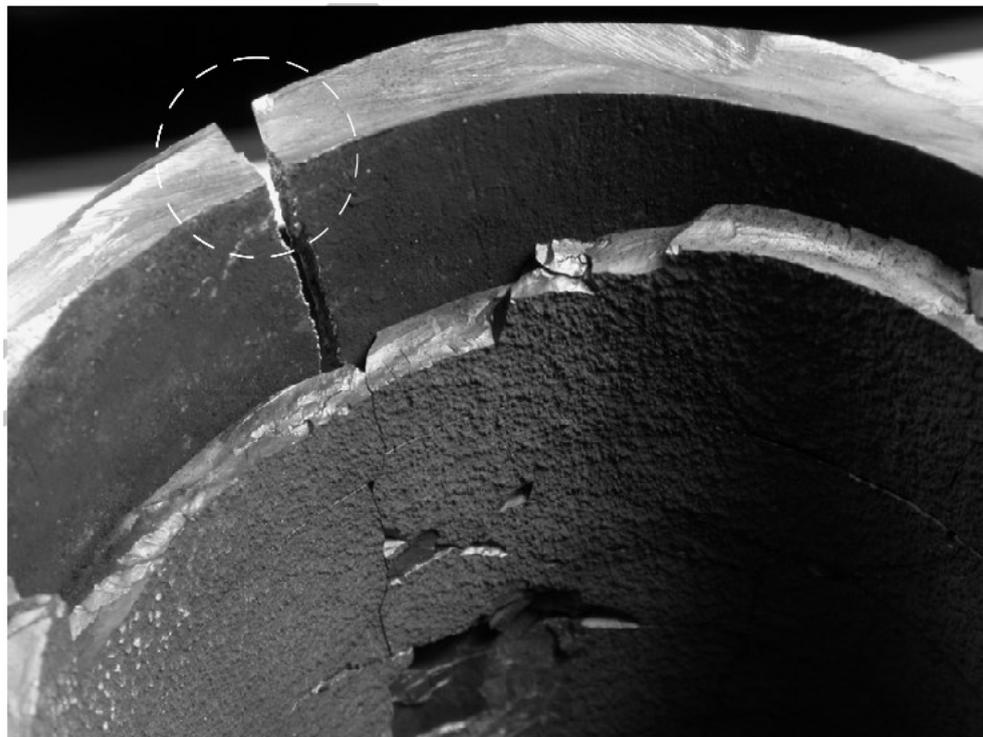
Figura 12 - Fratura frágil nos tubos da serpentina, por conta da carburização e tensões geradas no resfriamento do forno



Fonte: (OTEGUI; BONA; FAZZINI, 2015)

Na Figura 13, pode-se observar a camada de coque e o percurso da trinca, sem praticamente nenhuma deformação aparente na região.

Figura 13 - propagação da trinca no tubo da serpentina

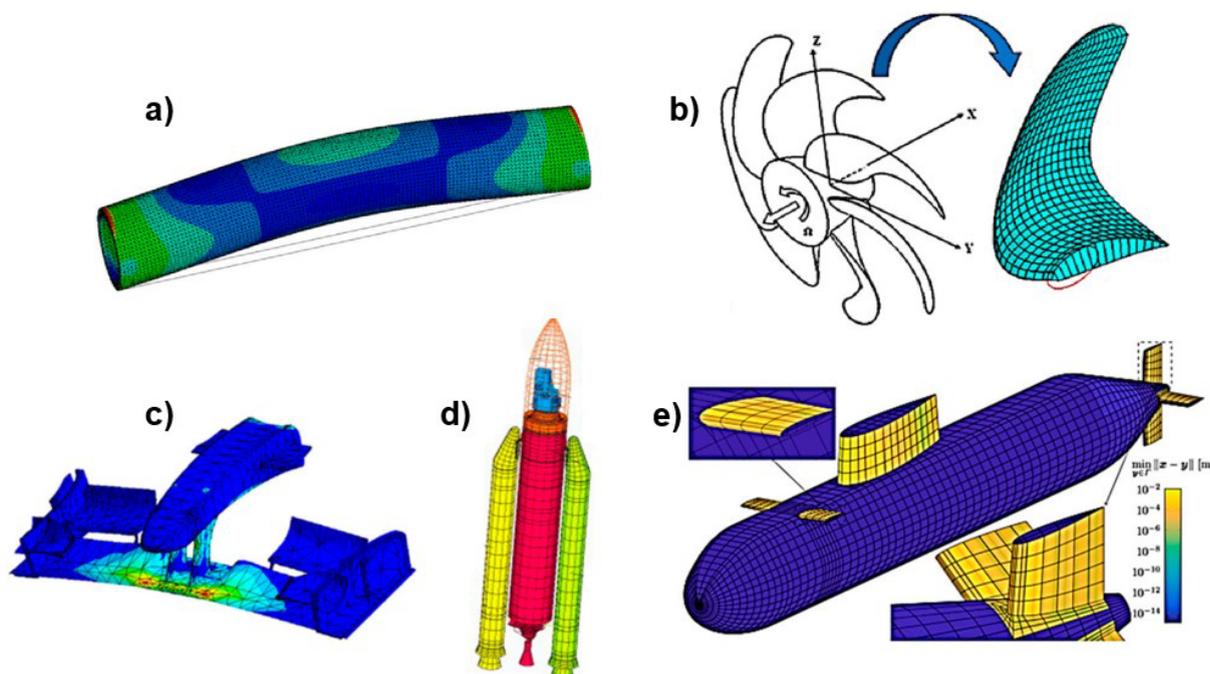


Fonte: (OTEGUI; BONA; FAZZINI, 2015)

2.8 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Atualmente, os procedimentos de elementos finitos são amplamente utilizados em análises de problemas de engenharia. Os procedimentos são empregados extensivamente na análise de sólidos e de estruturas e na transferência de calor e fluidos. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é útil em praticamente todos os campos da análise de engenharia (SOUZA, 2021). A Figura 14 expõe alguns, dentre vários ramos nos quais o MEF pode atuar.

Figura 14 - Campos de aplicação do MEF: (a) indústria de óleo e gás, (b) indústria naval, (c) esportes, (d) indústria aeroespacial, (e) naval voltada para defesa



Fonte: (DAVID et al., 2020)

No geral, segundo Azevedo (2003) o MEF tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Isto é determinado através de uma análise matemática, em que um meio contínuo é fragmentado em vários elementos, que mantêm as propriedades materiais idênticas às originais. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos (SORIANO, 2003).

Essas análises pelo MEF podem ser feitas através de modelos lineares e não lineares, que dependem da situação do problema, da magnitude dos esforços e deslocamentos, dentre outros fatores.

Uma análise linear é realizada assumindo que os deslocamentos nodais são muito pequenos a ponto de em relação ao tamanho da estrutura ser praticamente nulo. Outro ponto considerado é linearidade elástica do material, ou seja, neste tipo de avaliação não ocorre encruamento, portanto, não é considerada a plastificação. Também nesta análise não ocorre modificação das condições de contorno durante a aplicação das cargas (SOUZA, 2021).

Não se pode prever se haverá falha quando ao se avaliar um problema elasticamente e a tensão resultante for maior que o limite de escoamento do material,

mas sim que haverá deformações permanentes. Para saber com mais precisão se haverá falha deverá ser utilizada a análise não linear.

Os tipos de análises não lineares podem ser diversos, dentre os principais tipos existe a não linearidade geométrica e física. A não linearidade geométrica ocorre, quando após a aplicação da carga, a estrutura se deforma muito, logo as equações de equilíbrio elásticas deixam de ser válidas necessitando ser reformuladas a cada mudança de geometria, causando perda de linearidade nas relações deslocamento e deformação (SOUZA, 2021).

Enquanto que, a não linearidade física, de forma simplificada caracteriza-se como a relação não linear entre a tensão e deformação do material, caso ocorra uma plastificação na estrutura por conta dos esforços, a esta nova deformação e tensão são consideradas, ou seja, um novo módulo tangente.

O MEF empregado nesse estudo, baseia-se em equações matemáticas, cujo princípio básico são as forças, deslocamentos e rigidez de uma mola. Ao se aplicar uma força, devido a rigidez se obtém um deslocamento. Um modelo qualquer é discretizado em vários nós e a ligação de um nó como o outro é entendido como uma mola que possui uma determinada rigidez. Isto é montado numa matriz, chamada matriz de rigidez (ALVES FILHO, 2013).

$$\{f\} = [k]. [d] \quad (1)$$

Onde:

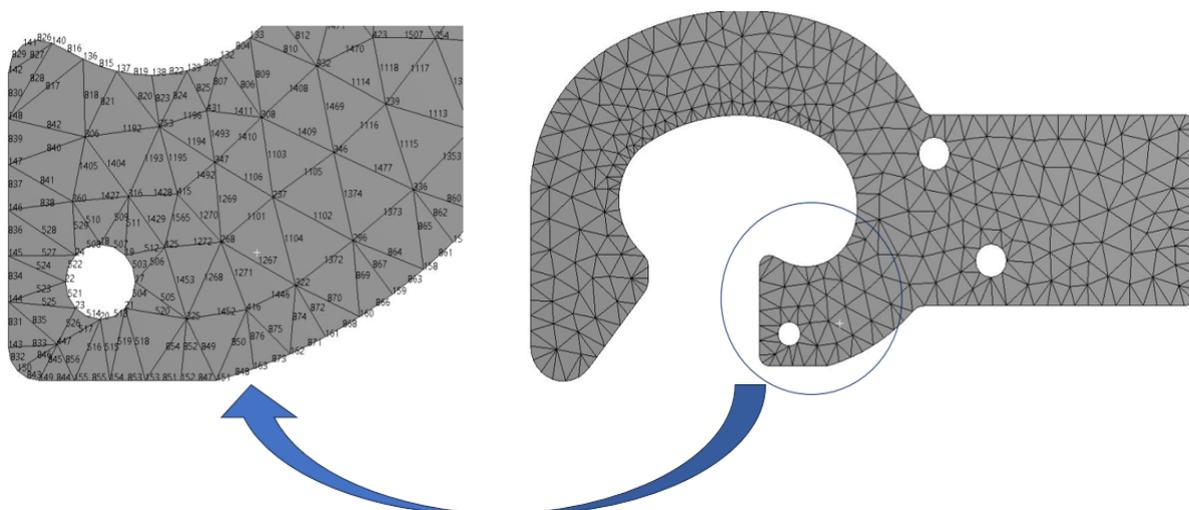
$\{f\}$ = Matriz da coluna em que são representadas as forças que atuam nos nós do elemento;

$[k]$ = Matriz quadrada contendo os coeficientes de rigidez;

$[d]$ = Matriz coluna em que são representados os deslocamentos associados aos nós do elemento.

Alves Filho (2013), afirma que a única diferença entre o exemplo isolado de uma mola e das estruturas reais, é que o modelo representativo destas últimas é constituído de muitos elementos, conforme indicado na Figura 15, e como consequência, de muitos componentes de deslocamentos a se determinar. A partir destes, são obtidas as deformações nos elementos e finalmente, as forças internas ou as tensões.

Figura 15 – Discretização dos modelos



Fonte: (ESSS, 2023)

Na Figura 15 é possível visualizar que a peça discretizada através de elementos de placa possuem vários elementos e nós que são numerados e utilizados na matriz do programa para o cálculo.

Como a rigidez do sistema depende do material, comprimento do elemento e da área, conhecidos os deslocamentos através da matriz de rigidez, apresentadas na equação 1, pode-se determinar as forças internas de cada elemento, através da equação:

$$F_e = \frac{E.A}{L} \cdot (u_2 - u_1) \quad (2)$$

Onde:

F_e = Força interna no elemento;

E = Módulo de elasticidade do material;

A = Área do elemento;

L = Comprimento do elemento;

u_1 = Deslocamento inicial;

u_2 = Deslocamento final.

Através da determinação dos esforços internos, é possível obter as tensões, deformações e deslocamentos na estrutura, através de algumas equações básicas da mecânica geral, conforme descrito abaixo:

$$\sigma = \frac{Fe}{A} \quad (3)$$

Onde:

σ = Tensão normal.

$$\varepsilon = \frac{E}{\sigma} \quad (4)$$

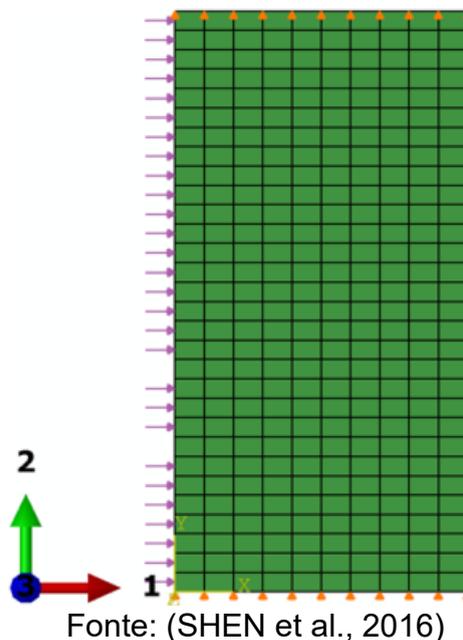
Onde:

ε = Deformação.

Após o entendimento matemático básico do método, como abordado acima, o MEF pode ser usado em várias áreas da engenharia para solucionar diversos tipos de problemas, através de informações das propriedades do material, geometria do modelo e condições de contorno. Este método também tem sido utilizado para resolver problemas envolvendo a carburização, conforme trabalhado por alguns pesquisadores.

Shen et al. (2016), desenvolveu modelos de elementos finitos para avaliar a carburização em tubos dos fornos da serpentina, utilizando um modelo 2D axissimétrico. O modelo utilizado está descrito na Figura 16. O autor avaliou o avanço da carburização com o tempo de operação e altas temperaturas, tensões combinadas de von Mises, máximas e mínimas principais, todavia não chegou a avaliar uma parada de emergência do forno com camadas de coque.

Na Figura 16, é possível visualizar a malha criada para a análise, as condições de contorno aplicadas nas extremidades superiores e inferiores e os carregamentos na aresta lateral esquerda. Com este trabalho, foi possível concluir que utilizar menores temperaturas no forno, a vida útil dos tubos é muito maior e que a resistência à carburização é melhorada com o aumento da relação Ni sobre o Cr mais Fe ou dos elementos de liga Ni e Cr.

Figura 16 - Modelo de elementos finitos com malha e carregamentos

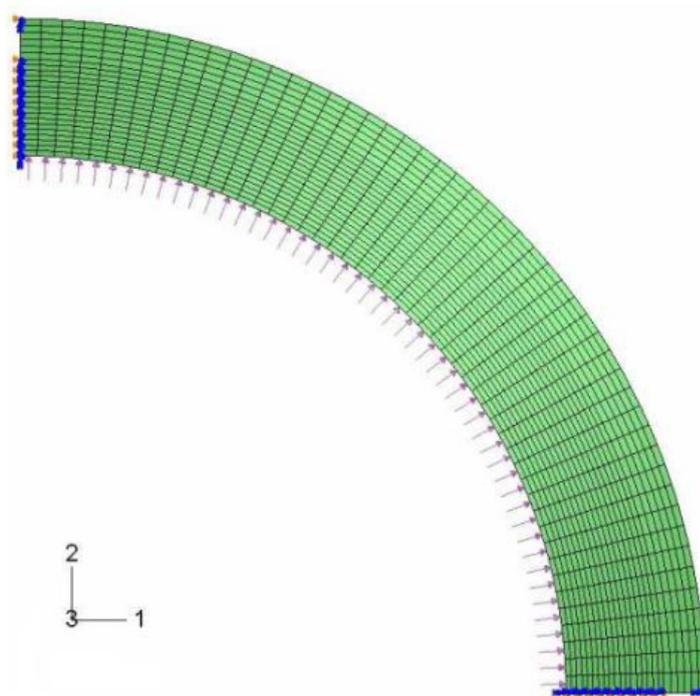
Fonte: (SHEN et al., 2016)

Santos et al. (2015), trabalharam com um modelo de elementos finitos para compreender os fenômenos de degradação das serpentinas dos fornos de pirólise da planta petroquímica da Repsol em Portugal. Foram avaliadas as tensões combinadas de von Mises, momento fletor e os deslocamentos para o conjunto dos tubos, a fim de verificar a localização dos pontos críticos nas serpentinas.

Os cenários avaliados envolveram o aquecimento do sistema e a deposição do coque como uma carga distribuída. Todavia, não se avaliou uma parada de emergência e a restrição do coque. A partir deste trabalho, foi possível concluir que a vida útil operacional das serpentinas pode ser estendida ajustando o perfil de temperatura, tanto durante a operação atual quanto durante o decoque.

Shen et al. (2015), estudaram através do MEF como o aço Cr25Ni35Nb e Cr35Ni45Nb são solicitados no tocante a tensão térmica e a distribuição de temperatura com diferentes camadas de coque no tubo. Na Figura 17, é possível verificar que o autor utilizou 1/4 da seção do modelo do tubo, como forma de simplificar e reduzir o tempo de análise. Neste modelo, também é possível visualizar a malha, condições de contorno e carregamentos. Os resultados encontrados indicaram que as tensões máximas circunferenciais foram encontradas na região de transição entre o coque e o metal e que estas tensões foram maiores no aço Cr35Ni45Nb do que no Cr25Ni35Nb.

Figura 17 - Condições de contorno e carregamento do modelo

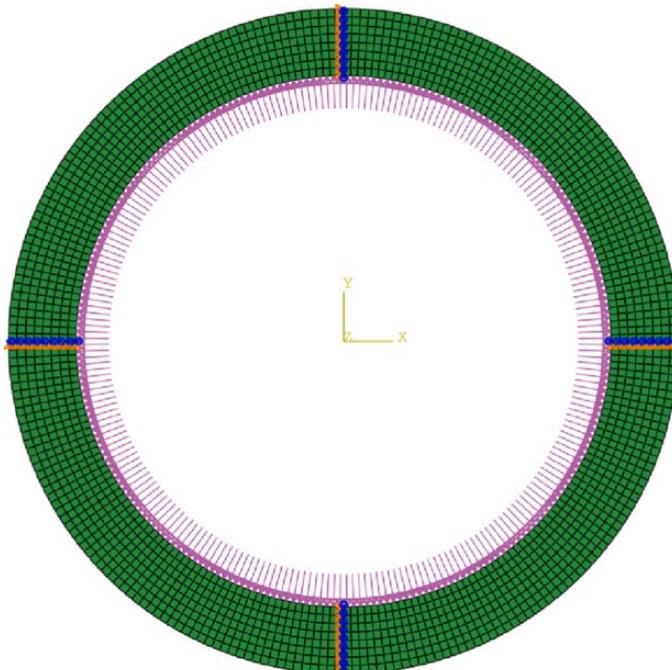


Fonte: (Shen et al., 2015)

Fuyang et al. (2022) desenvolveram um modelo de elementos finitos, para prever o acúmulo heterogêneo de danos no tubo de forno de craqueamento feito de liga HP40Nb em um ambiente acoplado de fluência e carburização. O objetivo do trabalho foi prever em quantas horas de operação poderia ocorrer a falha, todavia não foi levada em consideração a camada de coque.

Conforme indicado na Figura 18, o autor modelou toda a seção transversal do tubo, utilizou uma malha do tipo quadrangular, aplicou os carregamentos e condições de contorno. Verificou-se que ao se chegar a 59600 h de operação e a carburização atingir em torno de 50% da seção, ocorre a falha.

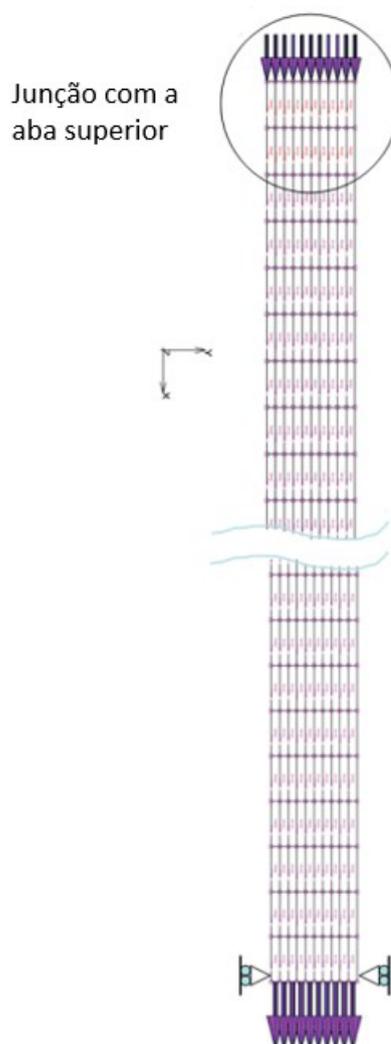
Figura 18 - Modelo de elementos finitos com condições de contorno e carregamentos



Fonte:(FUYANG et al., 2022)

Popova e Oryshchenko (2023), também avaliaram tubos de serpentina utilizando o MEF, para verificar as tensões e deformações com o objetivo de entender a ocorrência de falha prematura no forno. Foi desenvolvido um modelo unifilar semelhante ao realizado por Santos et al. (2015), porém sem considerar o coque. As condições de contorno, aplicados carregamentos e as seções de divisões dos tubos visualizados na Figura 19.

Figura 19 - Modelo de elementos finitos da serpentina do forno



Fonte: (Popova e Oryshchenko, 2023)

Conforme indicado nesta seção, alguns autores que trabalharam com o MEF para avaliar falhas em tubos das serpentinhas utilizaram diferentes maneiras de modelagem e análise. Todavia, um mesmo modelo que tivesse a análise do efeito da carburização, espessura da camada de coque e redução de temperatura por paradas de emergência não foi encontrado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada neste trabalho para se obter os resultados apresentados, tanto para as análises que foram feitas através do método linear, onde não é considerado o encruamento do material, ou seja, só têm um módulo de elasticidade, como para o método não linear, onde são consideradas a parte do encruamento do material, devido a não linearidade entre a tensão e deformação após o limite de escoamento.

3.1 MATERIAL

Neste trabalho, o objeto de estudo foi a liga Austenítica HP40 micro ligada fornecida pela Schmidt & Clemms do Brasil com a codificação G4852 Micro. Esta liga foi escolhida por ser a mais utilizada nos fornos da Braskem, na unidade Químicos 1, localizada na cidade de Camaçari Bahia e também por apresentar o maior histórico de falhas.

Nas tabelas abaixo, são indicadas a composição química e as propriedades mecânicas desta liga.

Tabela 1 - Composição química da liga HP40 G4852

Elemento	Composição (% em peso)
C	0,45
Si	1,5
Mn	1
Cr	25
Ni	35
Nb	1,5

Fonte: (SCHMIDT+CLEMENS, 2009)

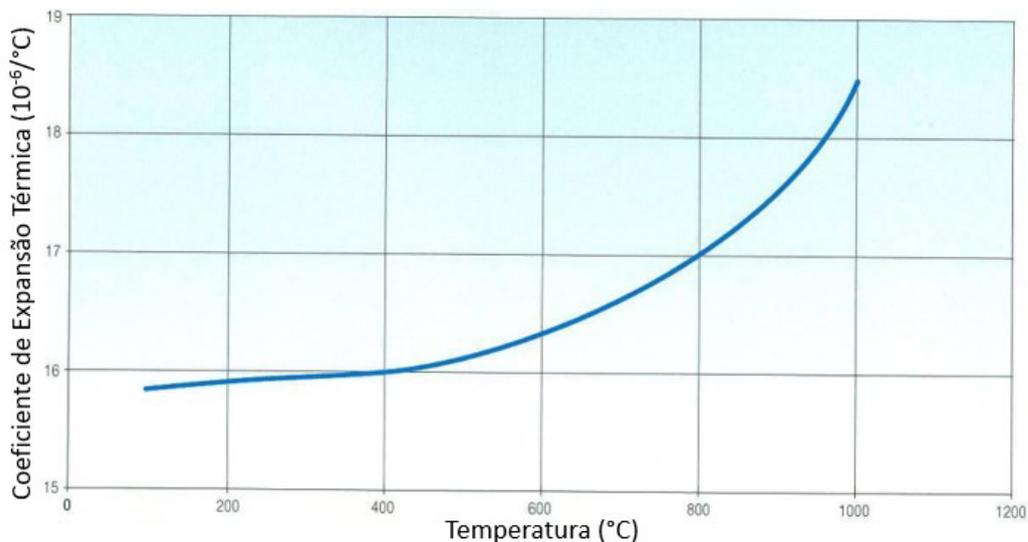
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas da liga HP 40 G4852 à 25°C

Propriedade Mecânica	Valor
Limite de Escoamento (MPa)	230
Limite de Resistência à tração (MPa)	470
Alongamento (%)	8
Módulo de Elasticidade (GPa)	170
Coefficiente de expansão Térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	15,8
Coefficiente de Poisson	0,29
Peso Específico (g/cm^3)	8,0

Fonte: (SCHMIDT+CLEMENS, 2009)

As propriedades mecânicas sofrem variação conforme a mudança de temperatura, desta forma os valores obtidos do módulo de elasticidade, limite de escoamento, limite de resistência à tração, coeficiente de expansão térmica em função da temperatura estão indicadas nas figuras a seguir.

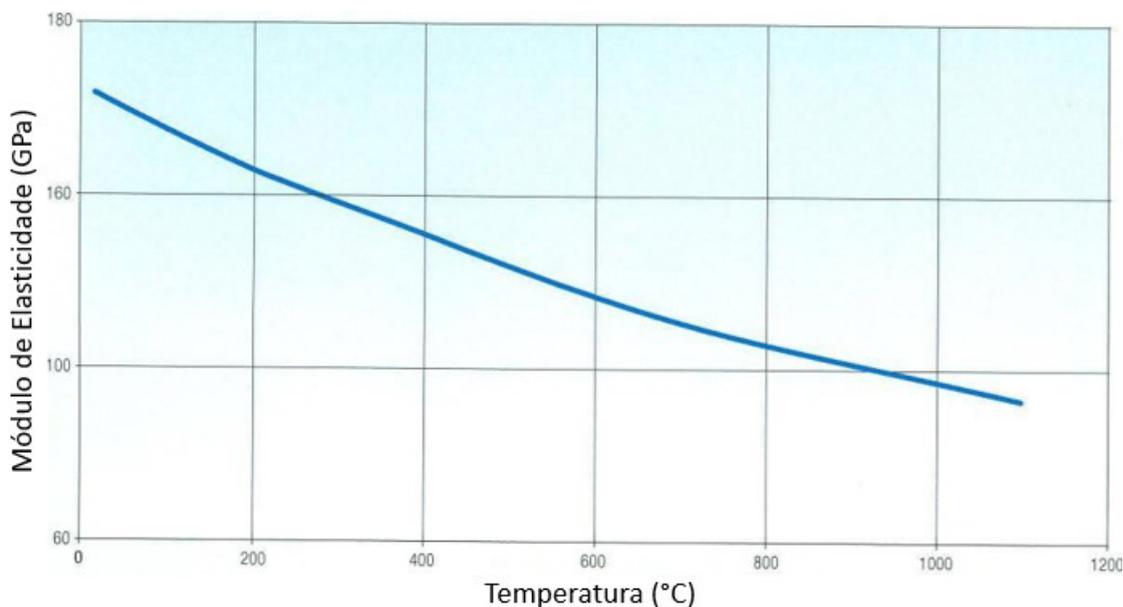
Figura 20 - Coeficiente de expansão térmica



Fonte: (SCHMIDT+CLEMENS, 2009)

Conforme informado na Figura 20, ocorre uma variação considerável do coeficiente de expansão térmica em função da temperatura. A Figura 21 a seguir apresenta a variação do módulo de elasticidade para diferentes temperaturas, no caso específico deste trabalho a variação será de 1000°C a 25°C.

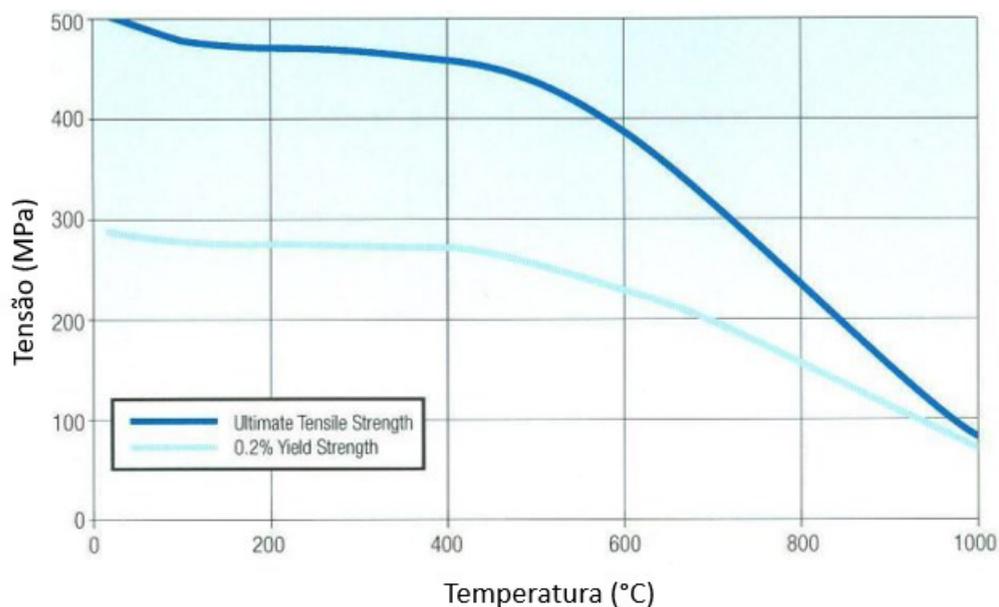
Figura 21 - Módulo de Elasticidade



Fonte: (SCHMIDT+CLEMENS, 2009)

A Figura 22, a seguir apresenta a variação tanto do limite de escoamento, como o limite de resistência à tração do material, percebe-se uma proximidade do valor conforme o aumento da temperatura ao se aproximar da região da fluência.

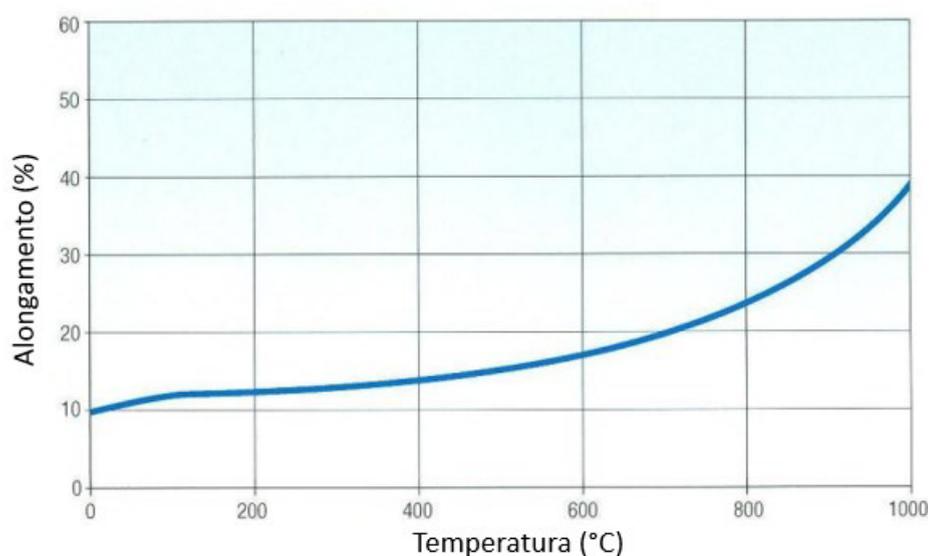
Figura 22 - Variação do limite de escoamento e limite de resistência à tração



Fonte: (SCHMIDT+CLEMENS, 2009)

A Figura 23 indica a variação do alongamento do material, quando submetido a temperaturas diferentes, que ocorre justamente o contrário do ocorrido na Figura 22, ao se aumentar a temperatura o valor aumenta.

Figura 23 - Variação do alongamento em função da temperatura



Fonte: (SCHMIDT+CLEMENS, 2009)

Utilizando as informações retiradas das curvas (através do software AutoCad) apresentadas nas figuras acima, foi criada a Tabela 3, com o objetivo de sintetizar as informações.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas para o material novo

Temperatura (°C)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)	Alongamento no escoamento (mm/mm)	Alongamento final (mm/mm)
25	172	230	470	0,0013	0,1
200	162	230	470	0,0014	0,12
400	150	230	450	0,0015	0,14
600	125	210	390	0,0017	0,18
800	110	150	230	0,0014	0,23
1000	90	70	80	0,0008	0,38

Fonte: Próprio Autor

Os valores descritos na Tabela 3 se referiram à liga HP nova com informações inclusive fornecidas pelo próprio fabricante, porém como neste estudo deve-se simular diferentes condições é necessário utilizar as informações e propriedades mecânicas do tubo carburizado e do coque.

3.1.1 Coque

O coque se comporta como um material refratário restringindo o resfriamento do tubo da serpentina. Abaixo na Tabela 4 estão indicadas as propriedades mecânicas encontradas no trabalho de Green (1998).

Tabela 4 - Propriedades do Coque

Propriedade Mecânica	Valor
Módulo de Elasticidade (GPa)	400
Coefficiente de expansão Térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	6,4
Coefficiente de Poisson	0,1

Fonte: (GREEN, 1998)

Nestes dados é possível verificar que o coque apresenta propriedades mecânicas características de materiais cerâmicos, com um elevado módulo de elasticidade e um baixo coeficiente de expansão térmica.

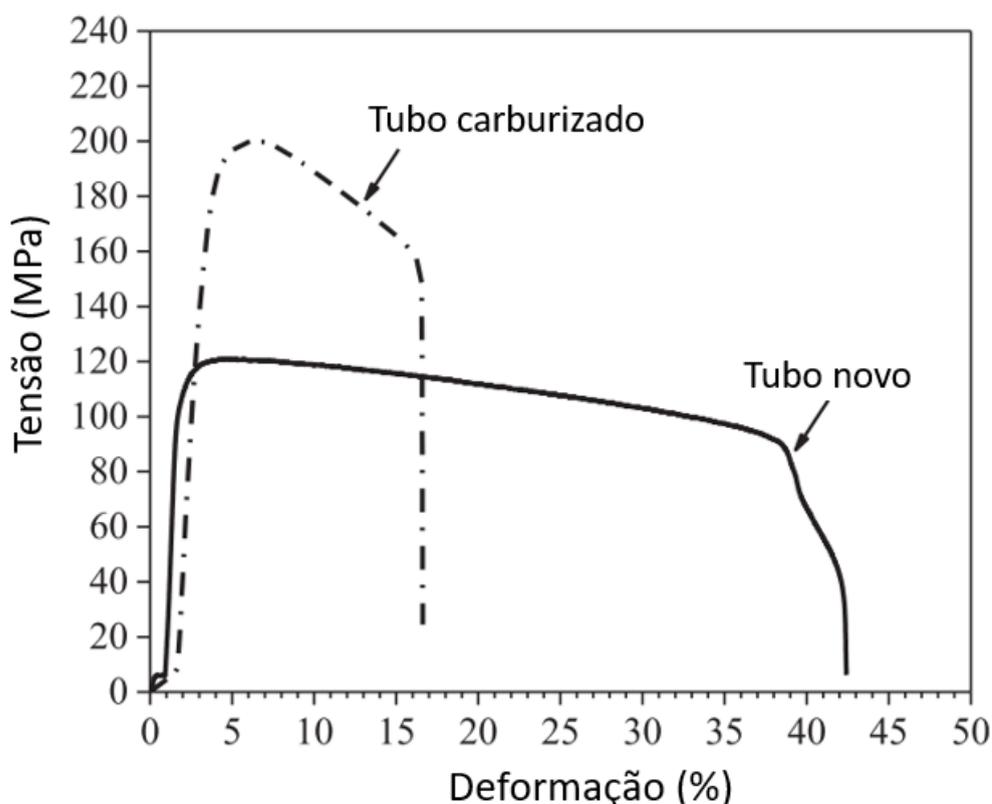
3.1.2 Material Carburizado

As propriedades mecânicas, como limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento do material carburizado, após pesquisa em vários artigos e trabalhos publicados sobre o tema, foram retirados de Han et al. (2019).

O módulo de elasticidade foi considerado o mesmo do material novo, como uma forma de simplificação da análise pelo MEF, isto porque, nas referências bibliográficas alguns autores como Xu et al. (2020), afirmam que não houve alteração do módulo de elasticidade, porém a pesquisa foi feita após uma carburização superficial e para uma liga diferente da analisada neste trabalho.

Outros autores como Guo et al. (2020), fizeram ensaios no mesmo material estudado neste trabalho, na forma carburizada e não carburizada e encontraram valores com pequenas diferenças, conforme pode ser visto no gráfico do ensaio feito a 900°C apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Ensaio do material carburizado e não carburizado



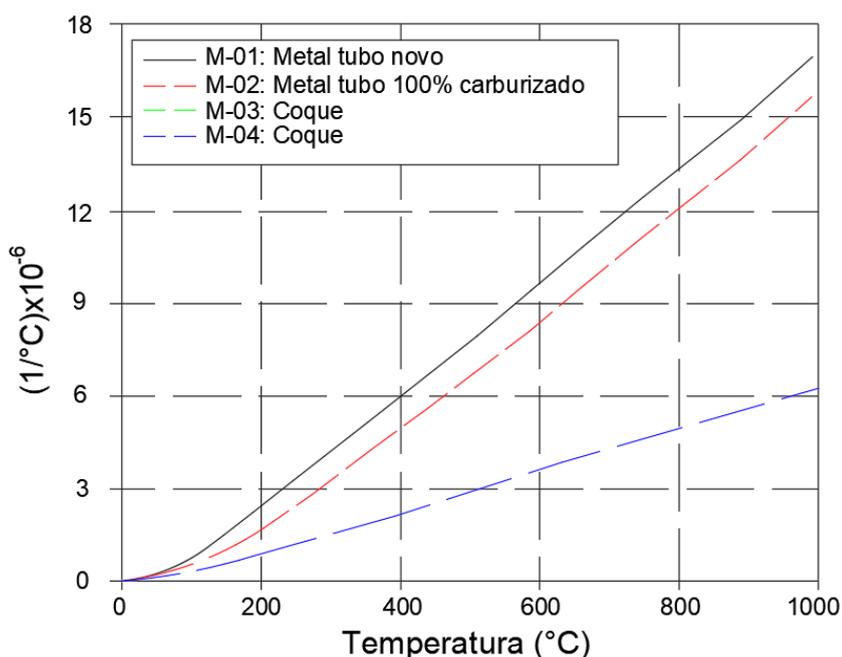
Fonte: (GUO et al., 2020)

O que chama atenção no gráfico é a perda da capacidade do material em se deformar plasticamente e o aumento do limite de resistência à tração, devido ao endurecimento, por conta da carburização.

Diante do exposto, o autor resolveu adotar o mesmo valor, tanto como forma de simplificação, quanto por analisar uma certa contradição dos valores, o que pode ser somente uma questão de aproximação de medição.

Quanto a variação do coeficiente de dilatação, foi considerado que o valor é em torno de 7% menor do que o valor do material novo, conforme imagem representado na Figura 25.

Figura 25 - Coeficiente de dilatação dos materiais



Fonte: (Santana, 2010)

Na Tabela 5, têm-se a descrição dos valores das propriedades do material carburizado em função da temperatura. Para as temperaturas intermediárias do resfriamento, foi utilizado um método de aproximação conforme será descrito na seção dos métodos deste capítulo.

Tabela 5 - Propriedades Mecânicas do material carburizado

Temperatura (°C)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)	Alongamento no escoamento (mm/mm)	Alongamento final (mm/mm)
25	172	326	414	0,0019	0,0300
200	162	326	414	0,0020	0,0450
400	150	326	396	0,0022	0,0630
600	125	298	358	0,0024	0,0820
800	110	194	338	0,0018	0,1000
1000	90	72	112	0,0008	0,1188

Fonte: Próprio Autor.

3.1.3 Equipamentos Utilizados

A modelagem do sistema foi realizada numa máquina Dell Inspiron 153511, processador *Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz*, 8 Gb de memória *RAM*, através dos *softwares Ansys Workbench 2023 R2*, utilizando a licença estudantil e também o *software Autodesk Simulation Mechanical 2012*.

3.2 MÉTODOS

Com os dados dos materiais obtidos, as análises pelo método de elementos finitos puderam ser realizadas, já que as entradas necessárias para o programa foram encontradas. Foram realizados 2 tipos de simulações numéricas, a linear elástica e a não linear.

A análise linear é feita com o objetivo de encontrar as tensões e deformações antes do material sofrer deformações plásticas, ou seja, quando o material ainda está na região elástica. Caso, se verifique tensões acima do limite de escoamento do material, para uma maior precisão dos resultados, deve-se utilizar as simulações não lineares.

As simulações não lineares, consistem em avaliar as tensões e deformações do material após a região elástica, ou seja, quando se têm um módulo de elasticidade diferente por conta da deformação. No programa *Ansys* tem alguns tipos de análises não lineares, sendo escolhida a análise com material bilinear, por conta dos dados disponíveis encontrados na literatura.

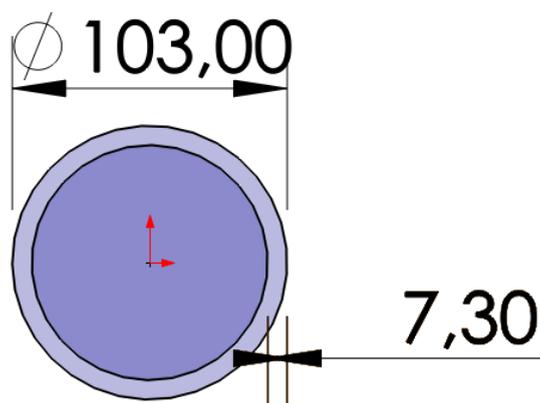
3.2.1 Análise Linear

3.2.1.1 Modelagem 3D

A primeira parte da análise foi feita criando o modelo em CAD 3D com 1/4 da seção do tubo, a fim de reduzir o tempo de computação, já que podem ser utilizadas condições de contorno de simetria no software, não sendo necessário desta forma, modelar toda a seção.

A seção transversal do tubo estudado está representada na Figura 26 com um diâmetro externo de 103 mm e espessura de 7,3 mm.

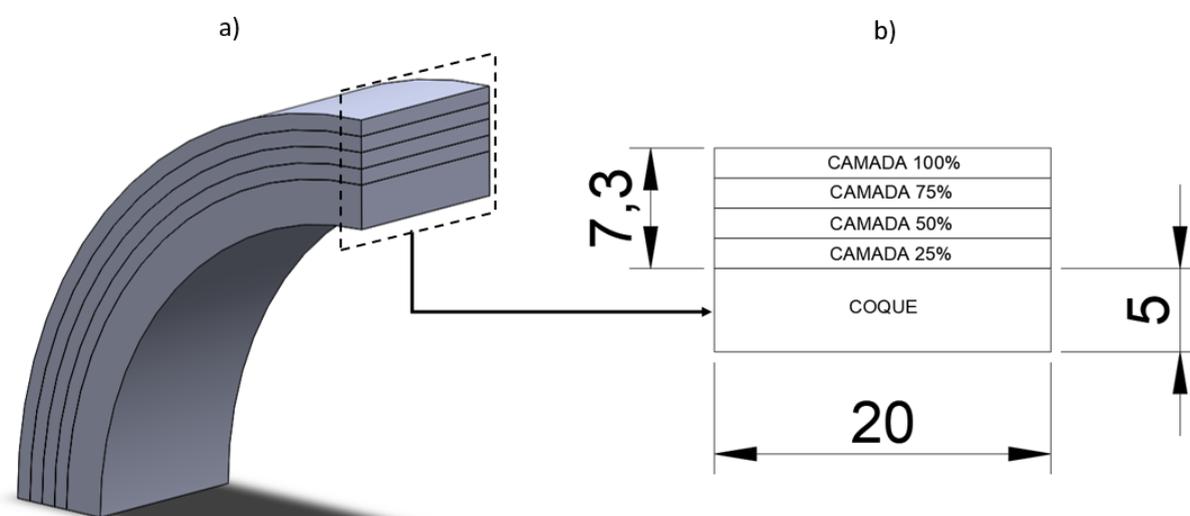
Figura 26 - Seção transversal do tubo analisado



Fonte: Próprio Autor

O modelo em CAD (*Computer Aided Design*) 3D foi criado no programa *Solidworks* 2018 com 4 camadas dividindo a espessura do tubo para serem feitas as simulações da carburização em 25%, 50%, 75% e 100% e também foi modelada a camada de coque com 5 mm, conforme indicado na Figura 27.

Figura 27 – (a) Vista isométrica da peça em CAD 3D, (b) vista da seção transversal



Fonte: Próprio Autor

A parte b) da Figura 27 apresenta um detalhe da região da parte a) em vista isométrica demarcada no retângulo tracejado, nela é possível visualizar todas as dimensões do modelo, com cotas indicadas em milímetros.

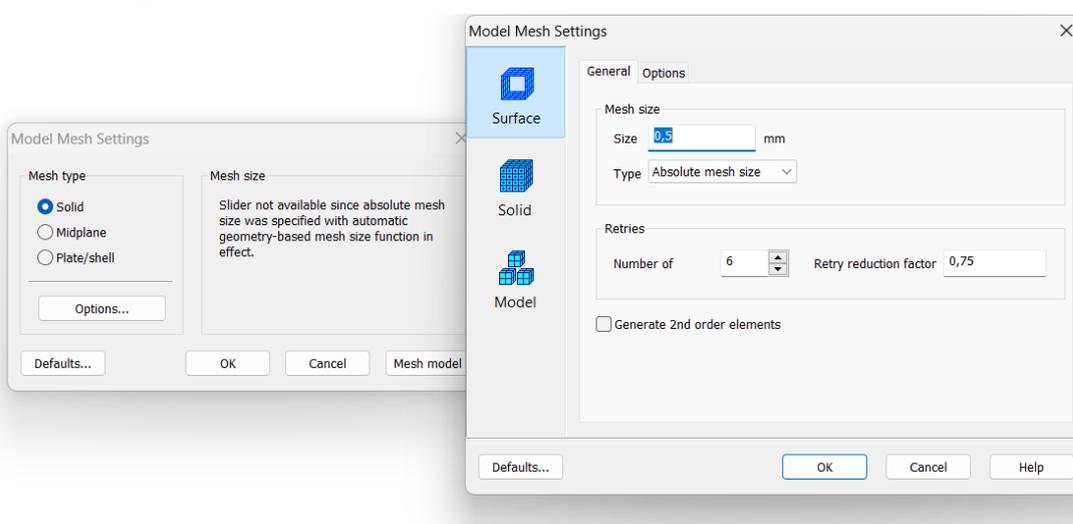
Foi utilizado um comprimento de 20 mm do tubo, todas as dimensões do modelo podem ser visualizadas na Figura 27, com cotas indicadas em milímetros.

3.2.1.2 Geração de malha e condições de contorno

Após esse desenho do modelo 3D o arquivo foi exportado no formato “.STEP” para o software de CAE (*Computer Aided Engineering*) *Algor Simulation 2012* e a partir disto foi realizada, a discretização do modelo, através da geração da malha, cujo valor utilizado foi de 0,5 mm.

Na Figura 28 é indicado que o programa tem algumas opções de criação de malha para modelos sólidos e placa. Neste caso o modelo definido foi sólido, porque este é o que apresenta a maior precisão dos resultados, embora com o maior tempo de processamento.

Figura 28 - Aplicação da malha do modelo linear elástico

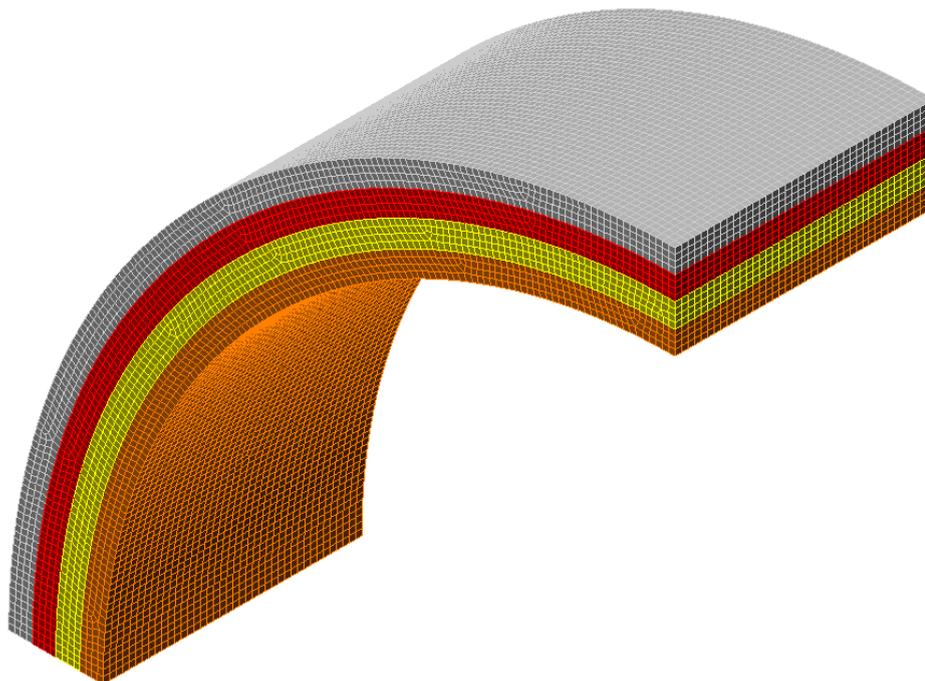


Fonte: Próprio Autor

Dentre as opções dos tipos de malhas sólidas, existem a tetraédrica linear e a hexaédrica linear. Sendo que, a primeira tem uma limitação maior na variação das tensões ao longo do elemento. Enquanto que, a segunda possui maiores variações e avaliações de resultados ao longo do elemento, trazendo resultados mais precisos. Neste trabalho o tipo de malha escolhida foi a hexaédrica linear (ALVES FILHO, 2013).

Após este comando, pôde-se observar a qualidade da malha criada, que é bastante quadrangular, a ideal para este tipo de análise, porque os valores da matriz de rigidez são mais próximos da realidade. Quanto mais elementos, melhor a confiabilidade dos resultados apresentados.

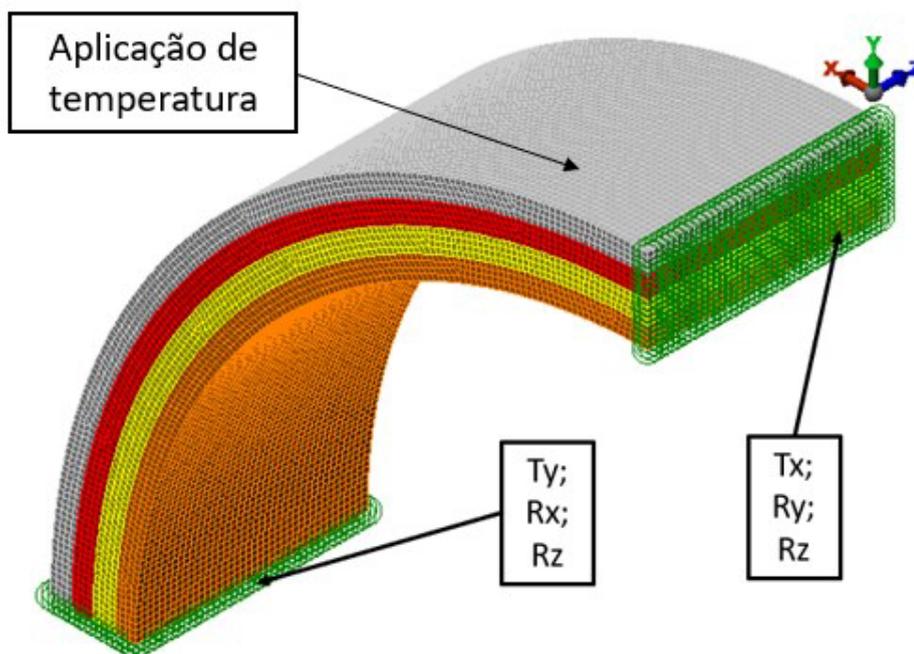
Figura 29 - Modelo de Elementos finitos com malha criada de 0,5 mm



Fonte: Próprio Autor

Com o modelo e malha definida, foram aplicadas as condições de contorno, as quais consistem nas restrições à movimentação da peça, que nestes casos analisados estarão sujeitas a um resfriamento que irá gerar um movimento de contração da peça. Logo após, foram aplicados os valores da redução de temperatura.

Figura 30 - Condições de contorno do modelo linear



Fonte: Próprio Autor

Conforme Figura 30, as condições de contorno aplicadas estão representadas na cor verde, as restrições informadas como a Ty e Tx, indica que nestas faces a translação nos eixos x e y estão impedidas, enquanto que Rx, Ry e Rz indicam os impedimentos da rotação destas faces em torno dos eixos x, y e z.

As temperaturas foram aplicadas em todo o modelo, como forma de simplificação não foi utilizado um modelo acoplado de análise térmica e tensões, por isso foi utilizado o mesmo delta de temperatura em todo o tubo.

3.2.1.3 Modelos avaliados

Foram planejadas algumas simulações lineares para se obter as tensões e deformações, em alguns cenários sem e com o coque com 5 mm. A Tabela 6 indica os modelos analisados sem a camada de coque.

Tabela 6 - Modelos avaliados sem o coque

Modelo	Temperatura (°C)	Carburização (%)
1	1000-800	25
2		50
3		75
4	800-600	25
5		50
6		75
7	600-400	25
8		50
9		75
10	400-200	25
11		50
12		75
13	200-25	25
14		50
15		75

Fonte: Próprio Autor

No cenário descrito acima, sem o coque, não constam modelos com 0% e 100% de carburização. Porque não haveria diferença entre as propriedades mecânicas das seções, já que o material seria homogêneo. As diferenças das propriedades mecânicas dos materiais carburizados e não carburizados estão indicadas na seção 3.1 deste documento.

Na Tabela 7, existem modelos com 0% e 100% de carburização, porque no modelo ao qual o coque foi aplicado, ocorre a restrição ao resfriamento do tubo gerando as tensões.

Tabela 7 – Modelos avaliados com coque de 5 mm

Modelo	Temperatura (°C)	Carburização (%)
16	1000-800	0
17		25
18		50
19		75
20		100
21	800-600	0
22		25
23		50
24		75
25		100
26	600-400	0
27		25
28		50
29		75
30		100
31	400-200	0
32		25
33		50
34		75
35		100
36	200-25	0
37		25
38		50
39		75
40		100

Fonte: Próprio Autor

Foi utilizado o critério de falha do código ASME seção VIII Divisão 2, na seção 5, no critério de falha local, conforme a fórmula indicada abaixo:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq 4S$$

Onde:

σ_1 : Tensão máxima principal;

σ_2 : Tensão média;

σ_3 : Tensão mínima principal;

S: Tensão admissível (2/3 do escoamento ou limite de resistência à tração/3,5 – o que for menor).

Abaixo às tensões admissíveis para os materiais.

Tabela 8 - Tensões admissíveis para o material novo (MPa)

Temperatura (°C)	Tensão Adm. (S)	Critério de falha (4S)
25	134,3	537,1
200	134,3	537,1
400	128,6	514,3
600	111,4	445,7
800	65,7	262,9
1000	22,9	91,4

Tabela 9 - Tensões admissíveis para o material carburizado (MPa)

Temperatura (°C)	Tensão Adm. (S)	Critério de falha (4S)
25	118,3	473,1
200	118,3	473,1
400	118,3	473,1
600	102,5	410,1
800	96,6	386,3
1000	32,0	128,0

3.2.2 Análise não linear

Esta análise geralmente é utilizada quando, após uma avaliação linear elástica as tensões ultrapassam o limite de escoamento do material, conforme encontrados para o modelo com a camada de coque com 5 mm.

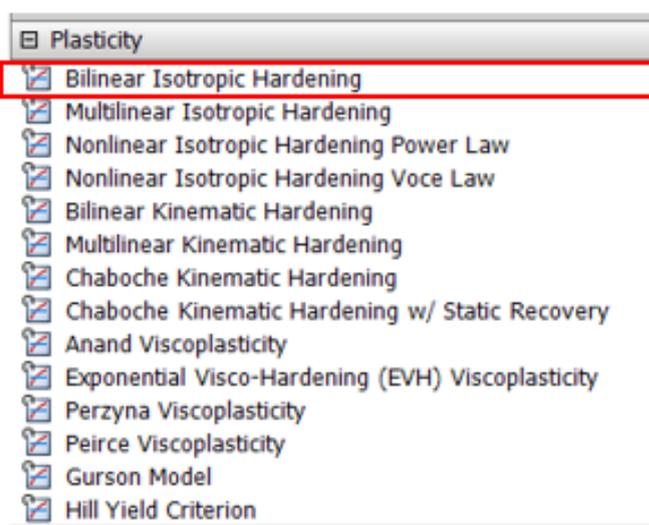
Nesta seção, foram estudados modelos com variação de espessuras de coque de 5 e 10 mm, verificando posteriormente as tensões e deformações.

3.2.2.1 Propriedades dos materiais

Esta análise foi feita no *Ansys Workbench 2023 R2*, por ter uma interface mais simples para este tipo de avaliação, onde existem alguns tipos de análises não lineares.

O modelo escolhido foi o material bilinear, porque para os outros tipos é necessário ter a curva completa do ensaio de tração, o que não foi encontrado nas referências. Já com este modelo ao se ter o limite de escoamento e o alongamento, é possível realizar a análise.

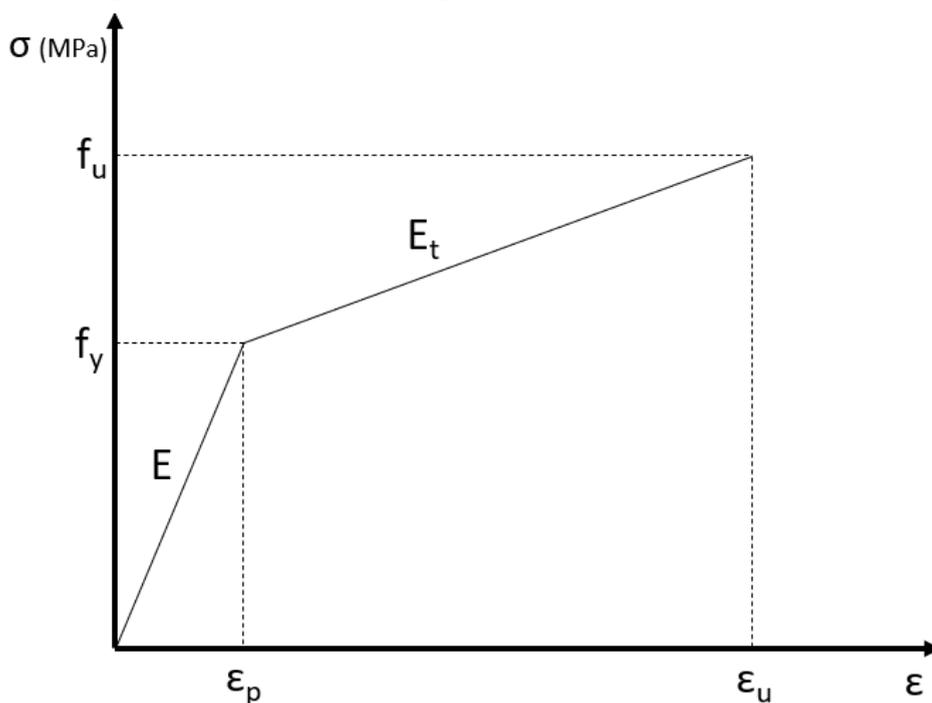
Figura 31 - Tipos de análises não lineares no Ansys



Fonte: Próprio Autor

A análise que considera o material como bilinear tem por princípio adotar um módulo tangente, que consiste em uma nova constante entre a tensão e deformação após a região elástica, conforme Figura 32.

Figura 32 - Exemplo de gráfico para material bilinear



Fonte: Próprio Autor

Onde:

f_y : Limite de escoamento;

f_u : Limite de resistência a tração;

E : Módulo de Elasticidade;

E_t : Módulo tangente;

ϵ_p : Deformação elástica máxima;

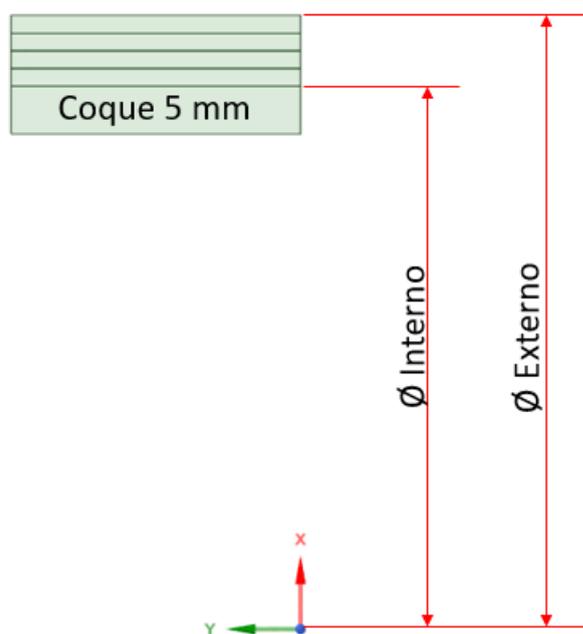
ϵ_u : Deformação no limite de resistência;

O módulo tangente é calculado através da inclinação da reta na região plástica através do quociente da diferença das tensões e deformações. Os valores aplicados na modelagem estão descritos nas Tabela 3 e Tabela 5.

As curvas com diferentes temperaturas foram criadas utilizando a metodologia da ASME seção II parte D, apêndice 1, a qual permite que a partir de certa temperatura sejam obtidos os valores de tensões para outras temperaturas.

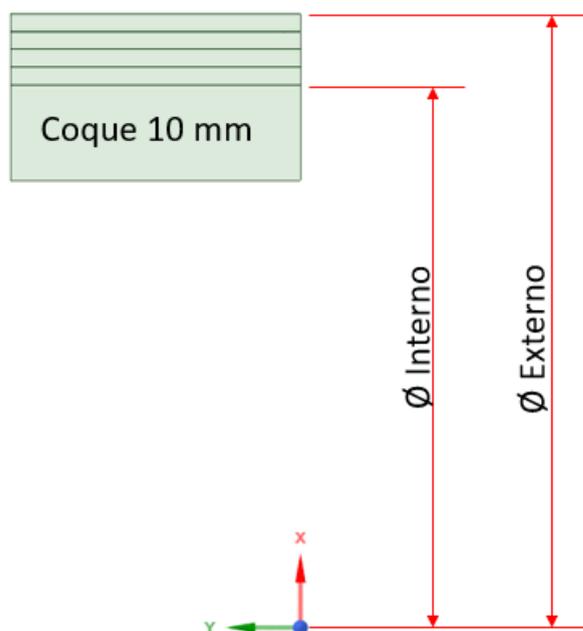
3.2.2.2 Modelagem 2D da seção

Como a análise não linear gasta mais tempo computacional, foi escolhido o modelo axissimétrico para diminuir o tempo de processamento, já que desta forma é analisada apenas, a seção transversal do tubo. Logo, a seção foi modelada no próprio *Ansys* na parte do *Space Clean*.

Figura 33 - Modelo axissimétrico com 5 mm de coque

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 33 está indicado o modelo axissimétrico para a camada de coque de 5 mm. Pelo programa para este tipo de análise ser realizada, a seção tem que ser modelada no plano x-y. As dimensões utilizadas foram as mesmas da análise linear elástica, cujas características para o modelo com coque de 10 mm estão indicadas na Figura 34.

Figura 34 - Modelo axissimétrico com coque de 10 mm

Fonte: Próprio Autor

Após a modelagem 2D, foram aplicadas as propriedades dos materiais conforme valores informados nas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, de acordo com o cenário avaliado em cada modelo.

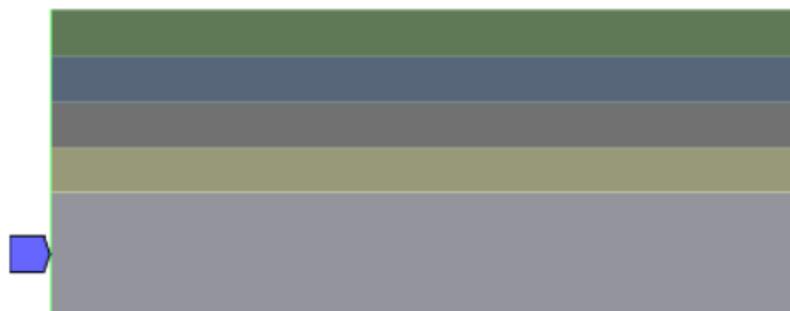
3.2.2.3 Geração de malha e condições de contorno

Com os *inputs* das propriedades dos materiais, foram inseridas as condições de contorno no *software* na opção “*frictionless support*” que significa suporte sem atrito, que é equivalente à condição de simetria utilizada no modelo linear. Foram selecionadas as arestas das extremidades direita e esquerda da Figura 35, representadas na cor azul.

Figura 35 - Condições de contorno do modelo não linear

A: Coque 5 m m
Frictionless Support
Time: 1, s
24/09/2023 12:32

■ Frictionless Support

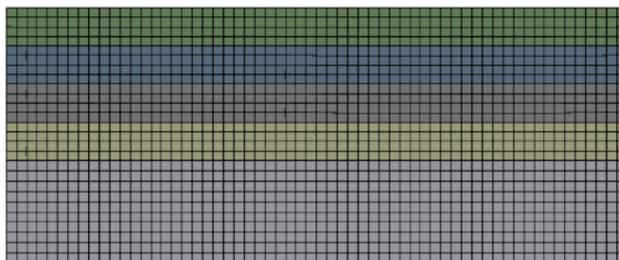


Fonte: Próprio Autor

Para que a análise não linear pudesse ser realizada, teve-se que ativar no programa, a opção “*large deflection*” que significa literalmente “grande deflexão”. Desta forma o *software* computa as deformações após o limite de escoamento do material ser atingido.

Com as condições aplicadas, a malha do modelo foi criada também com o valor de 0,5 mm (Figura 36), conforme aplicado na análise linear para se ter ao máximo os mesmos parâmetros, e a comparação pudesse ser da melhor forma possível.

Figura 36 - Malha dos modelos da análise não linear



Fonte: Próprio Autor

3.2.2.4 Modelos avaliados

Foram simulados os cenários informados na Tabela 10 e

Tabela 11, para 5 mm e 10 mm, a fim de verificar a influência da espessura de coque nos resultados das tensões. Não foi necessário avaliar com esse tipo de análise um cenário sem o coque, porque as tensões encontradas neste cenário ficaram abaixo do limite de escoamento conforme demonstrado nos resultados.

Tabela 10 - Modelos com coque de 5 mm para análise não linear

Modelo	Temperatura (°C)	Carburização (%)
41	1000-800	0
42		25
43		50
44		75
45		100
46	800-600	0
47		25
48		50
49		75
50		100
51	600-400	0
52		25
53		50
54		75
55		100
56	400-200	0
57		25
58		50
59		75
60		100
61	200-25	0
62		25
63		50
64		75
65		100

Fonte: Próprio Autor

Os modelos não lineares começaram a partir do número 41, tanto para 5 mm como para 10 mm de camada de coque.

Tabela 11 - Modelos com coque de 10 mm para análise não linear

Modelo	Temperatura (°C)	Carburização (%)
66	1000-800	0
67		25
68		50
69		75
70		100
71	800-600	0
72		25
73		50
74		75
75		100
76	600-400	0
77		25
78		50
79		75
80		100
81	400-200	0
82		25
83		50
84		75
85		100
86	200-25	0
87		25
88		50
89		75
90		100

Fonte: Próprio Autor

Após as avaliações desses 90 modelos, foram gerados os valores das tensões e deformações para o fenômeno estudado.

3.2.3 Limitações e aproximações dos modelos

Qualquer tipo de modelo é uma aproximação do que se quer estudar, neste trabalho, algumas aproximações foram feitas, a fim de permitir estudar o tema com as ferramentas disponíveis.

Não foi utilizada uma análise acoplada de transferência de calor e análise estática, porque, obter as propriedades mecânicas com muitas variações em função do tempo, seria muito complicada, para o curto tempo do trabalho.

Não foram consideradas as propriedades elastoplásticas do coque, porque não foram encontradas curvas de tensão deformação nas referências bibliográficas consultadas. Também, porque a avaliação mecânica de resistência do coque não é o objetivo principal deste trabalho.

Não foi considerada uma superfície de contato no modelo, entre as camadas, carburizadas e não carburizadas. Isto por conta de simplificação e também porque, os materiais ficam tão unidos que basicamente são homogêneos.

Numa situação real dos tubos das serpentinas, a região de transição entre as camadas ocorre de forma irregular, porém para viabilizar o estudo, as camadas foram subdivididas em 4 espessuras iguais, conforme indicado nas divisões dos modelos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são analisados os resultados das simulações lineares e não lineares com as diferentes taxas de carburização e espessura de coque, em relação às referências bibliográficas que discutiram este tema.

4.1 ANÁLISE LINEAR

Os resultados indicados a seguir, contemplam a distribuição das tensões combinadas de von Mises, máximas principais e deformação do material para os diferentes cenários, sem coque, com espessuras de carburização de 25%, 50% e 75%, e com camada de coque de 5 mm e espessuras carburizadas de 25%, 50%, 75% e 100%.

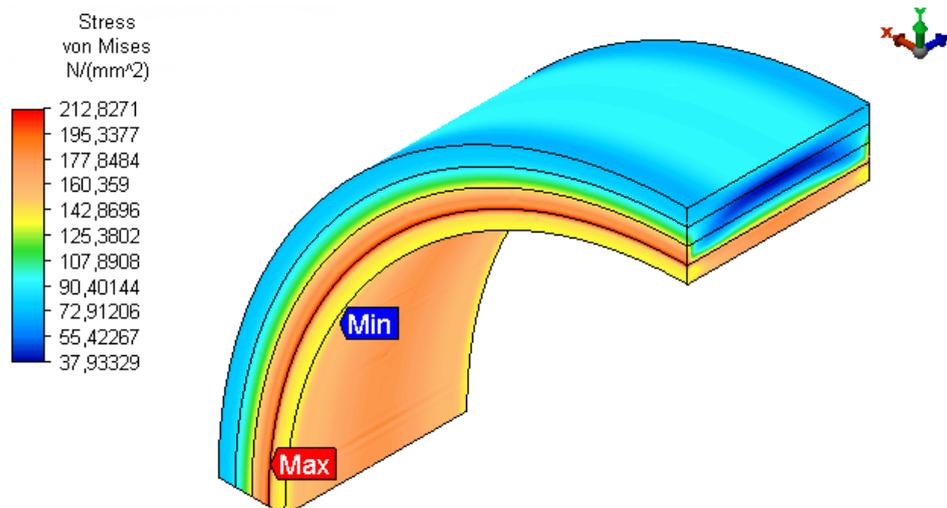
4.1.1 Modelos sem coque

4.1.1.1 Tensões combinadas de von Mises

A seguir estão descritas as tensões combinadas de von Mises encontradas, simulando o resfriamento do forno durante uma parada de emergência sem considerar o coque.

A Figura 37 apresenta o perfil da distribuição de tensões de von Mises para o caso de resfriamento do forno de 1000°C até a temperatura ambiente, simulando uma parada de emergência, com 25% de carburização.

Figura 37 - Distribuição das tensões combinadas de von Mises do modelo 13



Conforme exposto na Figura 37, a região onde ocorrem as maiores tensões estão distribuídas na interface entre a camada carburizada e não carburizada. De acordo com a escala de cores do lado esquerdo da figura, quanto mais vermelha a região, maior a tensão, quanto mais azul, menor.

Tabela 12 - Tensões combinadas de von Mises sem camada de coque

Modelo	Temperatura (°C)	Carburização (%)	Tensão de von Mises (MPa)	Tensão combinada (MPa)	Tensão Admissível 4S (MPa)
1	1000-800	25	43,6	-20,6	386,3
2		50	44,4	6,2	
3		75	47,2	26,3	
4	800-600	25	87,3	-41,2	410,1
5		50	88,8	12,3	
6		75	94,4	52,6	
7	600-400	25	131,0	-61,8	473,1
8		50	133,2	18,7	
9		75	141,5	78,8	
10	400-200	25	174,6	-82,5	452,6
11		50	177,5	24,8	
12		75	188,7	105	
13	200-25	25	212,8	-100,6	473,1
14		50	216,3	30,3	
15		75	234,7	128,1	

Conforme indicado na tabela acima, as tensões solicitantes de von Mises tendem a aumentar conforme o avanço do resfriamento do forno e da carburização,

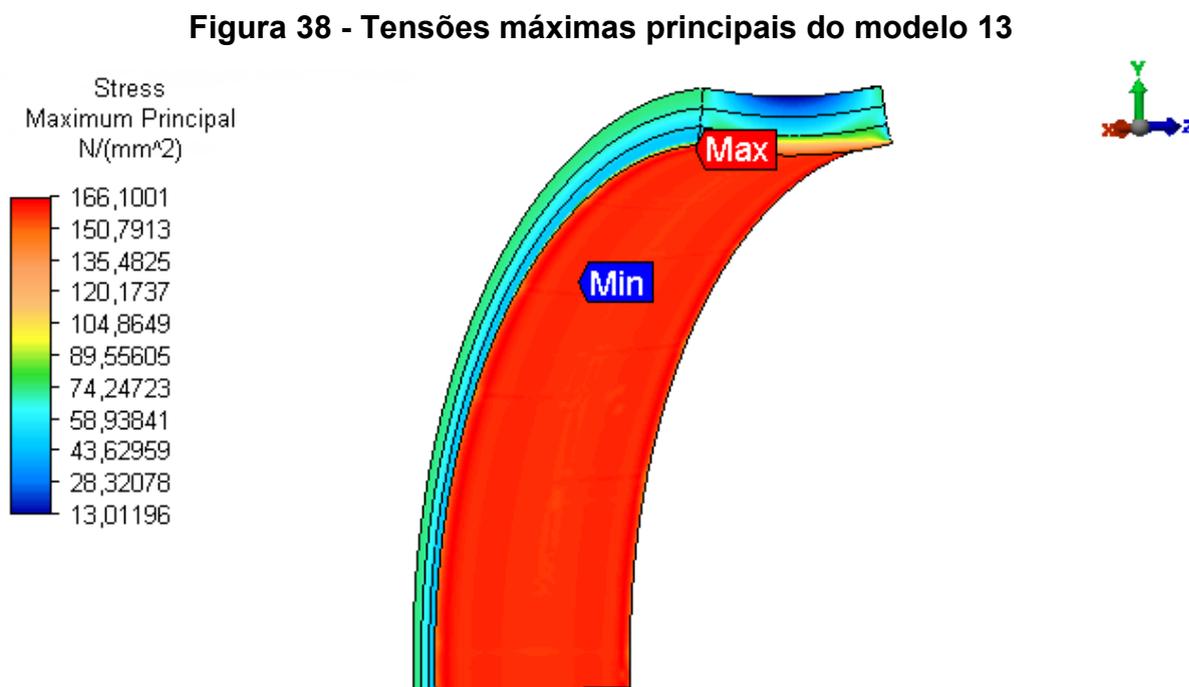
todavia não se observam tensões acima do limite de escoamento do material, indicando não haver deformações plásticas neste processo.

A situação mais crítica seria com o material 75% carburizado e com temperatura ambiente de 25°C numa tensão solicitante de 234,7 MPa. O limite de escoamento do material carburizado nesta condição é de 326 MPa.

Pelo critério de falha local do ASME, o ponto mais crítico observado também foi com o material 75% carburizado e com um resfriamento até 25°C, no valor de 128,1 MPa, abaixo do limite admissível de 473,1 MPa.

4.1.1.2 Tensões máximas principais

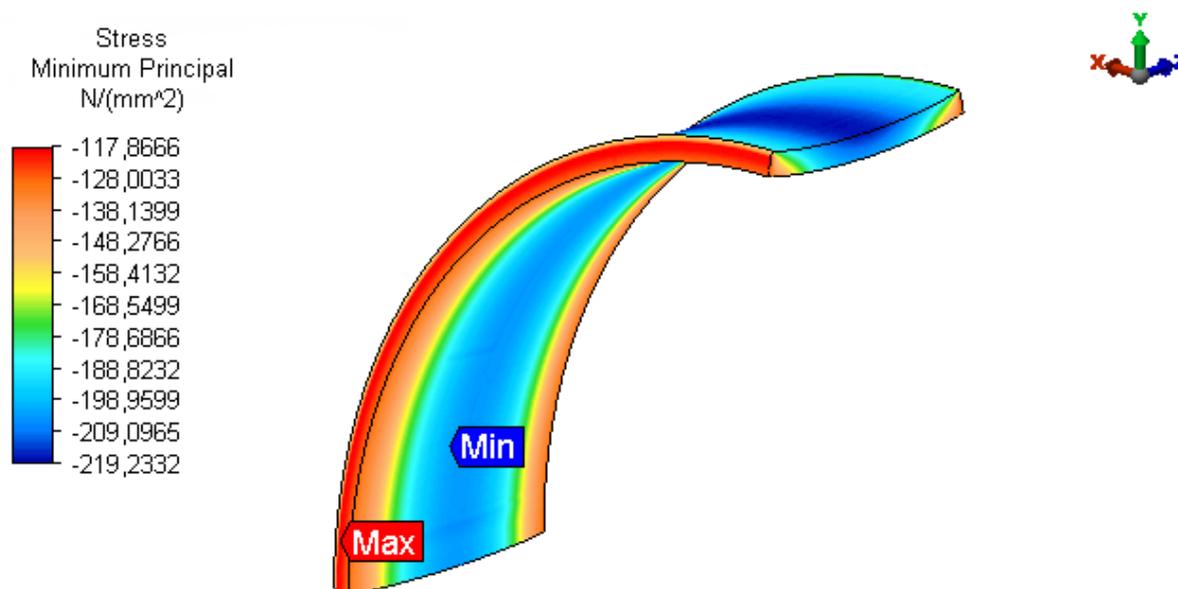
As tensões máximas principais indicam as tensões trativas que ocorrem em função dos carregamentos aplicados. A Figura 38 indica as tensões máximas principais atuantes no tubo, para uma análise linear sem coque do modelo 13, com 25% de carburização.



A região da figura em vermelho sinaliza as máximas tensões principais na região, indicando que toda a região de transição apresenta tensões com maior chance de ocorrer propagação de trinca. Foi retirada da visualização a camada de 25%, para facilitar o entendimento, a figura também está com uma escala de deformação ampliada em 35 vezes.

Pode-se tirar informações importantes da Figura 38, primeiro que a toda a região acima do ponto da transição entre carburizado e não carburizado apresenta tensões máximas positivas, confirmando o que foi dito por alguns autores como Santana et al. (2019), Harston e Ropital (2007), Moreira (2003) e Grabke (1998), enquanto que na região da superfície interna do tubo apresentam tensões compressivas, conforme Figura 39.

Figura 39 - Tensões mínimas principais do modelo 13



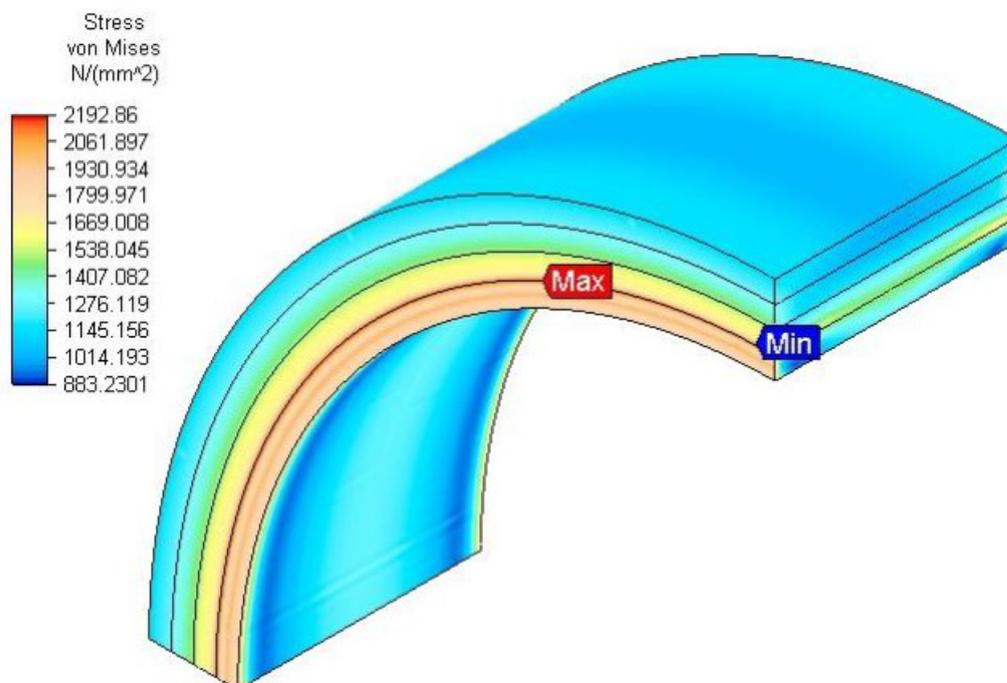
Na Figura 39, observa-se somente a região do tubo com 25% de espessura de carburização, para indicar que nesta seção a tensão é realmente compressiva. Na seção com a cor mais azul as tensões compressivas são maiores.

4.1.2 Camada de coque com 5 mm

Abaixo estão descritas as tensões combinadas de von Mises encontradas simulando o resfriamento do forno durante uma parada de emergência com uma camada de coque de 5 mm.

A Figura 40 apresenta o perfil de distribuição das tensões de von Mises para o caso de resfriamento até temperatura ambiente, com 25% de carburização.

Figura 40 - Tensões combinadas de von Mises do modelo 37



Nesta figura é possível identificar as 4 camadas com profundidades distintas de carburizações, sem o coque, como forma de facilitar a visualização. Nota-se que a região amarelada e vermelha, as quais exibem as tensões maiores, encontram-se na região de transição entre a camada carburizada e não carburizada. Caso ocorra a falha, a propagação da trinca tenderia a surgir nesta junção conforme afirmado por Harston e Ropital (2007).

De acordo com a escala de cores do lado esquerdo da figura, quanto mais vermelha a região maior a tensão, quanto mais azul, menor.

As regiões demarcadas pelas linhas pretas indicam as divisões feitas no modelo para indicar as diferentes espessuras ou profundidades de camadas de carburização.

Na Tabela 13, estão descritos todos os valores de tensão para os modelos de 16 a 40.

Tabela 13 - Tensões combinadas de von Mises para 5 mm de coque

Modelo	Temperatura (°C)	Carburização (%)	Tensão de von Mises (MPa)	Tensão combinada (MPa)	Tensão Adm. 4S (MPa)
16	1000-800	0	313,4	-25,9	386,3
17		25	236,5	69,87	
18		50	219,3	120,9	
19		75	205,6	170,49	
20		100	165,0	-13,6	
21	800-600	0	648,3	-58,1	392,2
22		25	521,8	147,45	
23		50	510,1	254,5	
24		75	495,0	361,1	
25		100	140,0	-12,5	
26	600-400	0	1062	-103,4	452,6
27		25	1052	448,4	
28		50	1069	610	
29		75	1068	654	
30		100	161,0	16	
31	400-200	0	1479	-148	473,1
32		25	1799	749,4	
33		50	1822	972	
34		75	1807	995	
35		100	602	60	
36	200-25	0	1802,3	-181	473,1
37		25	2192,9	914	
38		50	2221,1	1185	
39		75	2202,4	1211,6	
40		100	734,3	74,0	

Na Tabela 13, as tensões solicitantes de von Mises tendem a aumentar conforme o avanço do resfriamento do forno, com tensões bastante altas, se levado em conta os limites de escoamento e de resistência à tração dos materiais, indicando que ocorrem deformações plásticas neste processo.

Estas tensões ocorrem devido à restrição gerada pelo coque. Com isso, com o resfriamento do forno, o coque não reduz de diâmetro na mesma proporção do tubo, desta forma cria-se uma restrição à contração do tubo, elevando às tensões.

Pode-se observar que a partir do modelo 28, as tensões ficaram acima do critério admissível de falha local pelo ASME, indicando uma possível ruptura do material a partir desta condição de resfriamento até 400°C com o material 50% carburizado.

É possível observar também, que as tensões combinadas solicitantes tendem a cair conforme o avanço final (75% a 100%) da carburização com a presença do coque, algo não encontrado nos modelos da seção 4.1.1, isto pode ter ocorrido porque o coeficiente de expansão térmica do material carburizado é menor que o do material novo, conforme Figura 25, e desta forma se aproxima mais do valor do coque do que o material não carburizado.

Isto não significa que com o avanço da carburização a chance de falha seja menor, porque o material carburizado perde muito em ductilidade e tenacidade à fratura. Ou seja, ao se atingir os valores acima da tensão limite de escoamento a chance de falha é alta.

As tensões apresentadas na Tabela 13 estão bastante altas em relação aos limites de resistência dos materiais que foram apresentados na Tabela 3 e Tabela 5, indicando que o modelo linear não é o mais apropriado para avaliar a chance de falha com mais precisão. Desta forma, os resultados da análise não linear se mostram mais próximo da realidade, conforme indicado a seguir.

4.2 ANÁLISE NÃO LINEAR

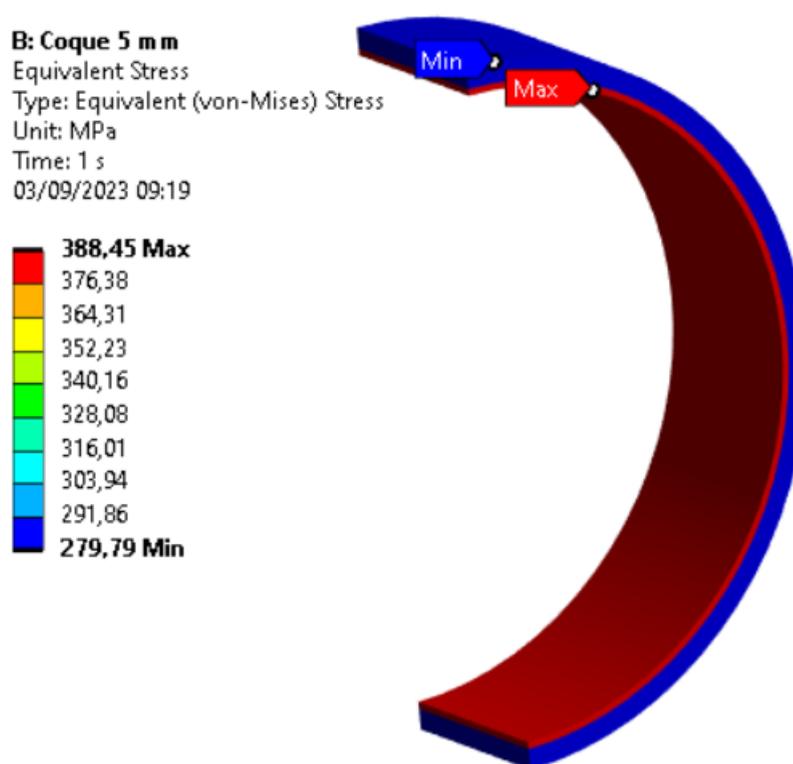
Os resultados indicados a seguir contemplam a distribuição das tensões combinadas de von Mises, máximas principais e deformação do material para os diferentes cenários avaliados, com profundidades de camadas carburizadas de 25%, 50%, 75% e 100%, espessuras de coque com 5 e 10 mm, variando-se a temperatura de 1000°C até 25°C, com simulações não lineares.

4.2.1 Camada de coque com 5 mm

4.2.1.1 Tensões combinadas de von Mises

Aplicando uma camada rígida de coque de 5 mm e com 25% de carburização, a distribuição das tensões de von Mises ocorreram conforme a Figura 41, retirada da simulação de resfriamento até 25°C.

Figura 41 - Tensão equivalente de von Mises para camada de coque de 5 mm



A camada em vermelho representa a região carburizada e a camada em azul representa a região não carburizada. Na Figura 41 não está representado o coque para facilitar a visualização e também por ele não estar sendo avaliado quanto a sua resistência.

As tensões combinadas de von Mises apresentadas na Figura 41 foram maiores que o limite de escoamento do material na temperatura ambiente, 326 MPa, indicando que toda a região carburizada (em vermelho) sofre deformação plástica. A região não carburizada (em azul) também sofreu deformação plástica pois a tensão solicitante de 279,8 MPa está acima da tensão de escoamento do material na temperatura ambiente, 230 MPa.

A Tabela 14 apresenta os níveis das tensões de von Mises em função do resfriamento repentino do forno, saindo da temperatura de 1000°C para 25°C, com diferentes níveis de carburização.

Tabela 14 - Tensões combinadas de von Mises para 5 mm de coque

Modelo	Temperatura (°C)	Carburização (%)	Tensão de von Mises (MPa)
41	1000-800	0	153,00
42		25	206,68
43		50	206,65
44		75	206,61
45		100	206,58
46	800-600	0	227,00
47		25	309,35
48		50	309,32
49		75	309,29
50		100	309,27
51	600-400	0	264,00
52		25	355,24
53		50	355,17
54		75	355,11
55		100	355,06
56	400-200	0	276,61
57		25	371,17
58		50	371,08
59		75	371,00
60		100	370,90
61	200-25	0	284,63
62		25	388,45
63		50	388,59
64		75	388,69
65		100	388,73

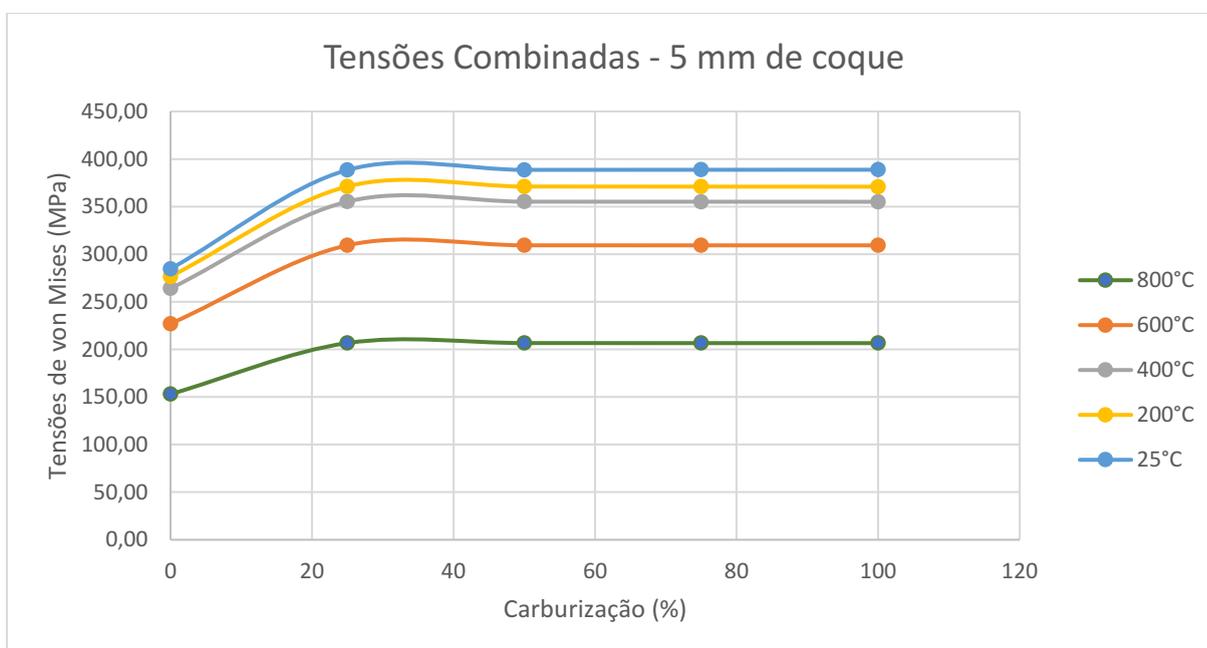
A Tabela 14 indica a mesma tendência encontrada na seção anterior. Conforme exposto na Figura 37, a região onde ocorrem as maiores tensões estão distribuídas

na interface entre a camada carburizada e não carburizada. De acordo com a escala de cores do lado esquerdo da figura, quanto mais vermelha a região, maior a tensão, quanto mais azul, menor.

Tabela 12, sinalizando uma redução da tensão conforme o avanço da carburização a partir dos 25%, não obstante a variação entre os valores é muito menor do que o encontrado na análise linear, isto em função de se considerar o encruamento do tubo.

Na Figura 42, o gráfico apresenta todas as tensões de von Mises em função da temperatura.

Figura 42 - Gráfico das tensões combinadas de von Mises para 5 mm de coque



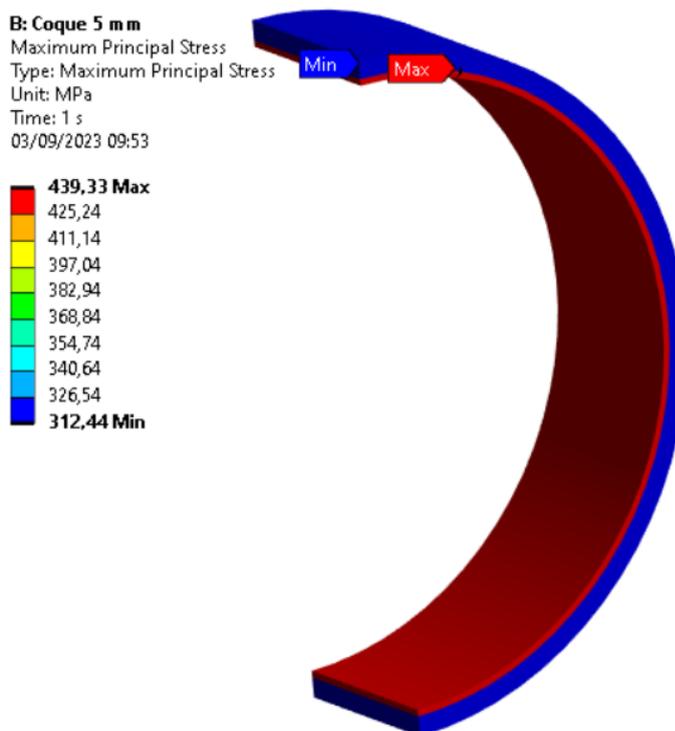
O gráfico da Figura 42 mostra que as tensões encontradas tem um aumento significativo com o avanço inicial da carburização e logo após uma leve acomodação dos valores.

Observa-se também a magnitude da tensão aumenta significativamente com a redução da temperatura, enquanto que a variação destas tensões entre as faixas de temperaturas (800, 600, 400, 200 e 25°C) começam a reduzir. Isto ocorre em função das propriedades mecânicas terem uma variação menor nas temperaturas mais próximas a ambiente, conforme a Figura 20 a Figura 23.

4.2.1.2 Tensões máximas principais

As tensões máximas principais indicam as tensões trativas que ocorrem na análise em função dos carregamentos aplicados. A Figura 43 indica tensões atuantes no tubo:

Figura 43 - Tensões máximas principais

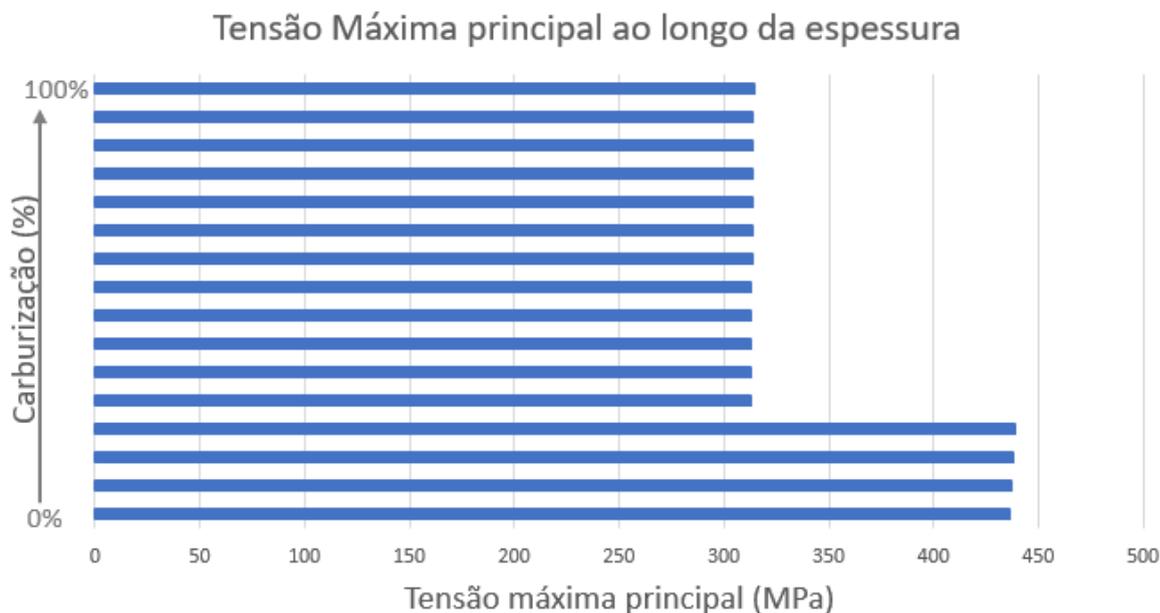


A tensão máxima principal encontrada foi em torno de 439 MPa para a região carburizada, a qual ficou acima do limite de resistência à tração do material (414 MPa), indicando que se houver algum tipo de trinca nucleada esta pode se propagar pelo material ocorrendo a fratura. Enquanto que para o material não carburizado a tensão ficou abaixo deste limite (470 MPa) indicando que não ocorreria falha nesta região.

O gráfico representado na Figura 44 relaciona a tensão máxima principal em função da espessura da camada carburizada, com a medição realizada na superfície interna para a externa.

É possível observar um aumento da tensão máxima principal, conforme se aproxima da interface entre as regiões carburizadas e não carburizadas, indicando que a trinca tende a se propagar desta região para a extremidade do tubo, conforme as experiências constatadas em campo e citados por Santana et al. (2019).

Figura 44 - Gráfico da tensão máxima principal em função da variação de espessura



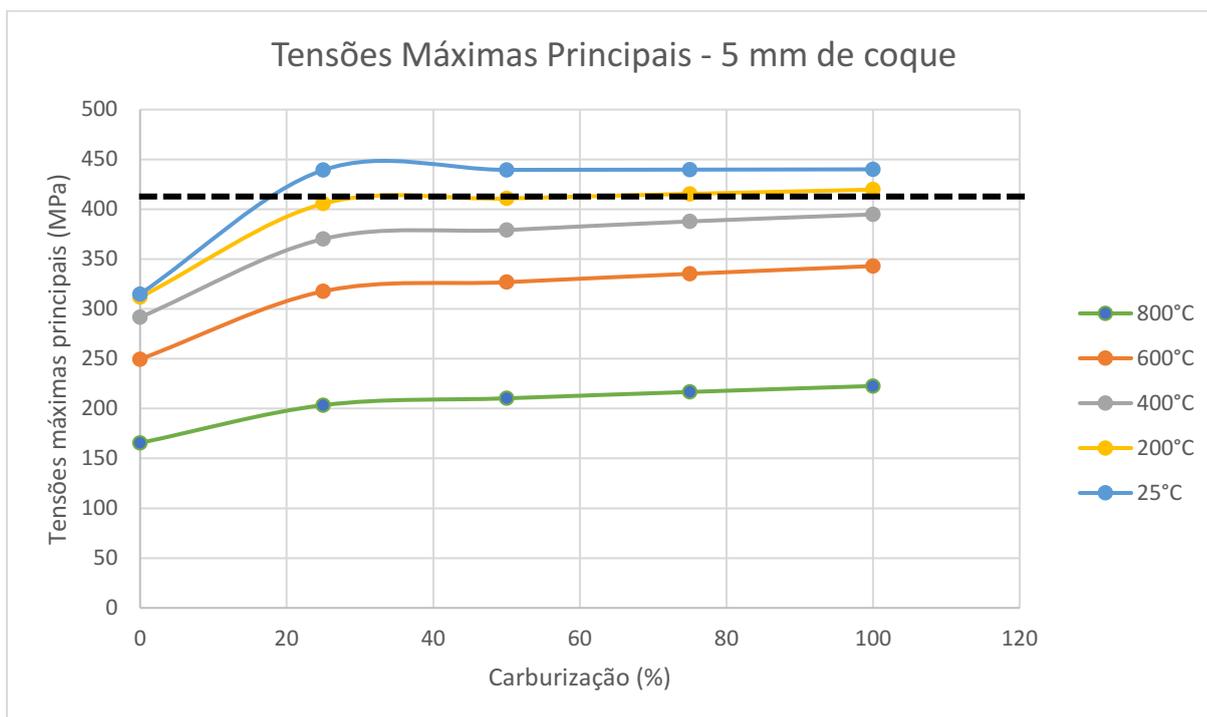
A Tabela 15 apresenta as tensões máximas principais obtidas das simulações cujos valores indicam que um resfriamento até 200°C, com uma carburização entre 50% e 75%, poderia ocorrer uma propagação de trinca, caso se tenha alguma nucleada. Isto porque as tensões ultrapassaram o limite de resistência a tração do material.

Tabela 15 - Tensões máximas principais para 5 mm de coque

Temperatura (°C)	Carburização (%)	Tensão Máxima Principal (MPa)
1000-800	0	165,58
	25	203,44
	50	210,28
	75	216,69
	100	222,66
800-600	0	249,56
	25	317,70
	50	326,83
	75	335,24
	100	342,97
600-400	0	291,62
	25	370,19
	50	379,11
	75	387,81
	100	394,82
400-200	0	311,79
	25	405,62
	50	410,78
	75	415,47
	100	419,73
200-25	0	314,94
	25	439,33
	50	439,54
	75	439,78
	100	440,06

Diferente do ocorrido para as tensões combinadas de von Mises, as máximas principais, os valores tendem a aumentar conforme o aumento da carburização, indicando um cenário de alerta com esse mecanismo de dano, pois podem ocorrer propagação de trincas.

O gráfico representado na Figura 45, sinaliza o comportamento das curvas de tensão em função da temperatura e carburização, observa-se que, assim como ocorreu na Figura 42 a variação das tensões entre as faixas de temperaturas vai diminuindo.

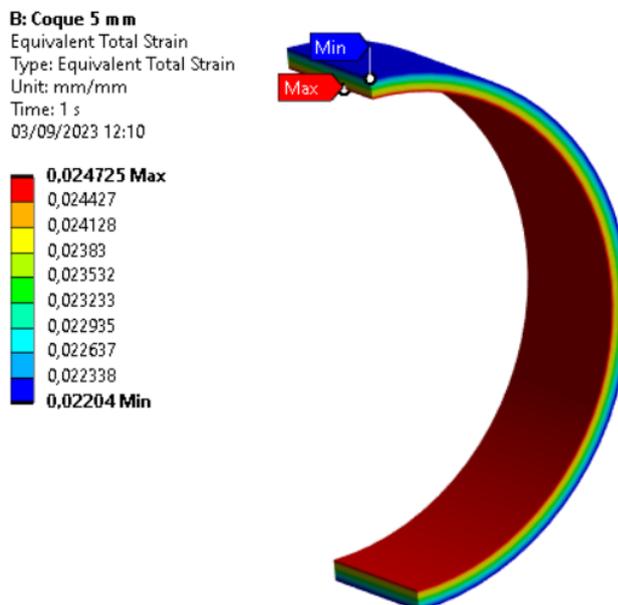
Figura 45 - Gráfico das tensões máximas principais para 5 mm de coque

As tensões máximas principais, indicadas na Figura 45, em alguns casos, abaixo da temperatura de 200°C, apresentaram tensões acima do limite de resistência a tração do material (414 MPa). Isto indica uma região de risco propensa a fratura do tubo.

4.2.1.3 Deformações

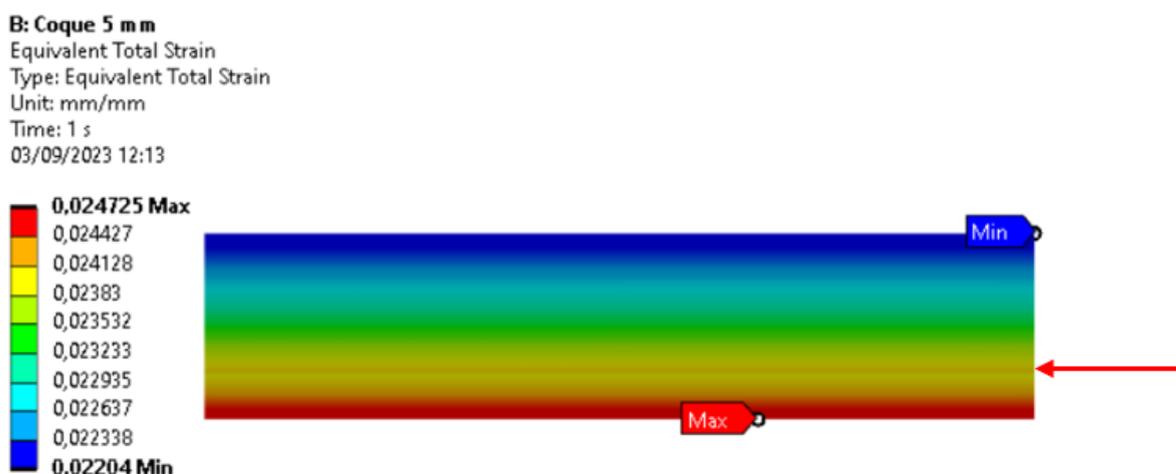
Nesta seção serão indicados os resultados das deformações nos modelos. A Figura 46 descreve as deformações equivalentes totais que ocorreram no material.

Figura 46 - Deformação total da peça



As deformações encontradas ainda se encontram abaixo da deformação para a falha do material que é de 0,03 para a camada carburizada e 0,1 para a não carburizada, próximo a parede externa. Abaixo, na Figura 47 o detalhe da distribuição na seção transversal:

Figura 47 - Detalhe da distribuição das deformações



Conforme indicado na Figura 47, percebe-se uma linha de cor vermelha próxima da região de transição entre as regiões carburizadas, indicando um aumento da deformação nesta região, assim como o valor máximo na face inferior do tubo.

A tabela a seguir informa todas as deformações avaliadas através das simulações:

Tabela 16 – Deformações totais analisadas para coque de 5 mm

Temperatura (°C)	Carburização (%)	Deformação total (%)	Deformação final do material (%)
1000-800	0	1,07	10,0
	25	1,05	
	50	1,04	
	75	1,04	
	100	1,04	
800-600	0	1,79	8,2
	25	1,76	
	50	1,76	
	75	1,75	
	100	1,7	
600-400	0	2,28	6,3
	25	2,26	
	50	2,25	
	75	2,25	
	100	2,24	
400-200	0	2,47	4,5
	25	2,44	
	50	2,43	
	75	2,43	
	100	2,4	
200-25	0	2,5	3,0
	25	2,47	
	50	2,46	
	75	2,46	
	100	2,46	

As deformações tiveram um comportamento parecido com as tensões combinadas de von Mises, diminuindo conforme o aumento da carburização. Isto ocorreu, porque conforme o material se torna mais carburizado, seu coeficiente de expansão térmica se aproxima do coque, criando uma leve redução na tensão.

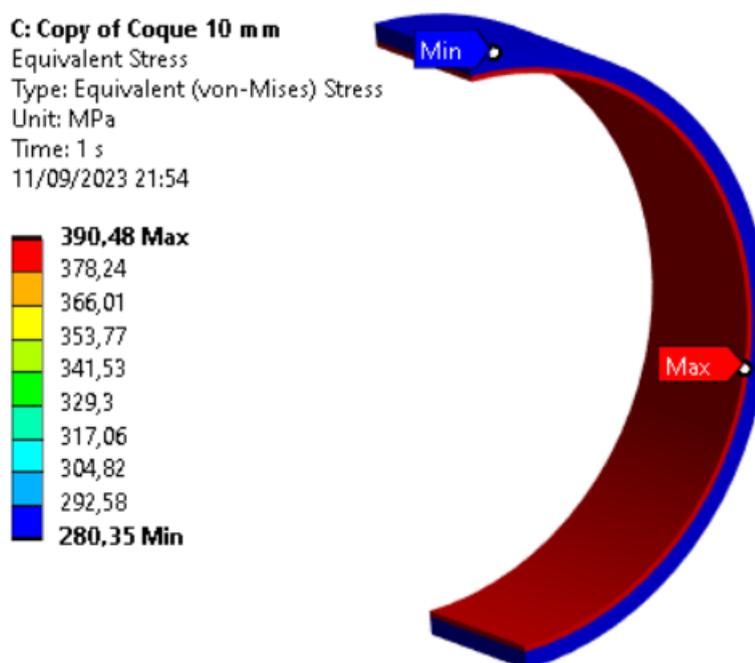
Dentre os resultados obtidos, as deformações solicitantes, não ultrapassaram as deformações limites do material.

4.2.2 Camada de coque com 10 mm

4.2.2.1 Tensões combinadas de von Mises

Aplicando uma camada rígida de coque de 10 mm e com 25% de carburização, a distribuição das tensões de von Mises ocorreram conforme a Figura 48, retirada da simulação de resfriamento até 25°C.

Figura 48 - Tensão equivalente de von Mises



Neste caso, a tensão combinada de von Mises também foi maior que o limite de escoamento do material na temperatura ambiente 326 MPa, indicando que toda a região carburizada (em vermelho) sofre deformação plástica. A região não carburizada (em azul) também sofreu deformação plástica pois a tensão solicitante de 280,35 MPa está acima da tensão de escoamento do material na temperatura ambiente 230 MPa.

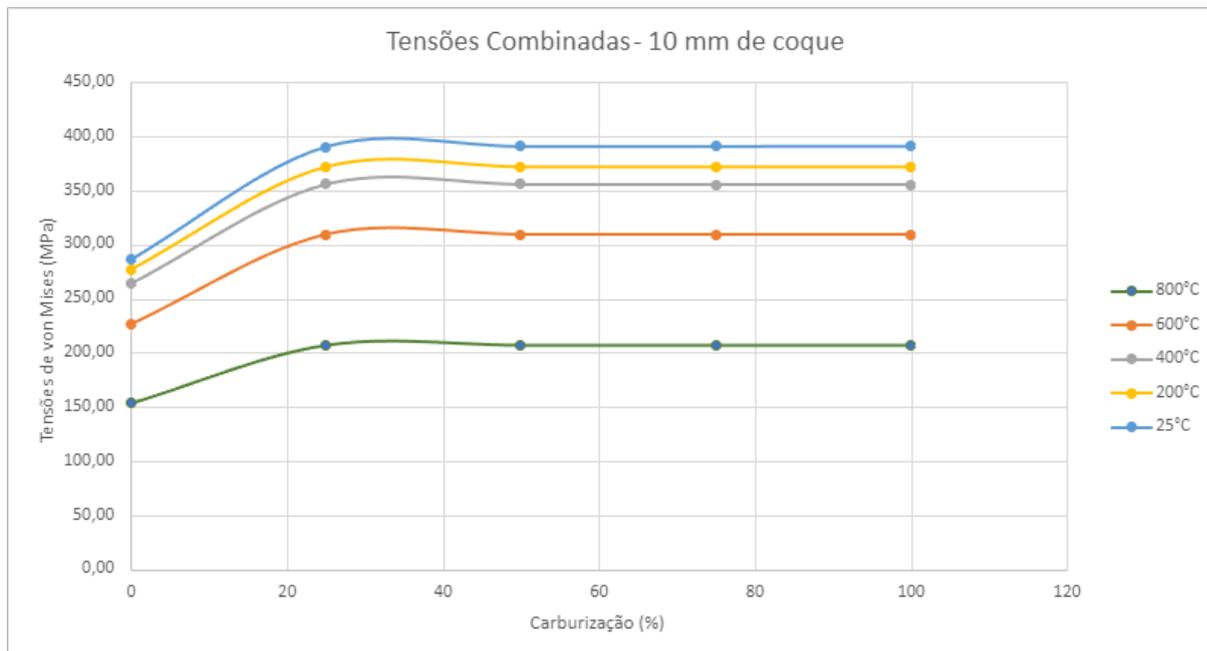
A tabela a seguir apresenta os níveis da tensão de von Mises em função do resfriamento repentino do forno, saindo da temperatura de 1000°C para 25°C.

Tabela 17 - Tensões combinadas de von Mises para 10 mm de coque

Modelos	Temperatura (°C)	Carburização (%)	Tensão de von Mises (MPa)
66	1000-800	0	153,35
67		25	207,02
68		50	207,01
69		75	207,01
70		100	207,00
71	800-600	0	226,60
72		25	309,61
73		50	309,60
74		75	309,59
75		100	309,59
76	600-400	0	264,09
77		25	355,79
78		50	355,77
79		75	355,75
80		100	355,73
81	400-200	0	277,20
82		25	372,01
83		50	371,98
84		75	371,95
85		100	371,92
86	200-25	0	286,30
87		25	390,48
88		50	390,70
89		75	390,84
90		100	390,91

Os resultados expostos na Tabela 17, indicam valores ligeiramente maiores do que aqueles encontrados na seção 4.2.1.1, para os modelos analisados com coque de 5 mm. O gráfico representado na Figura 49 apresenta todas as tensões de von Mises em função da temperatura.

Figura 49 - Gráfico das tensões combinadas de von Mises para 10 mm de coque

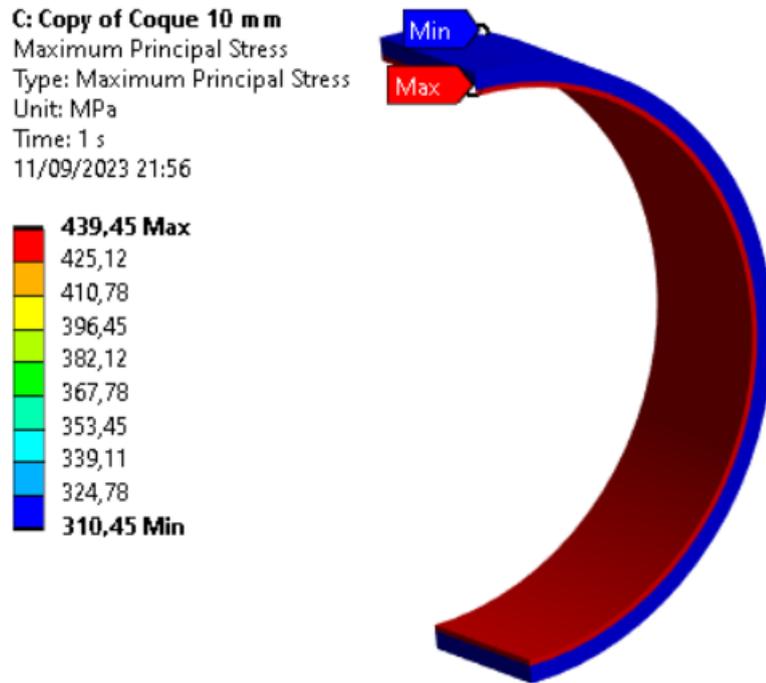


O comportamento das curvas é muito similar ao ocorrido com espessura de camada de coque com 5 mm, indicando deformações plásticas na tubulação.

4.2.2.2 Tensões máximas principais

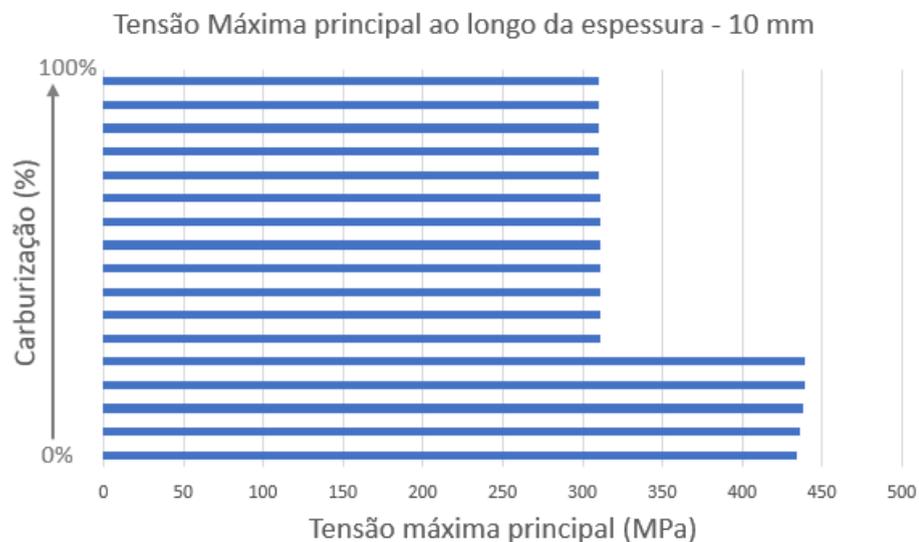
A análise das tensões máximas principais indica as tensões trativas que ocorrem em função dos carregamentos aplicados. A Figura 50 indica as tensões máximas principais atuantes no tubo:

Figura 50 - Tensões máximas principais

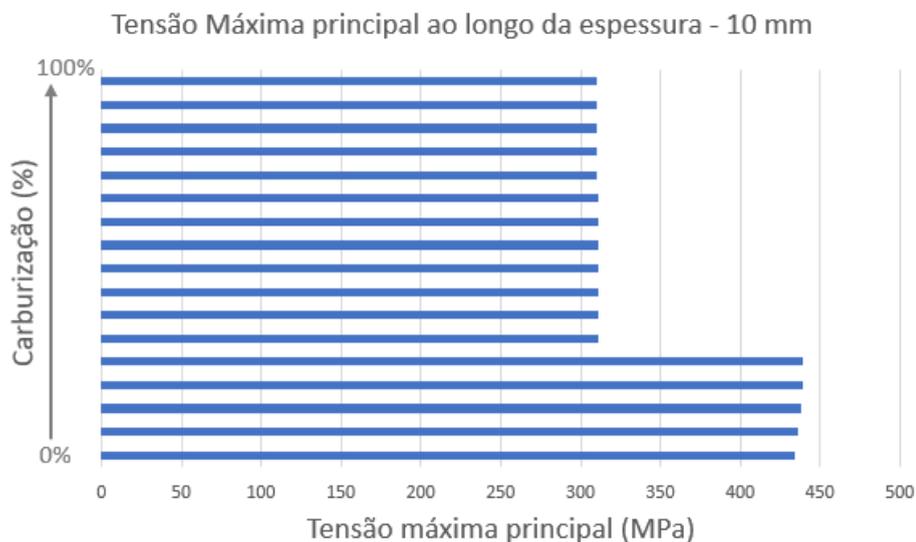


A tensão máxima principal encontrada foi em torno de 439,45 MPa para a região carburizada, a qual ficou acima do limite de resistência à tração do material (414 MPa) este estudo demonstra que comparado ao cenário com 5 mm, que se houver algum tipo de trinca nucleada esta pode se propagar pelo material, ocorrendo a fratura. Para o material não carburizado, a tensão ficou abaixo deste limite (470 MPa) indicando que não ocorreria falha nesta região.

Figura 51 - Gráfico da tensão máxima principal em função da variação de espessura – 10 mm



Conforme indicado na Figura 51 - Gráfico da tensão máxima principal em função da variação de espessura – 10 mm



, o perfil das tensões ao longo da espessura, se manteve similar ao encontrado para a espessura de coque de 5 mm.

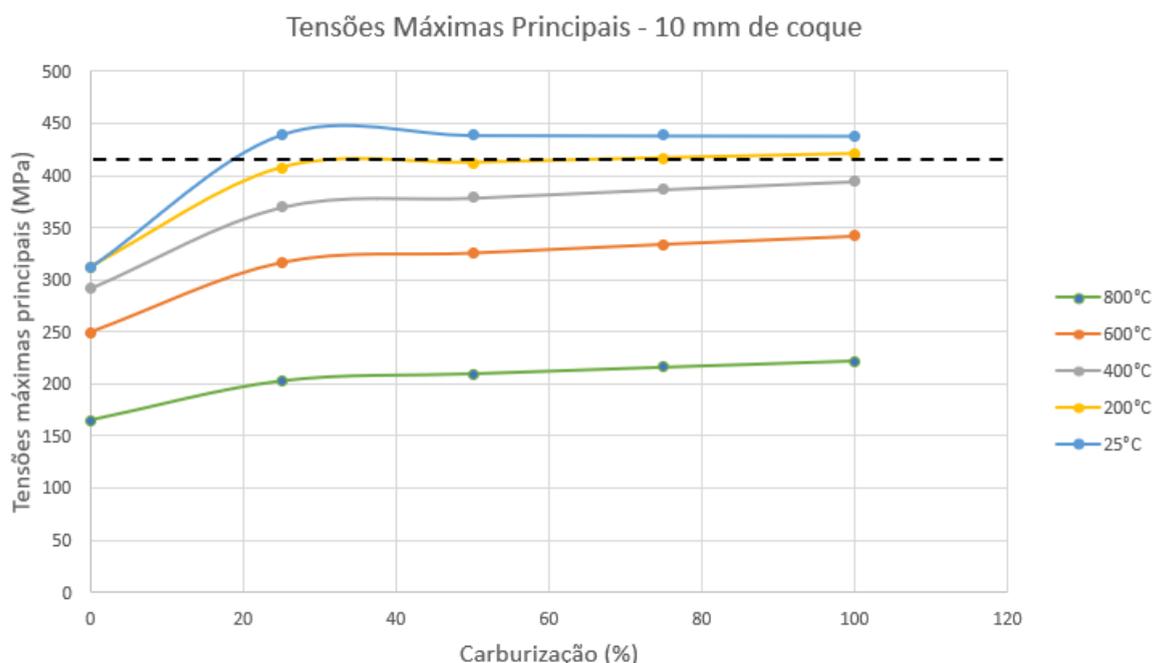
A tabela abaixo apresenta todas as tensões máximas principais obtidas das simulações, cujos valores indicam que um resfriamento a partir de 200°C, com uma carburização entre 50% e 75% poderia ocorrer trincamento em caso de alguma trinca nucleada.

Tabela 18 - Tensões máximas principais para 10 mm de coque

Temperatura (°C)	Carburização (%)	Tensão Máxima principal (MPa)
1000-800	0	165,25
	25	202,94
	50	209,72
	75	216,09
	100	222,05
800-600	0	249,14
	25	316,49
	50	325,65
	75	334,13
	100	341,96
600-400	0	291,69
	25	369,85
	50	378,81
	75	387,06
	100	394,64
400-200	0	312,46
	25	407,47
	50	412,33
	75	416,74
	100	420,75
200-25	0	311,18
	25	439,45
	50	438,95
	75	438,60
	100	438,37

O comportamento das tensões foi ligeiramente maior do que o apresentado no item 4.2.1.2 (5 mm de coque) indicando que, para estas espessuras de 10 mm, avaliadas a falha pode ocorrer nas serpentinas, ou ainda a camada de coque poderia quebrar antes do tubo falhar, mas isto não está sendo considerado neste trabalho.

Figura 52 - Gráfico das tensões máximas principais para 10 mm de coque

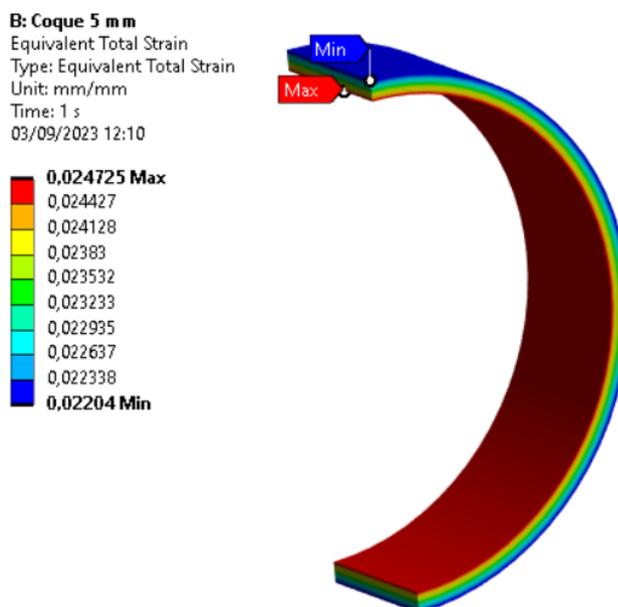


As tensões máximas principais em alguns casos apresentaram tensões acima do limite de resistência à tração do material (414 MPa) com a camada de coque de 10 mm, indicando uma região de risco de fratura do tubo.

4.2.2.3 Deformações

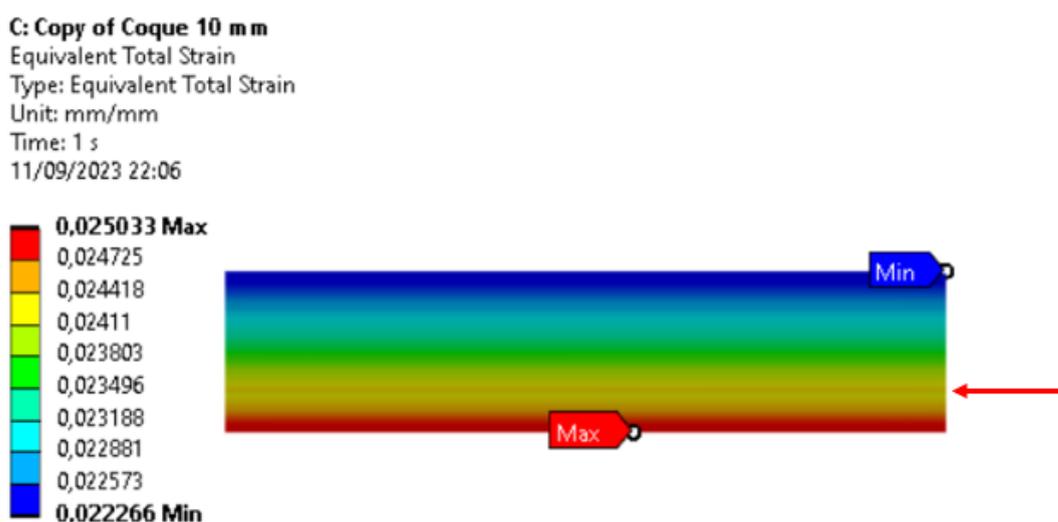
A figura abaixo descreve as deformações equivalentes totais que ocorreram no material.

Figura 53 - Deformação total da peça



As deformações encontradas ainda se encontram abaixo daquelas que causam a falha do material: 0,03 para a camada carburizada e 0,1 para a não carburizada. A Figura 54, traz detalhes das distribuições:

Figura 54 - Detalhe da distribuição das deformações



Conforme indicado na figura acima, percebe-se uma linha de cor vermelha próxima da região de transição entre as regiões carburizadas e não carburizadas,

indicando um aumento da deformação nesta região, assim como o valor máximo na face inferior do tubo. A Tabela 19 informa todas as deformações avaliadas através das simulações:

Tabela 19 – Deformações totais analisadas para coque de 10 mm

Temperatura (°C)	Carburização (%)	Deformação total (%)	Deformação final do material (%)
800	0	1,09	10,0
	25	1,07	
	50	1,07	
	75	1,07	
	100	1,07	
600	0	1,82	8,2
	25	1,79	
	50	1,79	
	75	1,79	
	100	1,79	
400	0	2,32	6,3
	25	2,29	
	50	2,29	
	75	2,29	
	100	2,29	
200	0	2,49	4,5
	25	2,4	
	50	2,4	
	75	2,4	
	100	2,4	
25	0	2,5	3,0
	25	2,5	
	50	2,5	
	75	2,5	
	100	2,5	

Conforme indicado na Tabela 19, as deformações solicitantes também não ultrapassaram os valores limites do material, conforme também ocorreu com uma camada de coque de 5 mm.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, conclui-se que, a carburização pode afetar de forma considerável a resistência dos tubos tanto em temperaturas elevadas de operação quanto num resfriamento repentino do forno.

Os resultados indicaram que os maiores esforços encontrados estão dispostos nas camadas de transição entre o material carburizado e não carburizado, sendo, portanto, as zonas mais críticas onde podem ocorrer a propagação de trincas.

Através da análise das tensões verificou-se que acima da camada de transição entre carburizado e não carburizado ocorreram tensões principais positivas, enquanto que abaixo negativas, conforme publicado por alguns autores, dentre eles Harston e Ropital (2007).

Através dos cenários avaliados, se não houver formação de coque na superfície interna da tubulação e ocorrer uma parada de emergência do forno a diferença de propriedades entre o material carburizado e não carburizado não geram tensões acima do limite de escoamento dos materiais indicando uma menor probabilidade de haver deformação plástica.

Todavia, ao se adicionar as camadas de coque, as tensões circunferenciais sobem significativamente, em torno de 10 vezes, por conta da diferença de condutividade térmica entre o coque e o metal, aumentando consideravelmente as chances de falha.

Diante dos modelos analisados, através da análise linear, e adotando o critério de falha local do ASME seção VIII div. 2, onde ocorreria falha seria durante o resfriamento de 1000°C até 400°C com 50% de camada carburizada.

Pelos resultados da análise não linear, o cenário mais crítico para as tensões, ocorreu quando a temperatura do sistema chega em torno de 200°C e 75% de camada carburizada, tanto para o coque com 5 mm, quanto para o coque com 10 mm.

Porém, no tocante às deformações, os resultados indicaram que os valores solicitantes não ultrapassaram os limites de resistência dos materiais, tanto para 5 mm de camada de coque, quanto para 10 mm.

Um fator importante para determinação se ocorreria realmente uma falha do tubo é se o coque suportaria essas tensões geradas pelo resfriamento sem quebrar,

o que não foi considerado nestes modelos, onde o coque foi considerado como um elemento rígido.

5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos e o conhecimento adquirido no decorrer desse trabalho, sugere-se:

- Estudar a partir de qual espessura o coque não quebraria numa parada de emergência;
- Avaliar a localização dos pontos mais críticos da serpentina considerando as tensões pela própria suportação do conjunto, em paralelo com a formação do coque e carburização.
- Realizar este estudo com diferentes ligas utilizadas nos fornos, como a 35Cr45Ni.
- Empregar camadas intermediárias com diferentes estados de carburização.
- Introduzir as equações de difusão do carbono no modelo.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos a base da tecnologia CAE**. São Paulo. 2013.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª ed. 2003.
- BATHE, K. J. **Finite element procedures**. 2ª ed. Watertown, 2016.
- BAUKAL, C. E.; VACCARI, M.; CLAXTON, M. G. Burners for reformers and cracking furnaces. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 45, p. 937–984, 1 jan. 2019.
- BIEHL, L. V. **Estudo da carburização de tubos de ligas de Fe-Cr-Ni aplicadas em fornos de pirólise**. 2002.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 9ª ed. 2016.
- CHEN, T. et al. Carburization of ethylene pyrolysis furnace tube in a petrochemical plant. **Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME**, v. 137, n. 6, 1 dez. 2015.
- DAVID, S. M. et al. Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. **Polymers**, v. 12, n. 4, p. 818, 4 abr. 2020.
- ESSS. **Método dos Elementos Finitos e Geração de Malhas**, 2023.
- FUYANG, C. et al. A physics-based life prediction model of HP40Nb heat-resistant alloy in a coupled creep-carburisation environment. **Materials Science and Engineering: A**, v. 860, p. 144260, dez. 2022.
- GEERTS, M. et al. Steam Cracking Coke Properties and Their Influence on Furnace Run Length Predictions: Experimental and Modeling Study. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 52, p. 22460–22472, 30 dez. 2020.
- GOMMANS, R.; JAKOBI, D. **Typical pyrolysis coil failures and how to combat them**. Spring National Meeting. **Anais...**New Orleans: 2002.
- GRABKE, H. J. Points to be considered in carburization testing of alloys. **Materials and Corrosion**, v. 49, p. 278–281, 1998.
- GREEN, J. **An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics**. 1998.

GUO, J. et al. Effect of carburization (pyrolysis furnace tube main failure factor) on the microstructure and properties of HPNb alloy tube. **Engineering Failure Analysis**, v. 115, 1 set. 2020.

HAN, Z. et al. Material degradation and embrittlement evaluation of ethylene cracking furnace tubes after long term service. **Engineering Failure Analysis**, v. 97, p. 568–578, 1 mar. 2019.

HARSTON, J. D.; ROPITAL, F. **Corrosion in Refineries**. 2007.

HERNÁNDEZ, J. W. C. Estudo da resistência à corrosão por pite de aços inoxidáveis austeníticos: influência da adição de manganês em solução sólida. **Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP)**, 2015.

KANE, R. H. The evolution high temperature alloys: a designer's perspective. **First International Conference on Heat-Resistant Materials**, 1991.

KHODAMORAD, S. H. et al. Analysis of ethylene cracking furnace tubes. **Engineering Failure Analysis**, v. 21, p. 1–8, 1 abr. 2012.

LOTHONGKUM, G.; THAWEEPORNKHASEMSUKH, N.; WANGYAO, P. **The Effect of Long-Term Thermal Exposure at Elevated Temperatures on Microstructures and Mechanical Properties in Centrifugally Casted Iron-Base Alloy** *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2006.

MENG, F. M.; IGUCHI, Y.; KOJIMA, I. Reduction, Carburization and Melting Behavior of Iron Ore Pellets Containing Coal Char on Graphite on Heating. **ISIJ International**, 2001.

METALS HANDBOOK. Volume 15 Castings. **ASM International**, v. 15, 1998.

MOHAMMADNEZHAD, M. et al. Insight to the microstructure characterization of a hp austenitic heat resistant steel after long-term service exposure. **Acta Metallurgica Slovaca**, v. 24, n. 4, p. 296–305, 31 dez. 2018.

MOREIRA, M. F. **Desenvolvimento de metodologia de ensaio de ligas resistentes a carburação**, 2003.

OTEGUI, J. L.; BONA, J. DE; FAZZINI, P. G. Effect of coking in massive failure of tubes in an ethylene cracking furnace. **Engineering Failure Analysis**, v. 48, p. 201–209, 1 fev. 2015.

POPOVA, I. P.; ORYSHCHENKO, A. S. Analyzing the Possible Causes of Inadmissible Axial Bending of Reaction Tubes of a Pyrolysis Plant that are Made of Alloy of Base Composition 45Cr25Ni35SiNb. **Metallurgist**, v. 67, n. 1–2, p. 10–16, 26 maio 2023.

RAMANARAYANAN, T. A. et al. Carburization of high chromium alloys. **Materials and Corrosion**, v. 49, n. 4, p. 226–230, abr. 1998.

RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering, Fourth Edition**. 2005.

SANTANA, P. et al. **Aumento da assertividade nas inspeções em serpentinas da radiação de fornos de pirólise**. 2019.

SANTANA, P. M. B. **Influência da carburização na falha de tubos da radiação de fornos de pirólise**. 2010.

SANTOS, M. et al. Effect of severe operation conditions on the degradation state of radiant coils in pyrolysis furnaces. **Engineering Failure Analysis**, v. 56, p. 194–203, 1 out. 2015.

SCHMIDT+CLEMENS. Centralloy G4852 Micro - Material Data Sheet. **Schmidt+Clemens Group**, 2009.

SHEN, L. et al. Numerical Simulation of Damage Evolution and Life Prediction for Two Commercial Fe-Cr-Ni Alloys Subjected to Mechanical and Environmental Factors. **Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME**, v. 138, n. 5, 1 out. 2016.

SHEN, L. M.; GONG, J. M.; LIU, H. S. Effect of Coking Size on the Thermal Diffusion and Stress Distribution of Cr25Ni35Nb and Cr35Ni45Nb Austenitic Steels. **Applied Mechanics and Materials**, v. 750, p. 192–197, abr. 2015.

SILVA, F. P. DA et al. Non-destructive ultrasonic testing and machine learning-assisted early detection of carburizing damage in HP steel pyrolysis furnace tubes. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 218, 15 ago. 2023.

SILVEIRA, T. F. A. et al. **Microestrutura de tubos de forno de pirólise desativados após 91.000h de operação - resultados da metalografia ótica**. 6ª Conferência sobre tecnologia de equipamentos. **Anais...**Salvador: 2002.

SKINDARAS, R.; VALIULIS, A. V; SPYCHALSKI, W. L. The structure and mechanical properties of the high chromium and nickel content cast alloy after long duration work in high temperature. v. 19, n. 6, p. 706–710, 2014.

SORIANO, H. L. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. 1ª ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.

SOUZA, L. A. F. DE. **Método dos Elementos Finitos - implementação no programa Scilab**. 1ª ed. 2021.

SWANEPOEL, D. B.; ESCHBACH, K. Embrittlement of HP40Nb Heat-Resistant Alloy at Intermediate Operating Temperatures. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 21, n. 4, p. 1133–1142, 1 ago. 2021.

TAWANCY, H. M. Degradation of mechanical strength of pyrolysis furnace tubes by high-temperature carburization in a petrochemical plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 7, p. 2171–2178, 1 out. 2009.

THAM, C. M. **Pyrolysis furnace**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.klmtechgroup.com/PDF/Articles/articles/Pyrolysis%20Furnace%20rev%20intro.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2023.

VAN SPEYBROECK, V. et al. Modeling elementary reactions in coke formation from first principles. **Molecular Simulation**, v. 33, n. 9–10, p. 879–887, ago. 2007.

WAUTERS, S.; MARIN, G. B. Computer generation of a network of elementary steps for coke formation during the thermal cracking of hydrocarbons. **Chemical Engineering Journal**, v. 82, n. 1–3, p. 267–279, 15 mar. 2001.

XU, G. T. et al. Characterization of elastic-plastic properties of surface-modified layers introduced by carburizing. **Mechanics of Materials**, v. 144, p. 103364, 1 maio 2020.

YANG, M.; CE, D.; ZIHUA, Z. Oxidation and carburizing behaviors of HP40Nb tube after 100,000h service in pyrolysis furnace. **Engineering Failure Analysis**, p. 107686, 2 out. 2023.