

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES TERMOMECÂNICAS PRESENTES  
AO LONGO DA VIDA DE UM REPARO DE TUBULAÇÃO DE AÇO  
AISI 316L**

**ADRIANA DA SILVA PACHECO BOM**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE**

**DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**AGOSTO - 2018**

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES TERMOMECAÑICAS PRESENTES  
AO LONGO DA VIDA DE UM REPARO DE TUBULAÇÃO DE AÇO  
AISI 316L

**ADRIANA DA SILVA PACHECO BOM**

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia,  
da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do  
título de Doutora em Engenharia e Ciência dos  
Materiais.

Orientador: Prof. Ph. D. Eduardo Atem de Carvalho

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2018

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

B695 Bom, Adriana da Silva Pacheco.

Avaliação das tensões termomecânicas presentes ao longo da vida de um reparo de tubulação de aço AISI 316L / Adriana da Silva Pacheco Bom. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

116 f. : il.

Bibliografia: 72 - 77.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2018.

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho.

1. fadiga. 2. tubulações danificadas. 3. choque térmico. 4. concentrador de tensão. 5. método de elementos finitos. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 620.11

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES TERMOMECAÑICAS PRESENTES  
AO LONGO DA VIDA DE UM REPARO DE TUBULAÇÃO DE AÇO  
AISI 316L

**ADRIANA DA SILVA PACHECO BOM**

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia,  
da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do  
título de Doutora em Engenharia e Ciência dos  
Materiais.

Aprovada em: 08 de agosto de 2018

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Elaine Aparecida Santos Carvalho Costa (D.Sc., Engenharia e Ciência dos  
Materiais) – LAMAV/UENF

---

Prof<sup>a</sup>. Márcia Giardinieri de Azevedo (D.Sc., Engenharia Química) – LAMAV/UENF

---

Prof<sup>a</sup>. Shirlene Chagas (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro  
Universitário Fluminense, UNIFLU

---

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph. D., Engenharia Mecânica) - LAMAV/UENF

Orientador

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada filha, Clara, ao meu marido, Pierre, pela ajuda, compreensão e companheirismo. À minha mãe, Rozélia, que pela forma brilhante e inquestionável sempre me incentivou me mostrando que eu poderia e posso alcançar meus sonhos e objetivos com paciência, perseverança e dedicação. E, ao meu pai, Irineu, que mesmo distante acreditou em mim. Obrigada por acompanharem mais essa conquista.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, autor da minha fé, por iluminar meus caminhos, me concedendo saúde, força e coragem na superação dos obstáculos. Pela concessão da vida e da inteligência e por representar a paciência nos momentos necessários.

À minha mãe, Rozélia Matias da Silva, fonte incessante de amor e empenho dedicado a mim em todos os momentos.

Ao meu marido, Pierre Bom, por ser meu companheiro em todos os momentos e por compreender meus momentos de ausência. Por ficar sentado comigo durante noites me incentivando.

À minha amada filha, Clara Pacheco Bom, que com seu sorriso inocente nos seus primeiros meses de vida me proporcionou um amor e uma alegria que eu desconhecia.

Ao meu orientador, Eduardo Atem de Carvalho, pelos ensinamentos, pela paciência, compreensão e pela orientação em cada etapa.

Às professoras, Elaine Aparecida, Márcia Giardinieri e Shirlene Chagas, pela honra de tê-las participando da comissão avaliadora deste trabalho.

Aos amigos que me incentivaram em cada etapa, seja nas disciplinas, nos momentos de descontração e principalmente nos momentos difíceis. Obrigada pela força: Valdenir Moreira Júnior, Isabela Areias, Zulmira Guimarães, Emilene Pimentel, Fabrício Bagli.

Aos familiares, amigos e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

E a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela oportunidade.

**Muito obrigada!**

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XVII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução.....	1
1.1.1 Aspectos Gerais.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivos Gerais.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificativas.....	4
1.4 Ineditismo.....	5
<b>CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Teoria e Tipos de Falha.....	7
2.2 Tensões Mecânicas.....	9
2.2.1 Vasos de Pressão Cilíndricos.....	9
2.2.2 Comportamento Tensão-Deformação.....	11
2.2.3 Mecânica da Fratura.....	13
2.2.4 Fadiga.....	15
2.2.4.1 Fatores que Influenciam no Desenvolvimento à Fadiga.....	18
2.2.4.2 Fadiga por Fluência.....	20

2.2.4.3 Quantificação da Resistência à Fluência das Ligas Estruturais.....	23
2.3 Concentrador de Tensão.....	26
2.3.1 Concentração de Tensão em Problema 2D.....	28
2.3.2 Concentração de Tensão Local e Não Local.....	29
2.3.3. Concentração de Tensão Múltipla.....	30
2.3.4 Concentração de Tensão Transiente Térmico - $K_{TT}$ .....	30
2.3.5 Multiplicação de Concentradores de Tensão - $K_{TS}$ .....	31
2.4 Efeitos da Temperatura.....	34
2.5 Tensões Térmicas.....	34
2.6 Aços: Aços Resistentes à Corrosão.....	36
2.6.1 Aço Inoxidável Austenítico - Aços Típicos AISI 304 e 316.....	37
2.7 Método de Elementos Finitos (MEF).....	38
2.7.1 Geração de Malha.....	40
2.7.2 Técnicas de Modelagem .....	41
2.7.3 Aplicação de Carga e Condições de Contorno.....	41
2.7.4 Aplicações de Elementos Finitos.....	42
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
3.1 Programa Utilizado.....	46
3.2 Geometria do Componente / Modelo de Análise para o MEF.....	46
3.3 Definição do Material.....	47
3.3.1 Propriedades do Material - Aço AISI 316L.....	47
3.4. Definição do Elemento / Estado de Tensão.....	48
3.5 Condições de Contorno / Critério de Convergência.....	48



3.5.1 Casos Estudados.....	50
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>52</b>
4.1 Avaliação do Modelo.....	52
4.1.1 Geometria: Tubo Íntegro.....	52
4.1.1.1 Estudo Devido a Pressão.....	52
4.1.1.2 Estudo Devido ao Gradiente de Temperatura.....	54
4.1.2 Geometria: Tubo com Descontinuidade.....	56
4.1.2.1 Estudo Devido a Pressão – MEF.....	56
4.1.2.1.1 Estudo Devido a Pressão - Tensão Tangencial – MEF.....	56
4.1.2.1.2 Avaliação do Concentrador de Tensão Devido a Pressão Interna.....	60
4.1.2.2 Estudo Devido ao Gradiente de Temperatura – MEF.....	61
4.1.2.2.1 Tensões Térmicas - Tensão Tangencial – MEF.....	64
4.1.2.2.2 Avaliação do Concentrador de Tensão Devido ao Gradiente de Temperatura / Tensões Térmicas.....	65
4.1.2.3 Avaliação do Concentrador Total de Tensão.....	66
4.1.2.4 Utilização dos Concentradores de Tensão.....	67
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Modos de abertura de trincas (Carvalho, 1992).....	1
<b>Figura 2.1:</b> Seção transversal de vaso de pressão cilíndrico submetido a pressão interna e externa (Budynas, 2011).....	9
<b>Figura 2.2:</b> Comportamento das distribuição de tensões em um cilindro de parede grossa submetido à pressão interna: (a) Distribuição de Tensão Tangencial; (b) Distribuição de Tensão Radial (Budynas, 2011).....	10
<b>Figura 2.3:</b> Curva tensão-deformação em função da temperatura para o aço AISI 316L (Depradeux, 2004).....	12
<b>Figura 2.4:</b> Diagrama esquemático indicando uma falha por fadiga (Boniatti e Iturrioz, 2003).....	15
<b>Figura 2.5:</b> (a) Curva típica para deformação por fluência (Boniatti e Iturrioz, 2003); (b) As diferentes fases de fluência para aço AISI 316L (Depradeux, 2004).....	21
<b>Figura 2.6:</b> Variação típica das taxas de fluência nas curvas de Andrade (SENAI-RJ, 2012).....	22
<b>Figura 2.7:</b> (a) Plano de tensão; (b) Plano de deformação (Pilkey, 1997).....	29
<b>Figura 2.8:</b> Concentração de tensão múltipla: (a) Pequeno entalhe na borda do furo central; (b) Seção ampliada do entalhe (Pilkey, 1997).....	30
<b>Figura 2.9:</b> Disco submetido a um fluxo de calor no cento (Carvalho, 2005).....	31
<b>Figura 2.10:</b> (a) Representação da metade da seção da tubulação em meio à pressão interna. (b) Representação gráfica da variação da tensão em função do raio no ponto G.....	32
<b>Figura 2.11:</b> Representação gráfica da variação do concentrador de tensão térmico transiente em função do tempo.....	33

**Figura 2.12:** Cilindro vazado em meio a troca de calor (Incropera, 1990)..... 35

**Figura 3.1:** Representação da geometria e malha. Regiões A e B mais "grosseiras" e regiões C e D mais refinadas. Os raios interno e externo são, respectivamente,  $r_i$  e  $r_o$ ,  $\ominus$  é o ângulo associado ao aro de tensão,  $T_i$  e  $T_o$  correspondem às temperaturas interna e externa,  $w$  é a espessura da parede, "a" é a profundidade do entalhe,  $p_i$  é a pressão interna e  $r$  é o raio do entalhe..... 46

**Figura 4.1:** Ilustração da análise da tensão tangencial sigma  $\theta$  para tubo perfeito via MEF..... 52

**Figura 4.2:** Representação gráfica da distribuição de tensão tangencial ao longo da espessura da tubulação: MEF e equação..... 53

**Figura 4.3:** Representação gráfica da distribuição de tensão radial ao longo da espessura da tubulação: MEF e equação..... 53

**Figura 4.4:** Ilustração da análise da distribuição de temperatura para tubo perfeito via MEF (convecção)..... 55

**Figura 4.5:** Representação gráfica da distribuição de temperatura ao longo da espessura da tubulação..... 55

**Figura 4.6:** Ilustração da análise de distribuição de tensão tangencial considerando  $a/w = 0,05$  - MEF..... 57

**Figura 4.7:** Ilustração da análise de distribuição de tensão tangencial considerando  $a/w = 0,25$  - MEF..... 57

**Figura 4.8:** (a) Distribuição de tensão tangencial ao longo da espessura da tubulação em componentes com diferentes descontinuidades..... 58

(b) Distribuição de tensão tangencial adimensionalizada em componentes com diferentes descontinuidades..... 59

**Figura 4.9:** Expressão do concentrador de tensão devido as tensões mecânicas para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação..... 61

<b>Figura 4.10:</b> Ilustração da análise de distribuição de temperatura considerando $a/w = 0,25$ - MEF.....	62
<b>Figura 4.11:</b> (a) Distribuição de temperatura ao longo da espessura da tubulação em componentes com diferentes descontinuidades.....	62
(b) Distribuição de temperatura adimensionalizada em tubos com diferentes descontinuidades.....	63
<b>Figura 4.12:</b> Expressão do concentrador de tensão devido às tensões térmicas para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação.....	66
<b>Figura 4.13:</b> Expressão do concentrador total de tensão para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação.....	67

**ÍNDICE DE TABELAS**

<b>Tabela 2.1:</b> Recomendações típicas para escolha de aços usados em temperaturas altas: a receita básica é aumentar o teor de Cr e de Mo à medida que a temperatura $\theta$ aumenta até cerca de 650°C e usar aços inoxidáveis acima desta temperatura (Castro, 2009).....	24
<b>Tabela 2.2:</b> Limites de temperatura recomendadas pela norma API 530, referente ao cálculo da espessura de tubos de aquecimento em refinarias de petróleo (Castro, 2009).....	25
<b>Tabela 3.1:</b> Composição química do aço AISI 316L (Favorit, 2018).....	47
<b>Tabela 3.2:</b> Propriedades mecânicas do aço AISI 316L.....	48
<b>Tabela 4.1:</b> Avaliação das tensões térmicas.....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E$	módulo de elasticidade ou de Young
$h$	coeficiente de calor convectivo
$h_i$	coeficiente de convecção interna
$h_e$	coeficiente de convecção externa
$k$	condutividade térmica
$K$	fator de intensidade de tensões
$K_{IC}$	tenacidade à fratura
$K_T$	concentrador de tensão
$K_{TS}$	multiplicação de concentradores de tensão
$K_{TM}$	concentrador de tensão devido a tensão mecânica
$K_{TT}$	concentrador de tensão transiente térmico
$p_i$	pressão interna
$p_o$	pressão externa
$r$	raio em um dado ponto da tubulação
$r_i$	raio interno
$r_o$	raio externo
$R$	espessura residual de parede da tubulação após reparo da trinca
$t$	tempo
$T$	temperatura nominal
$T_i$	temperatura interna
$T_o$	temperatura externa
$T_s$	temperatura na superfície
$w$	espessura da tubulação perfeita
$\mathcal{E}$	Deformação
$\mathcal{E}_o$	deformação inicial
$\dot{\mathcal{E}}_{pri}$	taxa de fluência primária
$\dot{\mathcal{E}}_s$	taxa de fluência secundária

$\dot{\varepsilon}_{ter}$	taxa de fluência terciária
$\sigma$	tensão normal
$\sigma_r$	tensão radial
$\sigma_l$	limite de escoamento
$\sigma_n$	tensão nominal
$\sigma_r$	tensão radial
$\sigma_\theta$	tensão tangencial
$\tau$	tensão cisalhante
$\gamma$	componente de deformação
$\theta$	temperatura
$\theta_f$	temperatura de fusão
$\alpha$	coeficiente linear de dilatação térmica
$a$	profundidade da trinca na tubulação
$C$	carbono
$Cr$	cromo
$Fe$	ferro
$Mo$	molibdênio
$Mn$	manganês
$Nb$	nióbio
$Ni$	níquel
$P$	fósforo
$S$	enxofre
$Si$	silício
$Ti$	titânio
$V$	vanádio
$x,y,z$	coordenadas cartesianas
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AISI</i>	<i>African Information Society Initiative</i>
<i>API</i>	<i>Application Programming Interface</i>

*FIT* Fatores de Intensificação de Tensão  
*MEF* Método de Elementos Finitos  
*RAM* *Random Access Memory*  
*SAE* *Society of Automotive Engineers*  
*TP* Tubo Perfeito



## RESUMO

É comum tubos sofrerem danos devido a choques térmicos. Trincas originadas neste processo são geralmente superficiais e localizadas nas proximidades da área de maior concentração de tensão do componente. Essas fissuras podem, a longo prazo, afetar a capacidade de trabalhar nos parâmetros previstos e, conseqüentemente, a segurança, uma vez que constituem uma das formas mais perigosas de danos em vasos de pressão. Em geral, o processo de reparo em uma tubulação com trincas consiste em remover a área danificada, recompor a parede do tubo através de solda e aplicar tratamento térmico adequado ao reparo. No entanto, dependendo das condições operacionais, esse processo torna-se muito difícil. Este trabalho propõe uma outra forma de reparo em um superaquecedor de caldeira de plataforma petrolífera que sofreu abertura de trinca devido ao choque térmico, baseado apenas na remoção de material na região afetada. Para tal, executa-se uma análise para avaliar os efeitos provocados pelos concentradores de tensão resultantes do entalhe presente na tubulação. Para este estudo foi utilizado o Método de Elementos Finitos. Um semi-tubo foi simulado e um entalhe do tipo "U" foi introduzido na parede interna da tubulação. O raio do entalhe variou de uma razão para espessura nominal da parede de 0,05 até 0,25. As distribuições de tensões provenientes da pressão e da alta temperatura atuantes na parede interna do componente foram calculadas e os fatores de concentração de tensão determinados em relação a um tubo imaginário de mesma espessura que o valor residual. Desta forma, foi possível determinar uma expressão polinomial que descreve os valores dos concentradores totais de tensão devido às tensões mecânicas e térmicas para os reparos semicirculares de  $a/w$  na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação. Em presença de descontinuidade, o concentrador total de tensão deve ser aplicado à tensão de trabalho da peça. Diante disso, foi possível obter o limite máximo de pressão que deve ser adotado ao vaso de pressão. Este trabalho também discute as possibilidades de propagação de trinca controladas por meio de alteração nos gradientes de temperatura associadas à transferência de calor por convecção que ocorre na parte interna do tubo.

**Palavras-chave:** fadiga, tubulações danificadas, choque térmico, concentrador de tensão, método de elementos finitos.

## ABSTRACT

It is common for pipes suffer damage due to thermal shock. Cracks originated in this process are generally superficial and located nearby the area of greater stress concentration. These cracks can, in the long term, affect the component's ability of working as expected and consequently affect the safety, since it is one of the most dangerous forms of damage in pressure vessels. In general, the repair process in a pipe with cracks is to remove the entire damaged area, recompose the component wall through welding and apply appropriate heat treatment to repair. However, depending on the operating conditions, this process becomes very difficult. This paper proposes another way to repair a boiler superheater of an oil rig that suffered crack due to thermal shock, based only on material removal in the affected region. So, was run an analysis to evaluate the effects caused by stress concentrators resulting from this slot in the pipe. For this study, was used the finite element method. A half-pipe was simulated and a notch of type "U" was introduced on the inner wall of the pipe. The radius of the notch varied from a rate for nominal wall thickness of 0.05 up 0.25. Stress distributions from active pressure and high temperature on the inner wall of the component were calculated and the stress concentration factors determined in relation to an imaginary pipe of the same thickness as the residual value. In this way, it was possible to determine a polynomial expression that describes the values of the total stress concentrators due to the mechanical and thermal stresses for semicircular repairs of  $a/w$  in the range of 0.05 to 0.25 of the wall thickness of the pipe. In the presence of discontinuity, the total stress concentrator must be applied to the working stress of the component. In view of this, it was possible to obtain the maximum pressure limit that should be used to the pressure vessel. This paper also discusses the possibilities of crack propagation by means of controlled change in temperature gradients associated with the transfer of heat by convection active on the inner wall of the pipe.

**Keywords:** fatigue, damaged pipes, thermal shock, stress concentrator, finite element method.

# CAPÍTULO 1

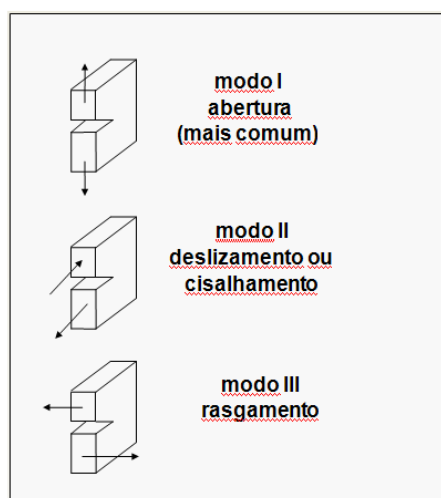
## 1.1 Introdução

### 1.1.1 Aspectos Gerais

Falhas por trincamento que ocorrem em diversos materiais e constantes esforços para prevenir tais defeitos têm sido motivo de grandes investimentos por parte das indústrias. Teorias como Mecânica da Fratura têm sido desenvolvidas e empregadas para previsões de carregamento com os quais estruturas contendo trincas irão ou não falhar.

Essas trincas, normalmente resultantes de defeitos nos materiais introduzidos durante sua fabricação ou então causadas pela ação de carregamentos cíclicos, se iniciam próximo a entalhes ou concentradores de tensão, geralmente presentes na maior parte dos componentes mecânicos (Budynas, 2011).

Para uma consistente análise de Mecânica da Fratura ou para prevenir-se de falhas estruturais, ainda na fase de projeto, faz-se necessário determinar parâmetros chamados Fatores de Intensificação de Tensão (FIT) (Carvalho, 1992). Estes fatores estão relacionados aos três modos fundamentais de abertura de trincas (Figura 1.1). O modo I corresponde à separação normal das paredes da trinca. Os modos II e III são, fundamentalmente, correspondentes ao deslocamento paralelo entre as paredes da trinca (Carvalho, 1992).



**Figura 1.1:** Modos de abertura de trincas (Carvalho, 1992).

O processo de abertura de trincas em um determinado componente está diretamente relacionado à geometria do mesmo, ao carregamento a que ele está sujeito e às condições de operação do equipamento (Boniatti e Iturrioz, 2003).

Uma tubulação sujeita a um escoamento de fluido em meio à troca de calor por convecção, por exemplo, pode apresentar o que chamamos de falha por trincamento devido a danos ocasionados por fadiga ou fluência térmica (choques térmicos), uma das formas mais comuns e perigosas de danos em vasos de pressão (Choi et al., 2012). Tais danos podem aparecer em um único episódio de choque térmico ou devido à repetição do fenômeno (Lu, 2003 / Choi et al., 2012). Ocorrências inesperadas ou imprevisíveis durante a operação podem produzir alguns tipos de danos que, a longo prazo, irão afetar o produto e a segurança (Megyesy, 2001). Rachaduras originadas neste processo são geralmente superficiais e localizadas nas proximidades da área de maior concentração de tensão (Lu, 2003) . Outros fatores que também podem desempenhar um papel importante na geração de trincas são: sobrepressão e corrosão. Tais fatores podem intensificar o processo de concentração de tensão, favorecendo ainda mais a abertura de trincas no corpo (McCready, 2017).

Normalmente, o processo de reparo em uma tubulação com trincas consiste em remover toda a área danificada através de esmerilhamento ou usinagem. Logo após, realiza-se inspeção através de ensaios não-destrutivos, como por exemplo, ensaio por líquido penetrante ou partícula magnética, com a finalidade de detectar possíveis vestígios das fissuras. Caso não haja mais trincas na tubulação, recompõe-se a parede da mesma através do processo de soldagem. Após, faz-se a devida inspeção e tratamento térmico adequados ao reparo. Tem-se, portanto, um componente livre de danos para ser utilizado. Porém, em certas aplicações, esse processo torna-se complexo, além de envolver custos altos com a parada total do equipamento. Logo, uma nova solução para o reparo em questão faz-se necessária.

O estudo realizado se enquadra neste processo onde a busca por uma nova solução torna-se fundamental para o reparo da tubulação, uma vez que o

componente, o qual este trabalho se refere, constitui um superaquecedor e encontra-se a bordo de uma embarcação, especificamente em uma caldeira de plataforma de petróleo, dificultando o processo natural de reparo.

Sabendo deste episódio e tendo em vista as condições de operação a que o componente está sujeito, em geral, os engenheiros já dimensionam uma tubulação de parede espessa, ainda na fase de projeto, que permita futuramente o reparo do tubo por meio de retirada de material.

Este trabalho propôs reparo utilizando o esmerilhamento para remoção dos danos, uma técnica simples, isenta de tratamento térmico. Posteriormente, foram avaliados os efeitos do entalhe sobre vida à fadiga no componente, considerando que o mesmo estava sob os efeitos da pressão interna e da alta temperatura no interior da tubulação. Este estudo também propôs analisar as possibilidades de propagação de trinca originadas por meio de alteração de gradientes de temperatura associadas à transferência de calor por convecção que ocorre na parte interna do tubo (caldeira).

Para o estudo em questão, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos, uma aproximação numérica utilizada para solucionar equações diferenciais parciais. É importante ressaltar que os dados utilizados neste trabalho se referem a uma tubulação de aço AISI 316L. No entanto, o modelo de elementos finitos deste estudo pode ser aplicado para um componente de diferente material desde que se faça alteração nos dados de entrada da análise.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos Gerais**

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e avaliar a viabilidade de um processo de reparo alternativo baseado na remoção localizada de material de um superaquecedor de caldeira de plataforma petrolífera que sofreu inicialmente choque térmico com aparecimento de trincas superficiais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar, para transientes típicos (partida e parada do equipamento), a localização e a intensidade dos gradientes de temperatura ao longo de uma tubulação sujeita à troca de calor por convecção.
- b) Determinar o concentrador de tensão transiente térmico considerando os reparos propostos ao equipamento.
- c) Determinar o concentrador total de tensão proveniente da pressão e da alta temperatura atuantes na tubulação.
- d) Avaliar a possibilidade do surgimento de trinca pelo uso continuado do equipamento.

### 1.3 Justificativas

Como justificativas do presente estudo destacam-se:

- a) Quanto aos reparos semicirculares: A razão, profundidade da trinca por espessura da tubulação perfeita, ou seja, a razão  $a/w$  de 0,05 até 0,25, foi determinada pela tenacidade à fratura de um aço típico empregado na indústria, porém, acrescido de valor de segurança referentes ao material danificado (deformação plástica) que deve ser removido durante o reparo, formando um entalhe do tipo “U”. Em geral, o processo convencional de reparo consiste em recuperar o componente por meio de usinagem na sobre-espessura em todo o diâmetro da peça a fim de remover toda a área danificada, deixando o equipamento isento de danos e, portanto, pronto para ser reutilizado. Já o reparo proposto neste estudo, utiliza uma técnica simples, baseada apenas na remoção localizada de material formando um entalhe do tipo “U” no componente. A razão  $a/w$  de 0,05 até 0,25 corresponde ao intervalo de variação dos entalhes, sendo que o defeito localizado máximo permitido, por questão de segurança, corresponde a 25% da espessura total do tubo, ou seja, a retirada local de material não pode ultrapassar a 25% da espessura total da tubulação.
- b) Importância Científica: O entendimento correto do efeito dos campos de tensão que surgem em função da geometria dos reparos e a possível

iniciação de futuras trincas são pré-condição para o desenvolvimento de qualquer nova tecnologia de reparos de componentes submetidos às altas pressões e/ou temperaturas.

- c) **Importância Tecnológica:** O método tradicional de recuperação de partes de vasos de pressão e geradores de energia em geral, que possam conter trincas, *pits* ou outras descontinuidades, consiste na remoção de material na área danificada, enchimento com solda e posterior tratamento térmico. Estes procedimentos apresentam grande dificuldade de serem realizados em espaços confinados e de difícil acesso, como nas embarcações. A possibilidade de se desenvolver um método alternativo que reduza o tempo de parada total e que ao mesmo tempo não dependa de procedimentos complexos, aumentam a chance do reparo não afetar a qualidade do equipamento nem sua performance.
- d) **Importância Econômica:** A maior facilidade e a diminuição no tempo de execução dos reparos implicam na redução do custo total de parada do equipamento. Existe o interesse, expresso da PETROBRAS, e de outras empresas do ramo, em entender as possibilidades alternativas de reparo e sua possível aplicação para tubulação deste tipo.

#### **1.4 Ineditismo**

Já existe a solução em que projetistas preveem sobrematerial em vasos de pressão visando reparos futuros do equipamento. No entanto, este sobrematerial requer usinagem total de seção, ou seja, remoção de material em todo o diâmetro interno do componente, tornando-o uniforme. A solução deste trabalho propõe remoção localizada de material. O reparo alternativo é mais barato e simples de ser realizado, no entanto, gera concentrador de tensão na tubulação proveniente da descontinuidade formada no componente através do reparo localizado. Portanto, faz-se necessário o estudo do concentrador de tensão com a finalidade de avaliar se o mesmo é ou não tolerado pelo componente. Outro fator de ineditismo é saber manipular a temperatura e parâmetros de troca de calor, uma vez que seus gradientes são

fundamentais na partida e no desligamento destes equipamentos (vasos de pressão), pois podem ocasionar falha na peça por meio de choque térmico.

É importante ressaltar que descontinuidades como trincas, corrosão ou danos que implicam em perda de integridade do componente, podem ser reparadas até o ponto em que normas permitem a recuperação da peça. Caso contrário, o equipamento torna-se inutilizado.



## CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Teoria e Tipos de Falha

Chama-se "falha" a perda parcial ou terminal da funcionalidade ou capacidade operacional de qualquer equipamento. Chama-se de "mecanismo de dano" a qualquer processo que possa contribuir para a falha. Estes mecanismos podem agir de forma independente ou concomitante para causar as falhas, que podem ser divididas em quatro grupos (Castro, 2009):

- Quebra, o evento terminal de mecanismos de dano como fadiga, fluência, corrosão sob tensão, escoamento etc., a qual pode ser antecipada por eventuais sobrecargas.
- Distorção excessiva, causada por mecanismos de dano como escoamento, flambagem, colapso plástico, corrosão e/ou fluência, ou então por eventuais sobrecargas.
- Desgaste excessivo por adesão, abrasão, erosão, fadiga superficial ou corrosão.
- Obsolescência, ou perda da funcionalidade competitiva.

A função primordial da engenharia estrutural é garantir a funcionalidade operacional e controlar as consequências de quaisquer falhas a um custo competitivo. A distorção e a quebra são evitáveis pelo dimensionamento e processo de operação corretos, mas o desgaste e a obsolescência não, e só podem ser retardados por manutenção apropriada. As falhas também podem ser didaticamente separadas por suas causas primárias, por exemplo (Castro, 2009):

- Mecânicas, ou primariamente causadas pelas tensões induzidas pelas cargas e/ou pelas eventuais sobrecargas que solicitam a estrutura durante a sua vida operacional.
- Materiais, ou primariamente causadas por defeitos originados na fabricação, na montagem ou na manutenção da matéria-prima, como soldas de penetração incompleta, por exemplo, e etc.

- Econômicas, que causam perda de competitividade por falta de capital de giro, juros excessivos, encarecimento ou falta de insumos etc.
- Humanas, devido a erros de especificação, projeto, fabricação, manutenção, comunicação, gerência etc.

A principal ferramenta do analista de falha estrutural é a análise de tensões, esta para identificar os mecanismos de dano indutores da falha. Os principais mecanismos de dano mecânico são: deflexão excessiva, escoamento, flambagem, fluência, desgaste, fratura, fadiga (Castro, 2009).

Quando um engenheiro enfrenta o problema de executar um projeto utilizando um material específico, torna-se importante estabelecer um limite superior para o estado de tensão que define a falha do material (Hibbeler, 2010). Materiais dúcteis são normalmente classificados por critério de escoamento. Já os materiais frágeis, geralmente, são classificados por critério de fratura, sem escoamento (Budynas, 2011). Apesar do comportamento de metais estruturais ser classificado, tipicamente, como dúctil ou frágil, pode acontecer, sob situações especiais, de um material normalmente considerado dúctil falhar de maneira frágil dependendo da temperatura, taxa de carregamento, ambiente químico, processo de fabricação ou moldagem (Hibbeler, 2010).

Quando usamos uma determinada teoria de falha, em primeiro lugar é necessário calcular as componentes da tensão normal e de cisalhamento em pontos do elemento estrutural onde as tensões são maiores. Para este cálculo, pode-se usar os fundamentos da resistência dos materiais ou utilizar fatores de concentração de tensão onde aplicável. Uma vez definido o estado de tensão, as tensões principais nesses pontos críticos serão determinadas, uma vez que a maioria das teorias de falha são baseadas no conhecimento destas tensões (Hibbeler, 2010).

Infelizmente não há uma teoria universal de falha para o caso de propriedades de materiais e estado de tensões. Ao contrário, várias hipóteses foram testadas por anos, levando à práticas aceitas hoje em dia.

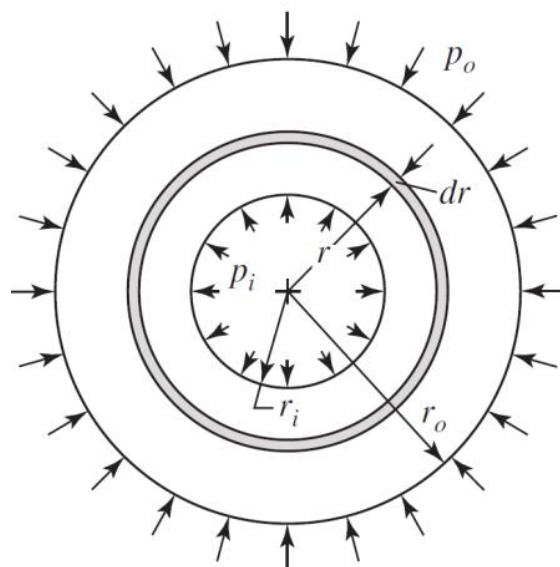
## 2.2 Tensões Mecânicas

### 2.2.1 Vasos de Pressão Cilíndricos

Vasos de pressão são reservatórios que contêm fluidos (líquidos ou gases) que em geral estão armazenados no seu interior. Eles devem ser projetados para resistir com segurança a pressões internas e externas. Usados comumente na indústria como caldeiras ou reservatórios, os vasos de pressão constituem um conjunto importante de equipamentos que abrangem os mais variados usos. Podem ser de parede fina e de parede espessa (Hibbeler, 2010).

Os vasos de pressão cilíndricos, cilindros hidráulicos, "canos" de armas de fogo e tubos que transportam fluidos a alta pressão desenvolvem tanto tensões radiais como tangenciais, cujos valores dependem do raio do elemento considerado (Budynas, 2011). Ao determinar a tensão radial  $\sigma_r$  e a tensão tangencial  $\sigma_\theta$ , usa-se a hipótese de que a elongação longitudinal é constante em torno da circunferência do cilindro. Ou seja, uma seção reta do cilindro permanece plana após tensionamento (Budynas, 2011).

A Figura 2.1 ilustra uma seção transversal de um vaso de pressão cilíndrico.



**Figura 2.1:** Seção transversal de vaso de pressão cilíndrico submetido a pressão interna e externa (Budynas, 2011).

Referindo-se à Figura 2.1, denomina-se o raio interno  $r_i$ , o raio externo  $r_o$ , a pressão interna  $p_i$ , a pressão externa  $p_o$ . A seguir estão demonstradas, respectivamente, as equações das tensões tangenciais e radiais ao longo do raio  $r$  do tubo.

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 - \left(\frac{r_i r_o}{r}\right)^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \quad (1)$$

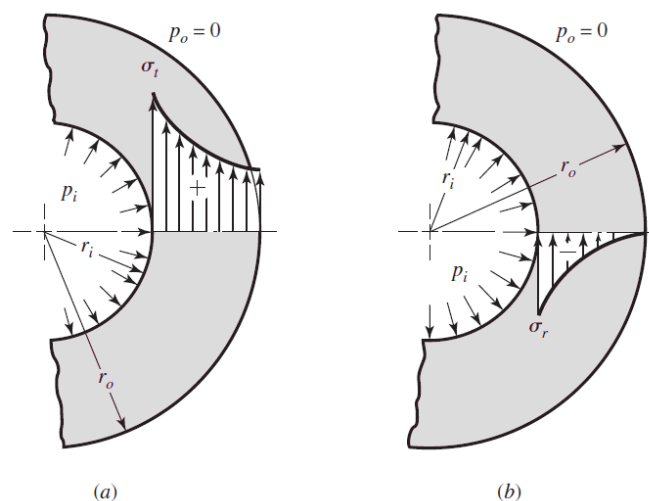
$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 + \left(\frac{r_i r_o}{r}\right)^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2)$$

O caso especial em que  $p_o = 0$  produz:

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

As equações 3 e 4 estão representadas graficamente na Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Comportamento das distribuições de tensões em um cilindro de parede grossa submetido à pressão interna: (a) Distribuição de Tensão Tangencial; (b) Distribuição de Tensão Radial (Budynas, 2011).

É importante ressaltar que as equações 1, 2, 3 e 4 se aplicam a vasos de pressão de parede espessa e são válidas apenas nas seções a uma distância significativa das extremidades e longe de quaisquer áreas de concentração de tensão (Budynas, 2011).

Já os vasos de pressão de parede fina são definidos como aqueles em que a tensão tangencial pode, dentro de certos limites, ser associada ao valor da espessura (Vicente, 2009). Em geral, o vaso de parede fina é aquele com uma relação raio interno sobre espessura da parede de 10 ou mais ( $r_i/w \geq 10$ ) (Castro, 2009).

Se a espessura da parede do vaso de pressão cilíndrico for maior que 10% do valor do raio interno, o vaso é normalmente classificado como de parede espessa. Nestes casos, a variação da tensão tangencial não é mais proporcional ao raio.

Quando sob pressão, o componente fica submetido a cargas em todas as direções. Se a parede do vaso é fina, a distribuição de tensão na sua espessura não varia significativamente (Hibbeler, 2004). Porém, não se pode afirmar o mesmo se a parede do vaso é considerada espessa.

Por serem considerados equipamentos de grande periculosidade, o projeto e a construção de vasos de pressão envolvem uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas e materiais adequados para cada tipo de aplicação, pois suas falhas podem acarretar consequências catastróficas até mesmo com perda de vidas (Hibbeler, 2010).

### 2.2.2 Comportamento Tensão-Deformação

O grau no qual uma estrutura se alonga ou se deforma depende da magnitude da tensão que lhe é imposta. Para a maioria dos metais que são submetidos a uma tensão de tração em níveis relativamente baixos, a tensão  $\sigma$  e a deformação  $\varepsilon$  são proporcionais entre si, de acordo com a equação:

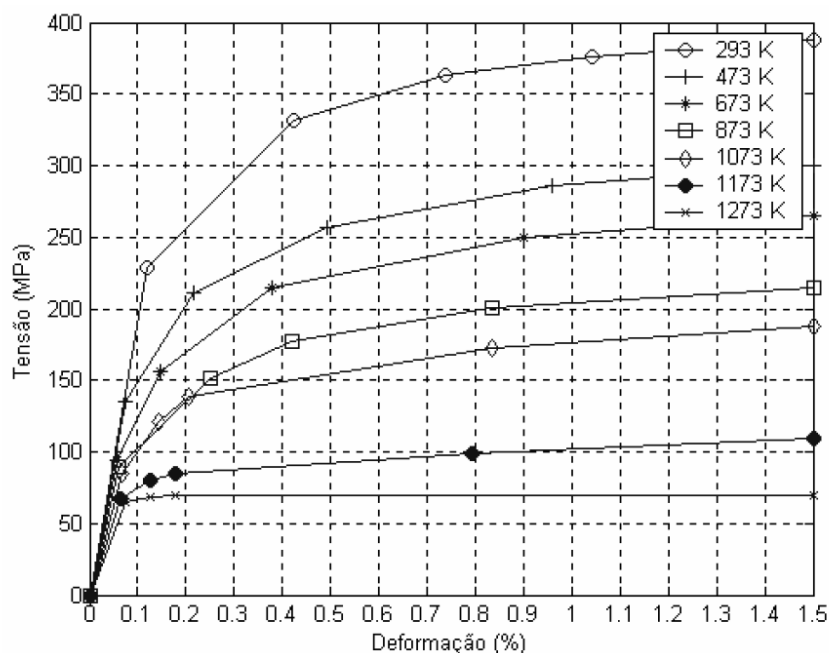
$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (5)$$

A equação 5 é conhecida como a lei de Hooke, e a constante de proporcionalidade ( $E$ ) é o módulo de elasticidade, ou *módulo de Young*. Para a maioria dos metais típicos, a magnitude desse módulo varia entre 45 GPa ( $6,5 \times 10^6$  psi) para o magnésio e 407 GPa ( $59 \times 10^6$  psi) para o tungstênio (Castro, 2009).

O processo de deformação no qual a tensão e a deformação são proporcionais é chamado de deformação elástica e corresponde a parte linear do gráfico tensão (eixo da ordenada) X deformação (eixo da abscissa). A inclinação desse segmento linear corresponde ao módulo de elasticidade  $E$ . Esse módulo pode ser considerado como sendo a rigidez ou a resistência do material à deformação elástica. Quanto maior for o módulo, mais rígido será o material, ou menor será a deformação elástica que irá resultar da aplicação de uma dada tensão (Callister, 2008).

Na medida em que o material é deformado além desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (a lei de Hook, equação 5, deixa de ser válida) e ocorre uma deformação permanente, não-recuperável, ou deformação plástica (Castro, 2009).

A Figura 2.3 mostra o comportamento tensão-deformação em função da temperatura para o aço AISI 316L.



**Figura 2.3:** Curva tensão-deformação em função da temperatura para o aço AISI 316L (Depradeux, 2004).

Como se pode observar através da Figura 2.3, a transição do comportamento elástico para o comportamento plástico é gradual para a maioria dos metais; há uma curvatura no ponto onde há o surgimento da deformação plástica, a qual aumenta mais rapidamente com o aumento da tensão.

A maioria das estruturas é projetada para assegurar que ocorrerá apenas deformação elástica quando uma tensão é aplicada. Uma estrutura ou componente que se deformou plasticamente, ou que sofreu uma mudança permanente na forma, pode não ser capaz de funcionar como programado (Hibbeler, 2004). Torna-se então desejável conhecer o nível de tensão no qual a deformação plástica tem seu início, ou onde ocorre o fenômeno do escoamento com a finalidade de assegurar a segurança do componente.

A magnitude do limite de escoamento para um metal é uma medida de sua resistência à deformação plástica. Os limites de escoamento podem variar desde 35 MPa (5.000 psi), para um alumínio de baixa resistência, até acima de 1.400 MPa (200.000 psi), para aços de alta resistência (Castro, 2009).

### **2.2.3 Mecânica da Fratura**

A idéia de que existem trincas em peças mesmo antes do início do serviço e de que elas podem crescer durante a operação levou à criação da expressão "projeto tolerante a dano" (Budynas, 2011). O foco dessa filosofia está no crescimento da trinca até ela se tornar crítica e o componente ser retirado de atividade. A ferramenta de análise é a mecânica da fratura linear elástica. A inspeção e a manutenção são essenciais na decisão de retirar peças antes que as trincas atinjam tamanhos comprometedores. Sempre que a segurança humana estiver envolvida, inspeções periódicas de trincas são obrigatórias por códigos de ética e decisões governamentais (Budynas, 2011).

Mecânica da fratura, portanto, é a ciência que estuda o comportamento de corpos com trincas, sendo que essas podem ou não se propagar em forma instável (Boniatto e Iturrioz, 2003). Uma trinca estática pode ser estável e não se propagar, mas certo nível de carga pode tornar a trinca instável e ela se

propagará até a fratura (Budynas, 2011). A Mecânica da Fratura tem como principais objetivos:

- Medir o grau de segurança de uma estrutura em relação à falha por fratura frágil.
- Determinar quais são as condições necessárias para a iniciação, propagação e não-propagação da trinca.
- Quantificar a vida residual de um componente sujeito a carregamento oscilante.

Essa teoria definiu o fator de intensidade de tensões ( $K$ ) como sendo um dos parâmetros que permitem a avaliação de tensões nas proximidades da trinca. Esse fator tem como limite um parâmetro do material chamado de tenacidade à fratura ou fator de intensidade de tensão crítico ( $K_{IC}$ ) (Budynas, 2011). O fator de intensidade de tensões é importante, pois avalia quando uma trinca tem condições de propagação em uma estrutura de forma instável.

O fator de intensidade de tensões ( $K$ ) é função das características geométricas do componente estudado, da forma e da magnitude das cargas, da orientação e do tamanho da trinca. Já a tenacidade à fratura é uma propriedade do material (Boniatti e Iturrioz, 2003).

Um dos primeiros problemas enfrentados pelo projetista na confecção de um projeto é decidir se existem, ou não, condições para uma fratura frágil. Operação à baixa temperatura, isto é, temperatura abaixo da ambiente é um indicador-chave de que a fratura frágil é um modo possível de falha (Budynas, 2011). Não têm sido publicadas tabelas de temperaturas de transição para vários materiais, possivelmente em razão de amplas variações em valores, ainda que para um único material. Assim, em várias situações, ensaios de laboratório podem dar a única pista para a possibilidade de uma fratura frágil. Um outro indicador-chave da possibilidade de fratura é a razão entre a resistência ao escoamento e a resistência máxima. O alto valor desta razão indica haver apenas pequena habilidade de absorção de energia na região plástica, e portanto, a probabilidade de uma fratura frágil (Budynas, 2011).

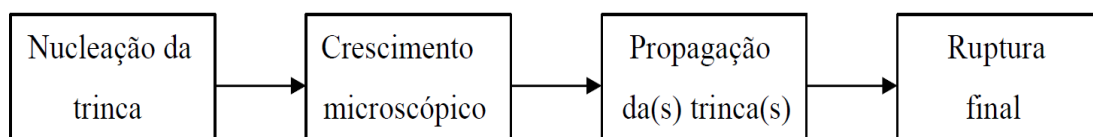


Na moderna ciência dos materiais, a mecânica da fratura é uma ferramenta fundamental na melhoria do desempenho mecânico de materiais e componentes e é amplamente utilizada a fim de compreensão das causas de falhas e também para verificar as previsões teóricas de falha com falhas reais.

#### 2.2.4 Fadiga

Fadiga é o tipo de falha mecânica causada primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis, cuja principal característica é gerar e/ou propagar paulatinamente uma trinca, até a eventual fratura da peça. As falhas estruturais são chamadas de "mecânica" quando causadas primariamente pelas cargas de serviço. As falhas por fadiga são localizadas, progressivas e cumulativas. Logo, a modelagem do trincamento por fadiga pode (e deve) ser tratada como um problema local, que pouco depende das tensões na peça como um todo (Castro, 2009).

A ruptura por fadiga é provocada por nucleação e propagação mais ou menos lenta da(s) trinca(s) que aparece(m) numa peça submetida a tensões oscilantes (Boniatti e Iturrioz, 2003). O processo de fadiga pode ser dividido em quatro fases como é apresentado no diagrama esquemático da Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Diagrama esquemático indicando uma falha por fadiga (Boniatti e Iturrioz, 2003).

A iniciação da trinca depende dos detalhes da geometria, do material, do ponto crítico da peça e da história de tensões e deformações que nela atua. Já a propagação da trinca, que é paulatina e estável, depende da história dos fatores de intensidade de tensões que a solicita em serviço, mas a fratura final da peça pode ser brusca, quase instantânea (Castro, 2009). A grande maioria das falhas estruturais que ocorrem na prática envolve problemas de fadiga. Não há dados brasileiros, mas o custo das falhas estruturais mecânicas já foi

estimado em mais de 4% do PIB na Europa e nos Estados Unidos (Castro, 2009).

As fraturas por fadiga podem ser divididas em duas regiões (Boniatti e Iturrioz, 2003):

- Região de fratura por fadiga propriamente dita, caracterizada por uma espécie lisa com aspecto sedoso e brilhante, causada pela ação do contato das superfícies da trinca durante a sua propagação.
- Região com superfície cristalina ou fibrosa que corresponde à fratura final instantânea (falha estática).

A origem da fratura por fadiga é uma pequena fissura que, aos poucos se propaga produzindo uma fratura de característica plástica ou frágil, devido à concentração de tensões, a defeitos no material etc. Normalmente, a fratura se inicia na superfície devido à irregularidade e também porque nela os cristais têm maior liberdade de deformação, além de estarem submetidos à corrosão atmosférica (Boniatti e Iturrioz, 2003). As fissuras de fadiga têm uma direção ortogonal às linhas de força do carregamento aplicado.

A fadiga pode ser estudada a partir de algumas teorias:

- Teoria dos Esforços Secundários: admitiu-se que todos os corpos possuem grande número de defeitos superficiais e formulou-se a idéia de que esses defeitos criam concentração de tensões. Como consequência dessa heterogeneidade física, química e estrutural, os metais encontram-se submetidos a esforços secundários não desprezíveis, também denominados de pontos de tensões. A combinação dos esforços externos com os secundários sobrepõe localmente ao esforço de coesão das partículas dando origem à fissuração (Cimini, 2001).
- Teoria das Bandas de Escorregamento: na escala microscópica, a característica mais importante do processo de fadiga é a nucleação de uma ou de mais trincas, as quais, devido à solitação, levam ao escorregamento entre bandas ou no contorno dos grãos do material. Os

metais apresentam uma estrutura cristalina (geralmente policristalina), ou seja, seus átomos são arranjos dentro de uma determinada ordem. Cada grão apresenta suas propriedades mecânicas próprias e de direcionamento. Alguns grãos são orientados de tal forma que planos de fácil escorregamento ou deslizamento estão na direção da máxima tensão de cisalhamento aplicada. Esse escorregamento ocorre tanto em carregamento estático como em dinâmico. Porém, o fenômeno é acentuado neste último caso, de tal forma que o resultado é o aparecimento de planos de escorregamento muito fino, da ordem de décimos de  $\mu m$  (Cimini, 2001).

Portanto, o escorregamento é primariamente controlado pelas tensões de cisalhamento e, quanto maior for a amplitude ou maior o número de ciclos, maior será o escorregamento (Cimini, 2001). Isso significa que a fase inicial de desenvolvimento das trincas se dá nas bandas de escorregamento, e estas trincas tendem a se desenvolver no plano da máxima tensão de cisalhamento (em materiais dúcteis,  $45^\circ$ ). Esse crescimento da trinca é geralmente pequeno, da ordem de grandeza de alguns grãos. No decorrer dos ciclos de tensão, a trinca de fadiga tende a coalescer e a crescer ao longo dos planos de máxima tensão de tração (Cimini, 2001).

Nenhuma das teorias existentes é suficiente por si só para explicar o fenômeno, porém, todas se completam mutuamente. Para que a fissura apareça em um ponto, é necessário que os esforços locais ultrapassem a resistência de coesão do material. A formação de bandas de escorregamento é criada por essa situação, tendendo a uma acomodação, ou a uma progressão continuada, dependendo do nível de tensões existentes. Neste caso, a fissura se desenvolve até a fratura. Portanto, a fratura resulta da destruição da coesão intercristalina e da impossibilidade de o metal se acomodar suficientemente, de maneira a anular os pontos de concentração de tensões (Boniatti e Iturrioz, 2003).

O limite de fadiga é definido como sendo o valor máximo da tensão abaixo da qual, presumivelmente, o material pode ser solicitado a um número infinito de ciclos sem fratura. Enquanto muitos materiais, incluindo o aço, têm

um limite de fadiga bem definido entre  $10^6$  e  $10^7$  ciclos, outros, como o alumínio, não possuem tal característica (Boniatti e Iturrioz, 2003).

A modelagem das falhas por fadiga necessita ser precisa e confiável, já que a geração e a propagação paulatina e irreversível de uma trinca em geral não provocam mudanças evidentes no comportamento global da estrutura. Isto porque o dano gerado pelo trincamento fica quase sempre restrito à região crítica da peça, e não tende a gerar avisos prévios de falha iminente (Castro, 2009). Assim, as fraturas das peças fadigadas podem ocorrer de forma brusca e inesperada, e por isso devem ser evitadas a qualquer custo nas estruturas potencialmente perigosas. Portanto, o controle das falhas por fadiga nessas estruturas deve ser feito através de um plano de garantia da segurança que inclua um programa periódico de inspeções e de avaliações de integridade estrutural baseado na modelagem precisa do processo de trincamento.

A modelagem das falhas globais requer cálculo do campo de tensões em pelo menos uma seção resistente da peça. Nas geometrias complexas isto só é factível através de técnicas numéricas, como elementos finitos, por exemplo. Já as falhas locais são quase sempre modeláveis pela análise das tensões que solicitam o “ponto crítico” da peça, pois é lá que todo o dano se concentra. Em geral, não é necessário (nem recomendável) calcular o campo de tensões na peça toda, pois basta localizar o ponto crítico e obter o histórico das tensões (ou do fator de intensidade do campo de tensões) lá atuante para poder modelar todo o dano associado às falhas locais (Castro, 2009). Porém, nunca é demais enfatizar que todos os tipos de falha devem ser evitados na prática.

#### **2.2.4.1 Fatores que Influenciam no Desenvolvimento à Fadiga**

Alguns fatores podem influenciar no desenvolvimento à fadiga, entre eles estão:

- Fator de Acabamento Superficial: afeta a resistência à fadiga de três modos: (a) introduzindo concentração de tensões resultante da rugosidade; (b) por alterar as propriedades físicas da camada superficial;

e (c) por introduzir, eventualmente, tensões residuais, que, no caso de serem de tração, diminuem a resistência à fadiga (Branco, 1986).

- Fator de Concentração de Tensões: descontinuidades na geometria da peça, como entalhes, furos, roscas etc., provocam um aumento local de tensão. O aumento teórico do valor da tensão pode, em alguns casos, ser determinado pela Teoria da Elasticidade, mas geralmente é determinado recorrendo a Fotoelasticidade ou a métodos computacionais, como o Método de Elementos Finitos. Na prática, recorre-se a fatores de concentração de tensão,  $K_T$ , que multiplicam as tensões nominais obtidas a partir das expressões elementares da resistência dos materiais, relativas à tração, flexão e torção. Esses fatores  $K_T$  estão associados à geometria do entalhe e ao modo de aplicação da carga, e são baseados na hipótese de que o material é perfeitamente homogêneo, isotrópico e elástico (Branco, 1986).
- Fator de Tamanho: em testes sobre corpos de prova de diversos tamanhos, observou-se que os corpos de prova grandes tendem a romper com menor número de ciclos (Branco, 1986). Várias teses foram formuladas para tentar explicar o motivo desse estranho comportamento diferenciado, porém, nenhuma foi aceita como definitiva pela comunidade científica até o momento.
- Efeito da Temperatura: a temperatura e o tempo em que o ambiente permanece nessa temperatura são fatores importantes para o surgimento de trincas. Em temperaturas elevadas, normalmente, as propriedades estáticas são mais afetadas que as de fadiga, sendo que elevados gradientes de temperatura podem causar trincas térmicas no material (Oh, 2010). As tensões provocadas por expansão ou contração térmica em determinadas situações precisam ser consideradas (Branco, 1986).
- Influência do Material e Tratamento Térmico: é evidente que a velocidade de propagação da trinca depende do material e do tratamento térmico. Há materiais que são mais resistentes à propagação de trincas que outros. Vale a pena ressaltar que a influência da

microestrutura é extremamente importante para o desenvolvimento ou não de danos no componente.

#### 2.2.4.2 Fadiga por Fluência

Em muitos casos, em equipamentos como caldeiras, turbinas, fornos etc., que trabalham sujeitos a altas temperaturas, danos causados por fluência, podem superar aos danos gerados por fadiga (Castro, 2009). Logo, para melhor compreensão do fenômeno de propagação de trincas ocorrido na tubulação de uma caldeira de plataforma, por exemplo, é necessário entender o fenômeno de fluência.

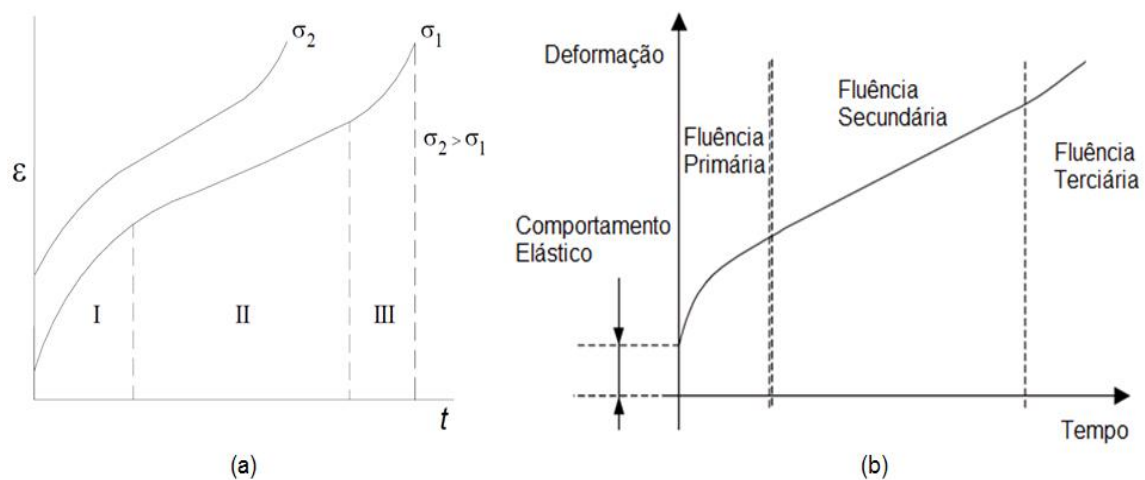
Fluência é o mecanismo de falha mecânica caracterizado por um acúmulo paulatino de deformações anelásticas que independe de incrementos de carga, o qual pode afetar muito ou dominar a vida útil das estruturas que trabalham em temperaturas altas ( $\theta$ ) em relação a temperatura de fusão ( $\theta_f$ ) do material (Castro, 2009). Devido à fluência, as deformações ( $\varepsilon$ ), em geral, dependem não só das tensões ( $\sigma$ ), mas também da temperatura ( $\theta$ ) e do tempo ( $t$ ), ou seja:

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma, \theta, t) \quad (6)$$

Na prática da análise estrutural, são tipicamente consideradas como "altas" as temperaturas onde  $\theta > 0,3 \theta_f$  nas ligas metálicas (Castro, 2009). Por isso, é comum desprezar a fluência na análise das estruturas metálicas que trabalham em temperatura ambiente supondo que suas deformações elásticas e/ou plásticas podem ser modeladas como se dependessem apenas das tensões, isto é,  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$ . Mas, os componentes estruturais poliméricos devem, em geral, ser dimensionados considerando a fluência, mesmo quando eles trabalham somente a temperatura ambiente. Em outras palavras, sempre que a temperatura de trabalho for alta não se pode usar a hipótese simplificada  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  nos cálculos estruturais, pois ela é insegura nestes casos (Castro, 2009). Além disso, sob tensões muito altas, próximas ou maiores que a resistência do material, a fluência pode ser importante até mesmo em temperaturas

usualmente consideradas "baixas", se o tempo de aplicação da carga for muito longo em relação ao tempo de medição de resistência ao escoamento.

As curvas de fluência  $\varepsilon \times t$  típicas (também chamadas de curvas de Andrade), que descrevem como a deformação varia ao longo do tempo sob várias tensões  $\sigma_i$  constantes numa mesma temperatura  $\theta$  (fixa) estão ilustradas na Figura 2.5 (a). A Figura 2.5 (b) mostra a curva de fluência para o aço austenítico AISI 316L.



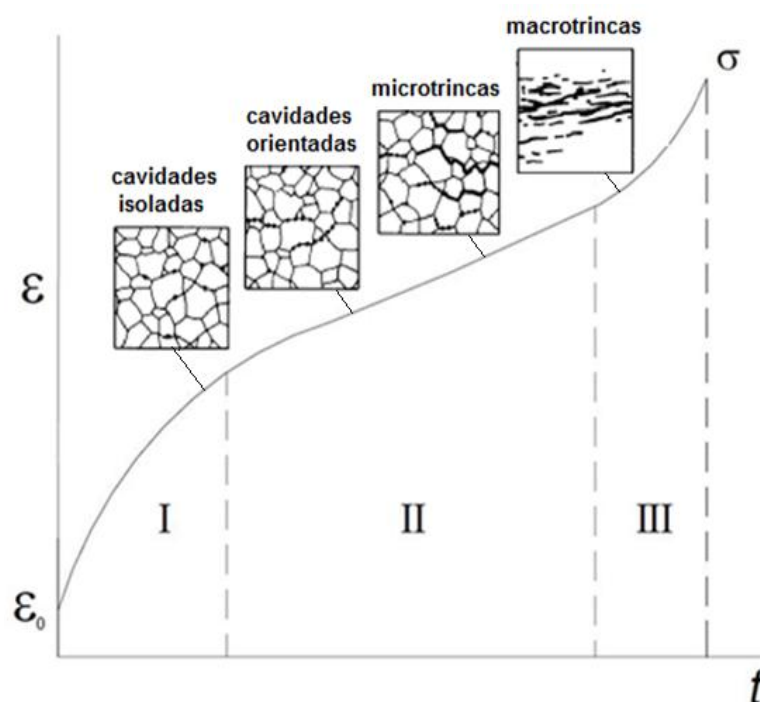
**Figura 2.5:** (a) Curva típica para deformação por fluência (Boniatti e Iturrioz, 2003). (b) Diferentes fases de fluência para aço AISI 316L (Depradeux, 2004).

As curvas das figuras anteriores mostram a fluência primária (fase I) com uma taxa  $\dot{\varepsilon}_{pri}$  decrescente, a fluência secundária (fase II), que normalmente domina a vida à fluência nas tensões usadas na maioria das aplicações estruturais, e cuja taxa  $\dot{\varepsilon}_s$  é quase constante, e finalmente, a fluência terciária (fase III) com taxa  $\dot{\varepsilon}_{ter}$  crescente, a qual termina na eventual fratura da peça. É importante ressaltar que as curvas de Andrade se deslocam para cima e para a esquerda à medida que a tensão aumenta, isto é, as taxas de fluência crescem e o tempo de ruptura diminui quando  $\sigma$  cresce. As curvas  $\varepsilon \times t$  obtidas em diversas temperaturas  $\theta_i$  sob uma mesma tensão  $\sigma$  também têm uma forma típica similar (Castro, 2009).

Porém, existe a região anterior ao começo da região I onde se tem um comportamento elástico (Depradeux, 2004).

Em alguns casos, durante o crescimento de uma trinca macroscópica em altas temperaturas, todos os tipos de fluência poderão ocorrer simultaneamente. No entanto, para os estudos de engenharia, as regiões I e II são mais relevantes.

A Figura 2.6 mostra a variação das taxas de fluência enfatizando o que ocorre no material quando o mesmo é submetido a uma fratura por fadiga.



**Figura 2.6:** Variação típica das taxas de fluência nas curvas de Andrade (SENAI-RJ, 2012).

A zona em deformação plástica na extremidade da trinca aproxima-se das dimensões do grão de tal modo que o ponto de transição do regime I para o II corresponde a uma dimensão da zona plástica, em média, inferior a cinco vezes o tamanho do grão do material. No regime II, a microestrutura tem uma influência pouco acentuada, e o mecanismo de ruptura é aparentemente contínuo e por estrição. Finalmente, no regime III, o modo característico de ruptura é misto (fadiga + ruptura plástica) havendo clivagem ou fratura fribosa (coalescência de microcavidades) (Boniatti e Iturrioz, 2003).



O efeito da temperatura  $\theta$ , que deve ser bem controlado nos testes de fluência, é, em geral, modelável segundo Arrhenius (Castro, 2009).

Deve-se enfatizar que os efeitos do crescimento da trinca por fadiga na maioria das variáveis de teste são específicos para uma particular combinação do material, da temperatura de teste e das cargas mecânicas (Castro, 2009).

#### **2.2.4.3 Quantificação da Resistência à Fluência das Ligas Estruturais**

Vários efeitos da fluência podem ser medidos de diversas formas, por exemplo (Castro, 2009):

- Pela taxa de deformação sob fluência secundária na fase II da curva  $\epsilon \times t$ , sendo fixas a tensão  $\sigma$  e a temperatura  $\theta$  do teste.
- Pela resistência à taxa de fluência secundária sob uma temperatura  $\theta$  fixa.
- Pela resistência a ruptura sob fluência num dado tempo  $t$  sob  $\theta$  fixa, ou pela tensão de engenharia que rompe o corpo de prova após  $t$  (h) de teste sob  $\theta$  fixa.
- Pela temperatura na qual o corpo de prova de fluência rompe após  $t$  (h) de teste sob a tensão de engenharia fixa, ou,
- Pelo tempo após o qual o corpo de prova de fluência rompe sob  $\sigma$  e  $\theta$  fixas.

Como regra geral, a resistência à fluência tende a crescer com o aumento da temperatura de fusão e da resistência à oxidação no meio e na temperatura de trabalho (Castro, 2009). Para ilustrar a ordem de grandeza do problema da fluência nas ligas metálicas estruturais, apresenta-se a seguir uma amostra significativa de diversas propriedades medidas em altas temperaturas, compiladas de muitas fontes e devidamente traduzidas para o Sistema Internacional: as tabelas 2.1 e 2.2 listam usos e limites típicos para os aços estruturais.

**Tabela 2.1:** Recomendações típicas para escolha de aços usados em temperaturas altas: a receita básica é aumentar o teor de Cr e de Mo à medida que a temperatura  $\theta$  aumenta até cerca de 650°C e usar aços inoxidáveis acima desta temperatura (Castro, 2009).

Práticas usuais de seleção de aços estruturais para trabalhos em alta temperatura								
Percentual típico dos tipos de aços usados em grandes caldeiras	$\Theta_{\max}$ (°C) para serviço estrutural segundo o Metal's Handbook		$\Theta_{\max}$ (°C) de tubos para vapor superaquecido segundo a ASME			$\Theta_{\max}$ para uso não estrutural de aços inox AISI no ar (°C) - $\Theta$ para serviço		
	Material	$\Theta_{\max}$	Material	Oxidação ou Grafitação	Fluência	Austenítico	Pulsado	Contínuo
aço C 36%	aço C	450	aço C	400-500	425	201	815	845
0,5 Mo 10%	0,5 Mo	510	0,5 Cr - 0,5 Mo	550	510	202	815	845
1,25 Cr – 1 Mo 33%	2,25 Cr - 1 Mo	540	1,25 Cr - 0,5 Mo	565	560	301	840	900
2,25 Cr – 1 Mo 10%	inox 304	595	2,25 Cr - 1 Mo	580	595	302	870	925
9 Cr – 1 Mo 11%			9 Cr – 1 Mo	650	650	304	870	925
			inox 304H	760	815	308	925	980
						309	980	1095
						310	1035	1150
						316	870	925
						317	870	925
						321	870	925
						330	1035	1150
						347	870	925
						Ferríticos		
						405	815	705
						406	815	1035
						430	870	815
						442	1035	980
						446	1175	1095
						Matensíticos		
						410	815	705
						416	760	675
						420	735	620
						440	815	760

**Tabela 2.2:** Limites de temperatura recomendadas pela norma API 530, referente ao cálculo da espessura de tubos de aquecimento em refinarias de petróleo (Castro, 2009).

Aço	Tipo / Grau	$\theta_{\text{projeto}} (^{\circ}\text{C})$	$\theta_{\text{crítica}} (^{\circ}\text{C})$
Carbono	B	540	720
C - 1/2 Mo	T1 ou P1	595	720
1 1/4 Cr - 1/2 Mo	T11 ou P11	595	775
2 1/4 Cr - 1 Mo	T22 ou P22	650	805
3 Cr - 1 Mo	T21 ou P21	650	815
5 Cr - 1/2 Mo	T5 ou P5	650	820
5 Cr - 1/2 Mo - Si	T5b ou P5b	705	845
7 Cr - 1/2 Mo	T7 ou P7	705	825
9 Cr - 1 Mo	T9 ou P9	705	825
9 Cr - 1 Mo - V	T91 ou P91	650	830
18 Cr - 8 Ni	304 ou 304H	815	-
16 Cr - 12 Ni -2 Mo	316 ou 316H	815	-
16 Cr - 12 Ni -2 Mo	316L	815	-
18 Cr - 10 Ni -Ti	321 ou 321H	815	-
18 Cr - 10 Ni -Nb	347 ou 347H	815	-
Liga Ni-Fe-Cr	800H / 800HT	985	-
Liga 25Cr - 20 Ni	HK40	1010	-

A temperatura limite recomendada pela API 530 para o projeto estrutural dos tubos de aquecedores ou de fornalhas listada na tabela 2.1 está associada à obtenção de dados de ruptura por fluência confiáveis. Temperaturas até 30°C abaixo da temperatura crítica do material,  $\theta_{\text{crítica}}$ , são permitidas para operações de curta duração necessárias para a manutenção do aquecedor (Castro, 2009). Esta norma não cita explicitamente limites de carga ou de tensão nessas operações curtas em temperaturas bem mais altas que a permitida para o serviço normal. Todavia, como as taxas de fluência crescem exponencialmente com a temperatura, se deve tomar extremo cuidado para evitar danos significativos nestas operações, limitando, conservativamente, a valores muito baixos as tensões a elas associadas. Operações acima de  $\theta_{\text{crítica}}$  podem resultar em mudanças microestruturais significativas nas ligas ferríticas listadas nesta tabela (Castro, 2009). Segundo a norma API 530, os aços inox austeníticos não têm problemas com temperaturas críticas. Mas, ela menciona explicitamente que outros fatores como a oxidação, a grafitação, a carbonetação e o ataque por hidrogênio podem limitar as temperaturas

máximas permitidas, e que estes fatores devem ser considerados quando os tubos do aquecedor ou da fornalha forem projetados (Castro, 2009).

### 2.3 Concentrador de Tensão

Para entender os fatores de concentração de tensão dos entalhes típicos que quase sempre afetam o dimensionamento mecânico à fadiga, é preciso (Budynas, 2011):

- Caracterizar o fluxo dos esforços em estruturas através das linhas de força.
- Estudar os fundamentos da teoria da elasticidade que são indispensáveis à solução analítica dos problemas lineares elásticos de concentração de tensões.
- Desenvolver técnicas para estimar valores do concentrador de tensão usando soluções analíticas aproximadas.
- Apresentar um catálogo de  $K_{TS}$  de geometrias típicas, e mencionar as técnicas experimentais e numéricas necessárias para expandi-lo.

Segundo o princípio de Saint-Venant, as fórmulas clássicas da análise tradicional de tensões (ou da resistência dos materiais) só são válidas nas regiões da peça que fiquem longe das transições bruscas de geometria e dos pontos de aplicação das cargas concentradas. Por exemplo, a equação  $\sigma = (M \cdot y)/I$ , usada para calcular as tensões lineares elásticas induzidas pelo fletor  $M$  no ponto que dista  $y$  do eixo neutro numa viga de momento de inércia  $I$ , só é válida nos trechos onde a seção reta permaneça uniforme (ou varie suavemente). Logo, as fórmulas clássicas só servem para se calcular as chamadas tensões nominais  $\sigma_n$ , as quais desprezam os efeitos localizados nas transições geométricas bruscas (Castro, 2009).

Entretanto, a grande maioria das peças reais precisam ter entalhes, ou variações localizadas em sua geometria como furos, rasgos, ombros ou outros detalhes similares, os quais são em geral indispensáveis para a fixação e/ou

para a operação da peça (Budynas, 2011). Um parafuso, por exemplo, tem uma cabeça em uma extremidade e roscas na outra, as quais explicam mudanças abruptas na seção transversal. Estes entalhes são necessários, mas concentram (isto é, aumentam) localmente as tensões nominais que atuam na peça se ela fosse isenta deles (Boniatto e Iturrioz, 2003). Qualquer descontinuidade em uma peça de máquina altera a distribuição de tensão na cercania da descontinuidade, de modo que as equações elementares de tensão não conseguem mais descrever o estado de tensão na peça nessas localidades (Budynas, 2011). Tais descontinuidades são denominadas concentradores de tensão, e as regiões nas quais elas ocorrem são chamadas de áreas de concentração de tensão.

O fator de concentração de tensões  $K_T$  é definido pela razão entre a máxima tensão que atua numa dada seção (entalhada)  $\sigma_{\theta_{max}}$  e a tensão nominal que lá atuaria se o entalhe não perturbasse o campo de tensões no seu entorno. Logo,

$$K_T = \frac{\sigma_{\theta_{max}}}{\sigma_n} \quad (7)$$

O subscrito  $T$  em  $K_T$  significa que esse fator de concentração de tensão depende, para seu valor, apenas da geometria da peça, isto é, o material especificamente usado não tem efeito algum sobre o valor de  $K_T$ . É por esse motivo que ele é chamado de fator de concentração teórico (Budynas, 2011)..

A análise de formas geométricas para determinar fatores de concentração de tensão é um problema difícil de modo que não muitas soluções podem ser encontradas. A maioria dos fatores de concentração de tensão é determinada por meio de técnicas experimentais. Embora o Método dos Elementos Finitos tenha sido usado, o fato de os elementos serem, na realidade, finitos, impedem a descoberta da tensão máxima verdadeira. As abordagens experimentais usadas geralmente incluem a fotoelasticidade, os métodos de malha, os métodos de película frágil e os métodos de medida elétrica de deformação (Budynas, 2011). Os métodos de medida de deformação e os métodos de malha sofrem do mesmo inconveniente que o Método dos Elementos Finitos (Budynas, 2011).

Os concentradores de tensão são responsáveis por muitas falhas de elementos estruturais ou mecânicos sujeitos a carregamentos de fadiga (Choi et al., 2012). Nesses casos, uma concentração de tensão provocará trincas no material se a tensão ultrapassar o limite de tolerância do material, seja ele dúctil ou frágil. O material localizado na ponta da trinca permanece em estado frágil, e, portanto, a trinca continua a crescer, levando a fratura progressiva, se não houver reparo adequado a tempo. Conseqüentemente, engenheiros envolvidos nos projetos desses elementos devem sempre procurar modos de limitar o dano que pode ser causado por fadiga (Hibbeler, 2010).

Na modelagem dos problemas da fadiga (e também nos de fratura de peças frágeis), o efeito dos entalhes é de primordial importância, e o uso dos  $K_{TS}$  é absolutamente indispensável nas rotinas de dimensionamento mecânico.

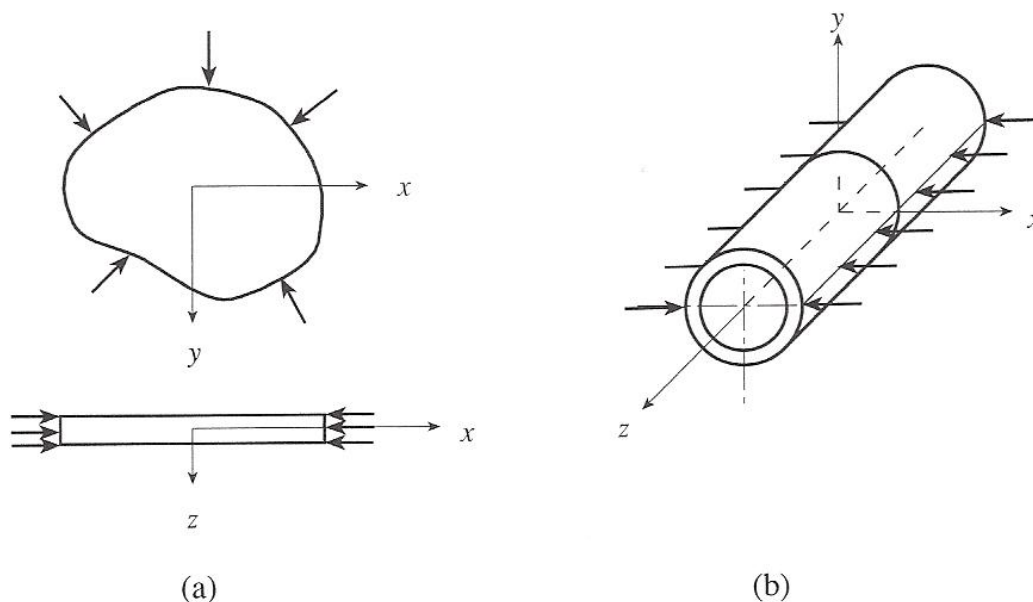
### 2.3.1 Concentração de Tensão em Problema 2D

Considerando o elemento com forças aplicadas em sua fronteira no plano 'x, y' (Figura 2.7a), pode-se dizer que para este caso os componentes de tensão  $\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  podem ser assumidos como sendo iguais a zero. Este estado de tensão é denominado de estado plano de tensão e os componentes  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  são funções de x e y somente (Pilkey, 1997).

Se a dimensão na direção da 'z' de um corpo cilíndrico longo é muito grande em relação às suas dimensões no plano 'x, y' e as forças aplicadas são perpendiculares à direção longitudinal (direção z) (Figura 2.7b), pode-se assumir que no meio da seção as deformações  $\epsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yx}$  na direção 'z' são iguais a zero. Este estado é denominado de estado plano de deformação. É importante enfatizar que estes problemas bidimensionais são referidos como problemas planos (Pilkey, 1997).

Para tais problemas, se as forças no corpo são constantes, a distribuição de tensões é uma função do formato do corpo e do carregamento a ele aplicado e não do material. Isto implica que os fatores de concentração de

tensão para os problemas no plano são funções da geometria e carregamento e não do tipo de material (Pilkey, 1997). Portanto, na prática, os fatores de concentração de tensão podem ser encontrados utilizando técnicas com problemas no plano.



**Figura 2.7:** (a) Plano de tensão. (b) Plano de deformação (Pilkey, 1997).

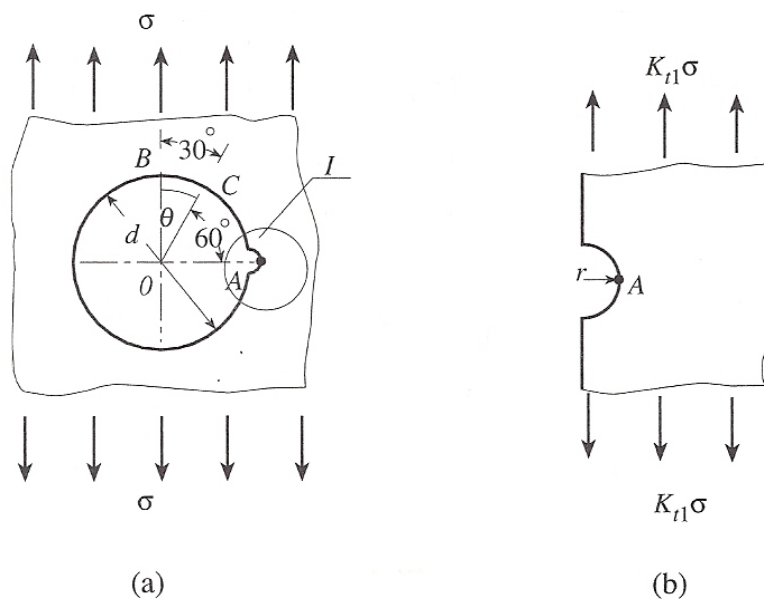
### 2.3.2 Concentração de Tensão Local e Não Local

Se as dimensões de um concentrador de tensão são muito menores que as do membro estrutural, a sua influência é normalmente limitada a uma área localizada. Isto é, a distribuição de tensões global do membro, exceto para a área localizada, é a mesma que para o membro sem o concentrador de tensão. Este tipo de problema é conhecido como problema localizado de concentração de tensão. A forma mais simples de resolvê-lo é tratar a região isoladamente do restante do componente e, em seguida, determinar o  $K_T$  usando as equações e curvas de um caso simples com forma e carga semelhante ao componente em questão (Pilkey, 1997).

Por outro lado, se um amplo campo de tensão é afetado, o problema é chamado de concentração de tensão não-local e sua análise pode ser bastante complicada. Nestes casos, a análise de tensões em todo o componente torna-se essencial.

### 2.3.3 Concentração de Tensão Múltipla

Duas ou mais concentrações de tensão que ocorrem no mesmo local em um membro estrutural estão em um estado de concentração de tensão múltipla (Pilkey, 1997). Vários problemas de concentração de tensão ocorrem com frequência em projetos de engenharia. Um exemplo seria um elemento plano uniaxialmente carregado com um orifício circular, completada por um entalhe na extremidade do furo central (Figura 2.8).



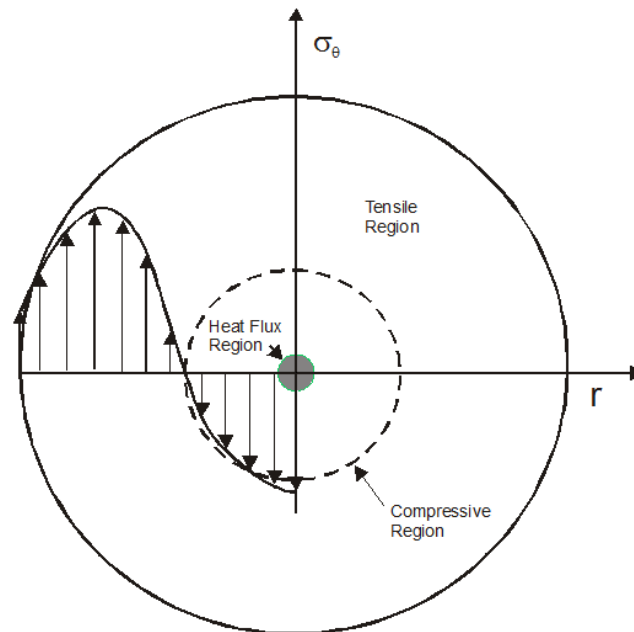
**Figura 2.8:** Concentração de tensão múltipla: (a) Pequeno entalhe na borda do furo central. (b) Seção ampliada do entalhe (Pilkey, 1997).

Considerando  $K_{T1}$  o fator de concentração de tensão do elemento com um orifício circular e  $K_{T2}$  o fator de concentração de tensão referente ao entalhe na borda, o fator de concentração de tensão múltipla do elemento  $K_{T12}$  não pode ser deduzido diretamente a partir  $K_{T1}$  e  $K_{T2}$ . Os dois diferentes fatores irão interagir um com o outro e produzir uma nova distribuição de tensão (Pilkey, 1997). Devido a sua importância no projeto de engenharia, um esforço considerável tem sido dedicado a encontrar soluções para os problemas de concentração de tensão múltipla (Pilkey, 1997).

### 2.3.4 Concentrador de Tensão Transiente Térmico - $K_{TT}$

Considerando um disco submetido a um fluxo de calor no centro:





**Figura 2.9:** Disco submetido a um fluxo de calor no centro (Carvalho, 2005).

Neste caso, Figura 2.9, tem-se as chamadas tensões térmicas que são produzidas em um corpo como resultado de distribuições de temperatura que não permitem a expansão livre de elementos individuais de acordo com a temperatura local. Na área central, os átomos tendem a se expandir (região compressiva), mas a região vizinha, que ainda não está aquecida, não permite o livre movimento dos elementos (região trativa), gerando, portanto, concentração de tensão nesta região. Tais tensões térmicas são bastante significativas para o componente devido à diferença de temperatura entre as superfícies interna, externa e devido à espessura do material (Liu, 1999). No entanto, existem distribuições de temperatura determinados que produzem expansões livres tais que os elementos adjacentes se encaixam em conjunto sem interferência e, portanto, sem o desenvolvimento de tensões. A distribuição de temperatura que satisfaz as condições da soma das segundas derivadas parciais num dado plano deve ser igual a zero para gerar expansões compatíveis e não produzir tensões térmicas no corpo (Carvalho, 2005).

### 2.3.5 Multiplicação de Concentradores de Tensão - $K_{TS}$

Duas ou mais concentrações de tensão ocorrendo no mesmo local em um membro estrutural são consideradas como múltiplas concentrações de

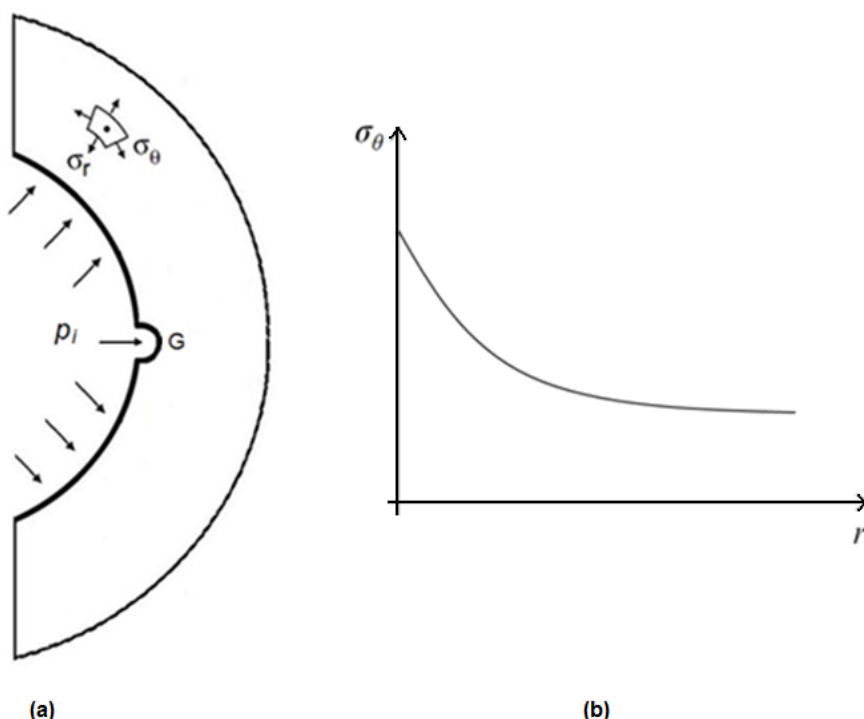
tensão. Os dois fatores diferentes interagirão entre si e produzirão uma nova distribuição de tensão (Pilkey, 1997).

Para uma tubulação de caldeira de plataforma, por exemplo, que trabalha sujeita a pressão e alta temperatura, tem-se:

$$K_{TS} = K_{TT} \times K_{TM} \quad (8)$$

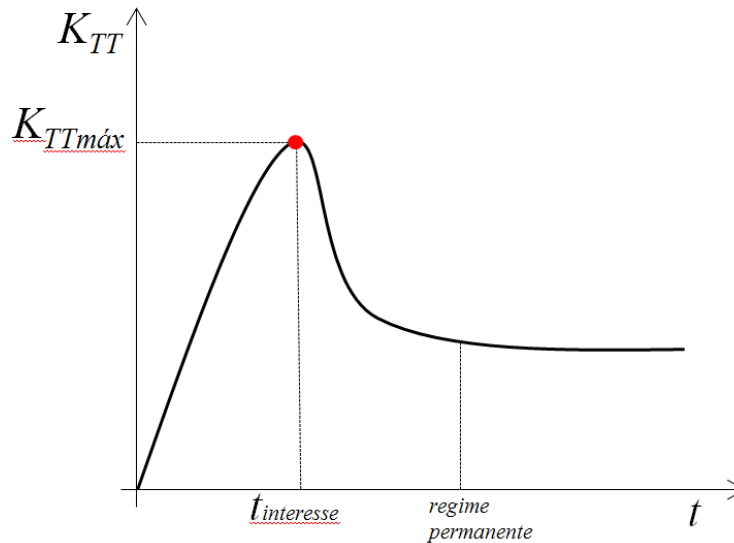
Onde  $K_{TT}$  corresponde ao concentrador de tensão térmico transiente ocasionado pela temperatura elevada no interior da peça e  $K_{TM}$  corresponde ao concentrador de tensão devido à pressão (tensão mecânica).

A Figura 2.10 (b) mostra o gráfico da tensão variando com o raio da tubulação devido à pressão interna no tubo (Figura 2.10 (a)). Na região do ponto G tem-se uma área com maior concentrador de tensão ocasionado pela própria pressão interna sobre o entalhe presente no componente.



**Figura 2.10:** (a) Representação da metade da seção da tubulação em meio à pressão interna. (b) Representação gráfica da variação da tensão em função do raio no ponto G.

O gráfico da Figura 2.11 mostra a variação do concentrador de tensão térmico transiente  $K_{TT}$  em função do tempo  $t$ .



**Figura 2.11:** Representação gráfica da variação do concentrador de tensão térmica transiente em função do tempo.

A técnica utilizada neste caso é verificar como varia o  $K_{TT}$  em intervalos de tempo distintos e multiplicar ao  $K_{TM}$  o maior valor encontrado para  $K_{TT}$ , obtendo, desta forma, o concentrador total de tensões. A zona de interesse, portanto, é a região do concentrador de tensão térmica transiente máximo.

É importante ressaltar que problemas relacionados a concentrações de tensão são responsáveis por muitas falhas em elementos estruturais ou elementos mecânicos sujeitos a carregamentos cíclicos. Nesses casos, uma concentração de tensão provoca trinca no material se a tensão excede o limite de resistência à fadiga do mesmo, seja este dúctil ou frágil. O material localizado na ponta da trinca permanece no estado frágil e, desse modo, a trinca continua a crescer, levando a uma fratura progressiva (Hibbeler, 2004). No entanto, o concentrador de tensão em um dado componente pode ser suavizado eliminando, por exemplo, seus cantos vivos. Desta forma, a regra básica para se diminuir os efeitos do concentrador de tensão em qualquer peça é suavizar o fluxo dos esforços que a atravessam, retirando material se necessário (Carvalho, 1992).

Também é importante enfatizar que a modelagem matemática é indispensável para calcular a vida residual de peças e estruturas, mas, ela não é a única ferramenta disponível para evitar problemas causados por falhas por fadiga.

## 2.4 Efeitos da Temperatura

Tanto os aços carbono como os inoxidáveis sofrem uma redução nos valores de suas propriedades mecânicas quando trabalham em altas temperaturas (Elinox, 2018). Esta é, na realidade, uma característica dos metais e das diversas ligas metálicas.

Resistência e ductilidade ou fragilidade são propriedades afetadas pela temperatura do ambiente de operação (Budynas, 2011).

Nos aços comuns a perda nas propriedades mecânicas é mais significativa que nos aços inoxidáveis austeníticos, o que explica a preferência pela seleção destes materiais para aplicações em altas temperaturas (Elinox, 2018). Os projetos de equipamentos devem considerar este aspecto, o qual não deve ser esquecido no momento da especificação do material.

O aquecimento em razão da soldagem elétrica ou a gás também provoca mudanças nas propriedades mecânicas. Tais mudanças podem se dar pela fixação durante o processo de soldagem, bem como pelo aquecimento. As tensões resultantes permanecem quando as peças se resfriam e os dispositivos de fixação são retirados. Podem ser usados teste de dureza para descobrir se a resistência foi alterada por soldagem ou não, porém tais testes não revelarão a presença de tensões residuais (Budynas, 2011).

Em altas temperaturas, a resistência à oxidação é, normalmente, o fator mais importante na seleção do material. Os aços inoxidáveis são superiores ao aço carbono em altas temperaturas tanto ao considerar a resistência à oxidação como as propriedades mecânicas (Elinox, 2018).

## 2.5 Tensões Térmicas

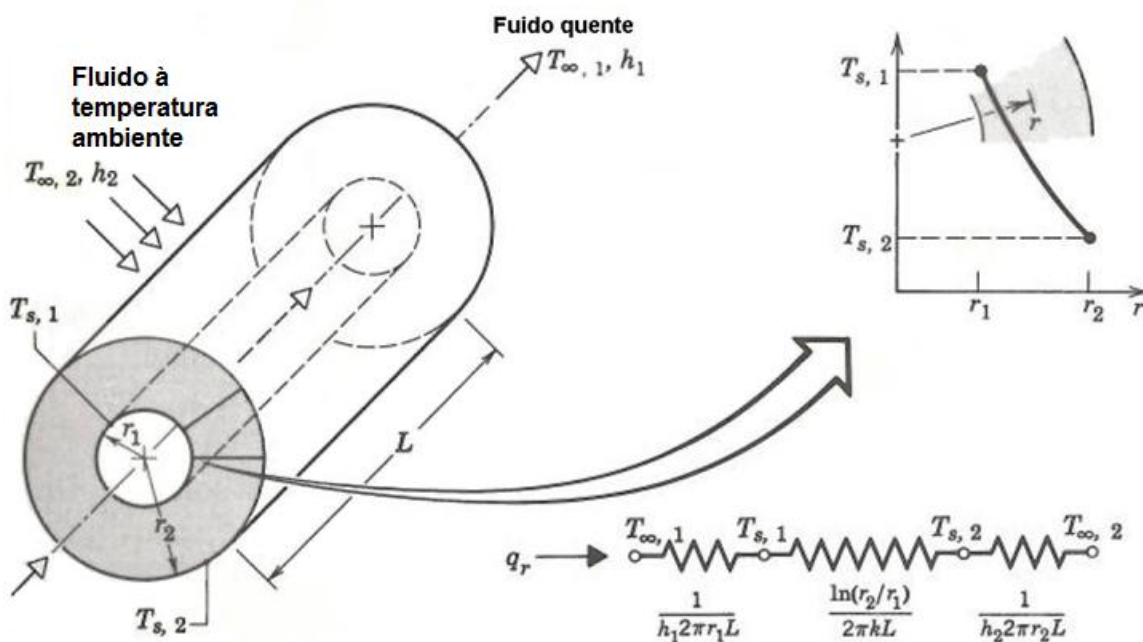
A maioria dos componentes dilata-se quando se eleva a temperatura e contraem-se quando esta diminui, sendo as dilatações e as contrações proporcionais ao incremento térmico num amplo campo de temperaturas (Boley, 1985). Esta proporcionalidade é representada pelo coeficiente linear de dilatação térmica.

Quando o aumento da temperatura num corpo homogêneo não é uniforme e as distintas regiões do material não se dilatam igualmente, tem-se as chamadas tensões térmicas. Se a variação térmica num corpo homogêneo é uniforme e existem limitações externas à dilatação, também serão originadas tensões térmicas (Boley, 1985). Essas tensões são funções não apenas das diferenças de temperatura a que o componente está sujeito, mas também do histórico de temperatura limite ao qual o material foi submetido (Kim, 2005), durante um tratamento térmico, por exemplo.

O conhecimento de tais tensões é importante nos projetos de engenharia, uma vez que a ruptura por fadiga pode ocorrer a qualquer instante, como resultado de flutuações na temperatura (choque térmico) e do crescimento de trincas através da espessura do material (Radu, 2008).

Normalmente, sistemas cilíndricos e esféricos estão sujeitos a diferentes gradientes de temperatura na direção radial e podem, portanto, ser tratado como um caso unidimensional (Incropera, 1990).

A Figura 2.12 mostra um cilindro em meio a troca de calor por convecção.



**Figura 2.12:** Cilindro vazado em meio a troca de calor (Incropera, 1990).

Para este caso, a distribuição nominal de temperatura em um dado ponto que dista uma distância  $r$  é dada por (Incropera, 1990):

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (9)$$

onde  $r_1$  e  $r_2$  correspondem aos raios interno e externo, respectivamente.

A distribuição de tensão devido ao fluxo de calor é dada por (Incropera, 1990):

$$\sigma_{\theta T} = \frac{\alpha E}{r^2} \left[ \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right] \int_a^b T(r) r dr + \int_a^r T(r) r dr - T(r) r^2 \quad (10)$$

onde  $a$  e  $b$  correspondem aos raios interno e externo, respectivamente, e  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear do material.

## 2.6 Aços: Aços Resistentes à Corrosão

Ligas à base de ferro contendo pelo menos 12% de cromo são denominados aços inoxidáveis (Budynas, 2011). A característica mais importante desses aços é a sua resistência a várias, mas nem todas, condições de corrosão (Budynas, 2011). Os quatro tipos disponíveis são: aços-cromo ferríticos, aços cromo-níquel austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos e aços endurecidos por precipitação.

Os aços inoxidáveis cromo-níquel preservam a estrutura austenítica à temperatura ambiente e, portanto, não são suscetíveis a tratamento térmico. A resistência desse aço pode ser aumentada por meio de trabalho a frio (Budynas, 2011). Eles não são magnéticos a menos que sejam trabalhados a frio. Suas propriedades de endurecimento por trabalho a frio também os tornam difíceis de serem usinados. Todos os aços cromo-níquel podem ser soldados. Eles possuem propriedade de resistência à corrosão superiores às dos aços-cromo comuns. Quando se adiciona mais cromo para obter uma maior

resistência à corrosão, também é necessário adicionar mais níquel caso se queira manter suas propriedades austeníticas (Budynas, 2011).

### **2.6.1 Aço Inoxidável Austenítico - Aços Típicos AISI 304 e AISI 316**

Os aços inoxidáveis austeníticos são, basicamente, ligas não-magnéticas ternárias de ferro-cromo-níquel com baixo teor de carbono, contendo de 16 a 26% de cromo, níquel até 35% e manganês até 15% (Ishida, 2009). Apresentam excelentes propriedades mecânicas, trabalhabilidade à frio e elevada resistência à altas temperaturas. A adição de elementos de liga como o molibdênio e a redução do teor de carbono melhoram sua resistência à oxidação (SENAI-RJ, 2012).

Quanto maior é o teor de carbono do material, maior também é o teor de cromo removido da solução sólida e, conseqüentemente, maior será a suscetibilidade do material a se corroer intergranularmente em certos meios (Ishida, 2009).

Esta suscetibilidade tem sido determinada como sensitização e é atribuída à precipitação de carbeto nos contornos de grão austeníticos (Ishida, 2009). Esse fenômeno faz com que a quantidade deste elemento nas regiões adjacentes destes carbeto seja reduzida e então as regiões empobrecidas de cromo tornam-se suscetíveis ao ataque e, portanto, à corrosão.

O limite de solubilidade do carbono na austenita é de 0,02%. Logo, mantendo-se o carbono abaixo desse teor, a formação de carboneto de cromo não será possível. Assim, surgiu o aço inoxidável ABNT 316L, com o teor máximo de carbono de 0,03%. O excedente de 0,01% de carbono que, eventualmente poderá precipitar, não é suficiente para remover grandes quantidades de cromo da solução sólida e levar o aço a sensitização (Ishida, 2009).

Os aços inoxidáveis austeníticos tornam-se suscetíveis à corrosão intergranular quando submetidos a temperaturas entre 500 e 800°C. Porém, esse fenômeno pode ser minimizado adotando técnica simples como, por

exemplo, a escolha por aços inoxidáveis de baixo C (máximo de 0,03%) (Ishida, 2009). É o caso do AISI 316L. Esse aço pode ser utilizado em uma faixa de temperatura mais alta que compreende 700 e 1100°C tanto em atmosferas redutoras como oxidantes, mesmo na presença de enxofre (SENAI-RJ, 2012).

Como o estudo em questão propõe uma temperatura interna de trabalho de 550°C, o aço AISI 316L representou uma boa opção para o caso.

## 2.7 Método de Elementos Finitos (MEF)

Muitos fenômenos em engenharia e ciências podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais. Em geral, solucionar essas equações por meio de métodos analíticos clássicos para geometrias arbitrárias é quase impossível. O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma aproximação numérica com o qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado (Budynas, 1977). Do ponto de vista da engenharia, o MEF é um método para resolver problemas de engenharia, tais como análise de tensões, transferência de calor, escoamento de fluidos e eletromagnetismo, por simulações de computador (Budynas, 2011).

Milhões de engenheiros e cientistas em todo o mundo utilizam o MEF para prever o comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico de sistemas, tanto na etapa de projeto quanto na de análise de desempenho (Castro, 2009).

Desde os primórdios foi investido grande esforço no desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos nas áreas de formulações de elementos, bem como na implementação via computador de todo o processo de resolução. Entre os principais avanços na tecnologia computacional teve-se a rápida expansão dos recursos de *hardware* dos computadores, eficientes e precisas rotinas para resolução de matrizes, bem como computação gráfica, para facilitar a visualização dos estágios de pré-processamento da construção do modelo até mesmo na geração automática de malha adaptativa e nos estágios de pós-processamento de revisão dos resultados obtidos (Budynas, 2011).



Como o Método dos Elementos Finitos é uma técnica numérica que discretiza o domínio de uma estrutura contínua, os erros são inevitáveis. São eles:

- Erros computacionais: erros de arredondamento provenientes de cálculos em ponto flutuante dos computadores, bem como das formulações dos esquemas de integração numérica que são empregados (Budynas, 2011).
- Erros de discretização: a geometria e a distribuição de deslocamentos de uma estrutura real varia continuamente. O emprego de um número finito de elementos para modelar a estrutura introduz erros na correspondência da geometria com a distribuição de deslocamentos devido às limitações matemáticas inerentes dos elementos (Budynas, 2011).

Métodos numéricos, como o método de diferenças finitas, são igualmente muito complicados de aplicar a formas arbitrárias; os desenvolvedores de programas computacionais não têm comercializado programas com base em diferenças finitas capazes de lidar com geometrias complicadas, comumente encontradas na engenharia. De modo semelhante, a análise de tensões requer a solução de equações diferenciais parciais que são muito difíceis de serem resolvidas por métodos clássicos, exceto para formas muito simples, como as retangulares, raramente encontradas em problemas de engenharia (Budynas, 1977).

A idéia básica do MEF consiste na divisão do domínio de integração em um método finito de pequenas regiões denominadas de "elementos finitos", muitas vezes chamados apenas de "elementos". A essa divisão do domínio dá-se o nome de "malha" (*grid*, em inglês). A malha ou *grid*, é composta de elementos denominados de "arestas" (faces) e "nós" (pontos de interseção das arestas) (COPPE, 2004).

São usadas diversas formas geométricas de elementos em análise por elementos finitos para aplicações específicas. Os vários elementos usados em um *software* MEF de propósito geral constituem o que é conhecido como

biblioteca de elementos do programa. Os elementos podem ser dispostos nas seguintes categorias: elementos lineares, elementos de superfície, elementos sólidos e elementos com finalidades especiais (Budynas, 2011).

O MEF provê uma metodologia sistemática com a qual a solução pode ser determinada por meio de um programa de computador. Para problemas lineares, a solução é determinada pela resolução de um sistema de equações lineares e o número de incógnitas é igual ao número nodal. Para obter uma solução razoavelmente exata, milhares de nós são necessários, fazendo com que os computadores sejam essenciais para resolver essas equações. Normalmente, a exatidão da solução melhora com o aumento do número de elementos (e nós), mas o tempo computacional e, em consequência, o custo, também aumentam (Budynas, 1977). Os resultados são, em geral, apresentados em visualizações computacionais, como gráficos de contorno, por exemplo. Essa informação é então utilizada em projetos de engenharia.

Dado o caráter aproximado das soluções fornecidas por este método, o desconhecimento dos seus fundamentos pode conduzir a resultados desastrosos na sua aplicação. Por esta razão, é necessário aprender os fundamentos do Método dos Elementos Finitos (UNIOESTE, 2009).

### **2.7.1 Geração de Malha**

A rede de elementos e nós que discretiza uma região é conhecida por malha. A densidade da malha aumenta à medida que forem colocados mais elementos no interior de uma determinada região. Refinamento de malha refere-se a alteração da malha de uma análise de um modelo para a análise seguinte visando a melhores resultados. Geralmente, os resultados melhoram quando a densidade da malha é aumentada em áreas com gradientes de tensão elevados e/ou quando zonas de transição geométrica recebem malhas mais suaves. Normalmente, mas nem sempre, os resultados da análise de elementos finitos convergem para os resultados exatos à medida que a malha é continuamente refinada. Para avaliar se houve melhora, em regiões onde surgem gradientes de tensão elevada, a estrutura pode ser novamente dividida

em malha de maior densidade nesta região. Se há uma variação mínima no valor de tensão máxima, supõe-se que a solução convergiu (Budynas, 2011).

Na presença de concentrações de tensão, é preciso ter uma malha bem densa nesta região para obter resultados próximos da realidade (Budynas, 2011). O importante é que a densidade da malha seja aumentada apenas em uma região em torno da concentração de tensões e que a malha de transição do resto da estrutura seja gradual, isso porque quanto mais refina-se a malha, maior será o tempo de processamento para se obter o resultado desejado. Uma transição de malha abrupta, por si só, terá o mesmo efeito de uma concentração de tensão.

### **2.7.2 Técnicas de Modelagem**

Com os pacotes de CAD e geradores automáticos de malha atuais, torna-se fácil criar um modelo sólido e gerar malha sobre o volume com elementos finitos. Com a velocidade e abundância de memória dos computadores de hoje, torna-se mais fácil criar um modelo com um número extremamente grande de elementos e nós. As técnicas de modelagem por elementos finitos do passado agora parecem ser ultrapassadas e supérfluas. Entretanto, pode ser gasto muito tempo desnecessário em um modelo bem complexo quando um modelo muito mais simples resolveria o problema. O modelo complexo talvez nem chegue a fornecer uma solução precisa, ao passo que um mais simples o faria. O importante é saber que tipo de solução o analista está querendo (Budynas, 2011).

### **2.7.3 Aplicação de Carga e Condições de Contorno**

As cargas de elementos são convertidas pelo *software* em cargas nodais equivalentes e, no final, são tratadas como cargas concentradas aplicadas aos nós (Budynas, 2011).

Para carregamento térmico, deve ser fornecido o coeficiente de expansão térmica  $\alpha$  para o material, bem como a temperatura inicial da

estrutura e as temperaturas nodais finais. A maioria dos pacotes de *software* possui a capacidade de realizar primeiro uma análise de transferência de calor por elementos finitos na estrutura para determinar as temperaturas nodais finais (Budynas, 2011). Os resultados da temperatura são gravados em um arquivo, que pode ser transferido para análise de tensões estáticas.

Pode-se realizar uma análise de transferência de calor em um componente estrutural abrangendo também os efeitos da condução, convecção e/ou radiação de calor. Depois da análise de transferência de calor ter sido completada, o mesmo modelo poderá ser usado para determinar as tensões térmicas resultantes (Budynas, 2011).

A simulação das condições de contorno e outras formas de restrição provavelmente é a parte mais difícil da modelagem precisa de uma estrutura para uma análise por elementos finitos. Ao especificar restrições, é relativamente fácil cometer erros de omissão ou má interpretação.

#### **2.7.4 Aplicações de Elementos Finitos**

A faixa de aplicações de elementos finitos é muito ampla, mas para dar uma idéia de sua versatilidade, pode-se citar (Alian, 2016):

- Análise de tensões e térmica de peças industriais tais como *chips* eletrônicos, dispositivos elétricos, válvulas, tubos, vasos de pressão, motores automotivos e aeronáuticos.
- Análises sísmicas de represas, plantas de potência, cidades e arranha céus.
- Análise de impacto de carros, trens e aeronaves.
- Análise de escoamento de líquidos refrigerantes, poluentes e contaminadores, além de ar em sistemas de ventilação.
- Análise eletromagnética de antenas, transistores e componentes de aeronaves.

- Análise de procedimentos cirúrgicos, tais como cirurgias plásticas, reconstrução maxilar, correção de escoliose e muitas outras.

Novas áreas de aplicação estão constantemente surgindo. Há poucos anos, a comunidade médica ficou muito interessada com as possibilidades de uma medicina preventiva para pacientes específicos. Uma aproximação em medicina preventiva tem por objetivo usar a visualização médica e o monitoramento de dados para construir um modelo de uma parte da anatomia e da fisiologia de um indivíduo, por exemplo (Budynas, 1977).

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Avaliar o concentrador de tensão em um componente com descontinuidade por meio de soluções analíticas é muito difícil, devido à complexidade na configuração do componente e às condições de contorno que devem ser impostas. O método numérico torna-se então uma importante ferramenta na resolução das equações diferenciais parciais que podem então ser resolvidas de modo aproximado (Liu, 1999).

Este capítulo apresenta o modelo empregado na análise por Elementos Finitos que foi implementado com a finalidade de avaliar o concentrador total de tensão na tubulação devido a aplicação de pressão interna e devido às tensões térmicas no componente. Através da determinação das máximas tensões mecânicas pelo MEF ( $\sigma_{\theta max}$ ) nos diversos casos estudados, e com a obtenção das tensões nominais ( $\sigma_{\theta}$ ) através da equação 11, os valores dos concentradores de tensão devido às tensões mecânicas ( $K_{TM}$ ) para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação puderam ser calculados (equação 13).

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left( 1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left( 1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (12)$$

$$K_{TM} = \frac{\sigma_{\theta max.}}{\sigma_{\theta}} \quad (13)$$

As equações 11 e 12 se referem às equações 1 e 2, respectivamente, considerando  $p_o = 0$ . A tensão radial do componente é representada na equação anterior por  $\sigma_r$ ,  $r_i$  refere-se ao raio interno,  $r_o$  é o raio externo, a pressão interna  $p_i$  e  $r$  corresponde à variação do raio da tubulação.

Também é apresentado, para o regime permanente, o estudo da localização e intensidade dos gradientes de temperatura ao longo do tubo sujeito a convecção, considerando os mesmos reparos semicirculares. Para validação do modelo de elementos finitos devido à variação de temperatura na tubulação foi utilizada a equação 14.

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (14)$$

Onde  $T_{s,1}$  e  $T_{s,2}$  correspondem, respectivamente, as temperaturas interna e externa da tubulação,  $r_1$  e  $r_2$  referem-se aos raios interno e externo,  $r$  é a variação do raio do tubo e  $T(r)$  refere-se a variação na temperatura.

Posteriormente foram avaliados os concentradores de tensão devido às tensões térmicas para os mesmos reparos semicirculares. Dessa forma foi possível obter o concentrador total de tensão à que o componente foi submetido. A equação 15 demonstra a tensão térmica de um componente sujeito a convecção.

$$\sigma_{\theta_T} = \frac{\alpha E}{r^2} \left[ \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right] \int_a^b T(r) r dr + \int_a^r T(r) r dr - T(r) r^2 \quad (15)$$

onde  $a$  e  $b$  correspondem aos raios interno e externo, respectivamente,  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear do material,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $r$  corresponde à variação do raio do tubo.

Através da determinação das máximas tensões térmicas ( $\sigma_{\theta_{Tmax}}$ ) pelo MEF nos diversos casos estudados, e com a obtenção das tensões nominais através da equação 15, os valores dos concentradores de tensão devido às tensões térmicas ( $K_{TT}$ ) puderam ser calculados (equação 16):

$$K_{TT} = \frac{\sigma_{\theta_{Tmax}}}{\sigma_{\theta_T}} \quad (16)$$

Para encontrar o concentrador total de tensão de cada caso avaliado, basta multiplicar ambos os resultados encontrados dos concentradores de tensão: mecânico e térmico.

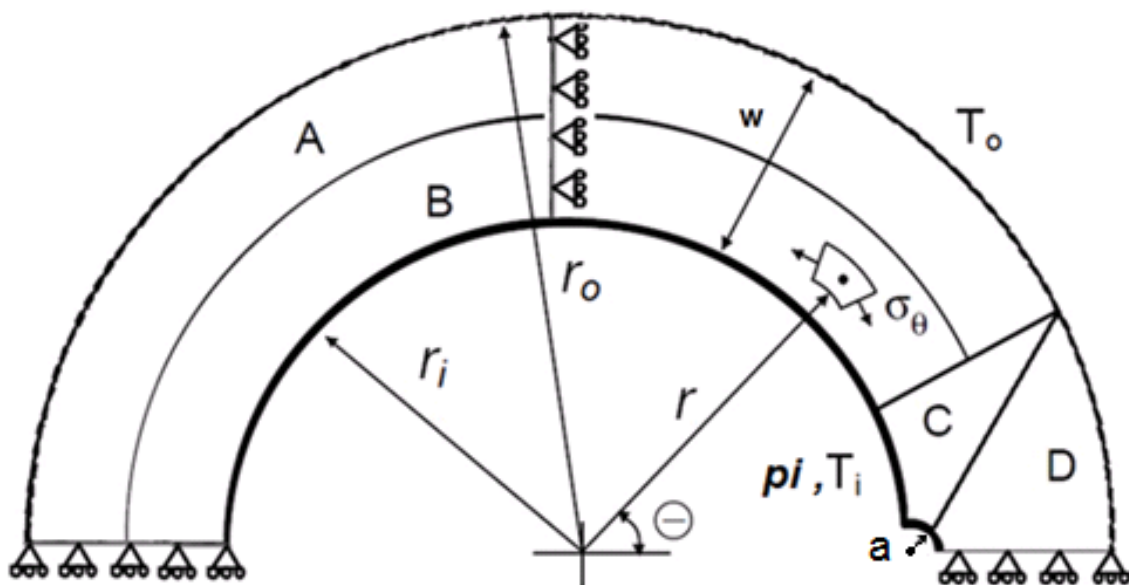
### 3.1 Programa Utilizado

O programa utilizado foi o ADINA 8.0. ADINA é um programa comercial de Método dos Elementos Finitos usado na indústria e em investigação para desenvolver análises lineares e não-lineares através do Método de Elementos Finitos de problemas de mecânica dos sólidos, transferência de calor, mecânica dos fluidos e interação fluido-estrutura.

### 3.2 Geometria do Componente / Modelo de Análise para o MEF

Foi utilizado um tubo de parede espessa. Foi adotada a relação  $r_o/r_i$  de 1,5, ou seja, para o raio externo foi adotado um valor representativo de  $r_o = 0,235$  m e, para o raio interno o valor de  $r_i = 0,155$  m.

Para este estudo, foi analisada uma seção semicircular representada na Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Representação da geometria e malha. Regiões A e B mais "grosseiras" e regiões C e D mais refinadas. Os raios interno e externo são, respectivamente,  $r_i$  e  $r_o$ ,  $\Theta$  é o ângulo associado ao aro de tensão,  $T_i$  e  $T_o$  correspondem às temperaturas interna e externa,  $w$  é a espessura da parede, "a" é a profundidade do entalhe,  $p_i$  é a pressão interna e  $r$  é o raio do entalhe.



Para este caso, a seção foi dividida em 4 partes. As regiões A e B relativamente mais "grosseiras" e regiões C e D mais refinadas, com a finalidade de se avaliar com maior precisão o concentrador de tensão devido à presença da descontinuidade no componente.

A razão  $r_o/r_i = 1,5$  foi baseada em valores típicos encontrados na indústria com a finalidade de validação do modelo em estudo.

### 3.3 Definição do Material

Na simulação foram utilizadas as propriedades do aço AISI 316L, um aço austenítico, típico para aplicação em altas temperaturas e em ambientes corrosivos devido a sua resistência à oxidação. É utilizado na construção civil, em equipamentos para indústria aeronáutica, naval, química e petroquímica, refinarias, na fabricação de tubos e vasos de pressão, entre outras aplicações.

Os aços inoxidáveis tornam-se suscetíveis à corrosão intergranular entre 500 °C e 800 °C. O aço inoxidável AISI 316L (0,03%C) admite um limite de temperatura de trabalho entre 700 °C e 1100 °C sem sensitização. Portanto, como a temperatura de trabalho do superaquecedor de caldeira de plataforma de petróleo utilizada neste estudo foi de 550 °C, adotou-se o aço AISI 316L como material.

#### 3.3.1 Propriedades do Material - Aço AISI 316L

A terminação 'L' indica 0,03%C.

**Tabela 3.1:** Composição química do aço AISI 316L (Favorit, 2018).

ABNT/ SAE/ AISI	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
316	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	10,0 - 14,0	16,0 - 18,0	2,0 - 3,0
316 L	0,03	2,00	0,045	0,030	0,75	10,0 - 14,0	16,0 - 18,0	2,0 - 3,0

**Tabela 3.2:** Propriedades mecânicas e térmicas do aço AISI 316L.

Propriedades	Valor Médio
Módulo de Elasticidade (Callister, 2008)	193 GPa
Coefficiente de Poisson (Callister, 2008)	0,30
Limite de Escoamento (Callister, 2008)	205 MPa
Limite de Resistência à Tração (Callister, 2008)	515 MPa
Condutividade Térmica (Incropera, 1990)	13,4 W/m.K
Coefficiente de Expansão Térmica (Incropera, 1990)	$3,48 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

### 3.4 Definição do Elemento / Estado de Tensão

Foi utilizado um modelo 2D, nove nós por elemento no refinamento da malha e estado plano de deformações.

Foi adotado um modelo 2D devido a limitação de memória RAM e capacidade de processamento dos computadores pessoais disponíveis no momento. A opção de nove nós, por elemento, corresponde ao máximo de resolução alcançado para problema 2D. Esse fato não prejudicou a análise em questão, porém, demandou mais tempo para se obter resultados representativos.

No modelo de elementos finitos, foi considerado um tubo longo com forças aplicadas perpendicularmente à direção longitudinal. Logo, no meio da tubulação, pode-se assumir que as deformações são iguais a zero, por isso, estado plano de deformações.

### 3.5 Condições de Contorno / Critério de Convergência

A distribuição de tensões para um cilindro de parede espessa é bem conhecida (Carvalho, 2005) e tem comportamento semelhante à Figura 2.2 do presente trabalho. No entanto, há aplicações em que a simetria da geometria cilíndrica não é regular fazendo com que a distribuição de tensão não seja

prevista. Um exemplo dessa assimetria pode ser encontrada quando uma tubulação apresenta uma abertura de trinca constituindo um entalhe do tipo "U".

Este estudo teve, por finalidade, avaliar a distribuição e o concentrador total de tensão provocado pela pressão interna e pelas tensões térmicas em uma tubulação de caldeira de plataforma de petróleo (vaso de pressão) que sofreu abertura de trinca devido ao choque térmico, constituindo, após reparo do dano, um entalhe do tipo "U". A descontinuidade presente no componente faz com que aumente a concentração de tensão no local.

É importante ressaltar que esses entalhes devem ser cautelosamente estudados uma vez que a abertura de trincas pode representar iminente perda de integridade do componente.

O acesso ao reparo e inspeção na região dos superaquecedores é feito por meio de janelas de inspeção chamadas de "postigos" que se encontram separados uns dos outros por cerca de 500 mm ao longo de todo componente. Estes "postigos" também têm a função de garantir, no caso de acidente, que ocorra o chamado *leak before blow* (vazar antes de explodir), permitindo a ejeção dos "postigos" e o imediato alívio da eventual sobrepressão que se encontra internamente ao equipamento.

Neste trabalho, a análise numérica por MEF foi realizada fazendo um corte simétrico no componente (Figura 3.1), já que na prática, devido ao tempo de processamento da análise por elementos finitos, recomenda-se a avaliação em uma seção mínima da geometria, porém, representativa do modelo que se deseja avaliar (Sinmec, 2018). Ou seja, devido à simetria da tubulação, neste caso, considerou-se para a análise apenas metade do componente a fim de facilitar o estudo, uma vez que um modelo simplificado torna a análise mais rápida e exige menor capacidade de memória RAM dos computadores, visto a diminuição do número de nós da malha. Neste trabalho, portanto, para simplificação da análise, foi avaliada uma seção semicircular fixando os raios da geometria e variando-se os raios do entalhe. As condições de contorno impostas estão representadas na Figura 3.1.

Foi adotado como critério de convergência, uma variação inferior a 5% para se considerar a solução como tendo-a convergido. Esse valor foi adotado devido à capacidade de memória RAM dos computadores atualmente disponíveis X necessidade de refinamento localizado na precisão dos resultados. Além disso, no processo de reparo da tubulação através da técnica de esmerilhamento, alcançar a geometria da descontinuidade que está representada no modelo adotado (entalhe do tipo "U") é muito difícil, logo, um erro inferior a 5% pode ser considerado representativo.

### 3.5.1 Casos Estudados

O modelo inclui pressão que atua sobre as faces do entalhe. Um modelo sem pressão já foi executado e os resultados indicaram claramente que a pressão interna é extremamente relevante no que se diz respeito ao favorecimento de abertura de trincas no corpo (Carvalho, 2005).

Neste trabalho foi considerada, na primeira análise, pressão na superfície interna da tubulação,  $p_i = 1000$  MPa, e, externamente, foi considerada pressão atmosférica. Numa segunda etapa do estudo, para avaliação dos gradientes de temperatura e, conseqüentemente, das tensões térmicas, foi considerado vapor superaquecido como fluido quente a uma temperatura de  $T_i = 550$  °C no interior do componente e, externamente, foi considerado temperatura ambiente,  $T_o = 30$  °C. Para a primeira etapa foi feita comparação entre um aço estrutural convencional, SAE 1040, e o aço AISI 316L com a finalidade de avaliar a severidade na distribuição de tensão para ambas as situações.

É importante ressaltar que a utilização da pressão no valor 1000 MPa é irrelevante, uma vez que trata-se de uma análise linear elástica, com deformações praticamente nulas. Esse valor elevado na pressão foi adotado por questão de segurança, para validação do estudo.

Foram analisadas 5 razões de raio do entalhe em relação a espessura nominal da parede da tubulação (tubo perfeito). São elas:  $a/w = 0,05, 0,10, 0,15, 0,20$  e  $0,25$ . Esse intervalo foi determinado pela tenacidade à fratura de

um aço típico empregado na indústria, porém, acrescido de valor de segurança referentes ao material danificado (deformação plástica) que foi removido durante o reparo formando um entalhe do tipo "U" no componente.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

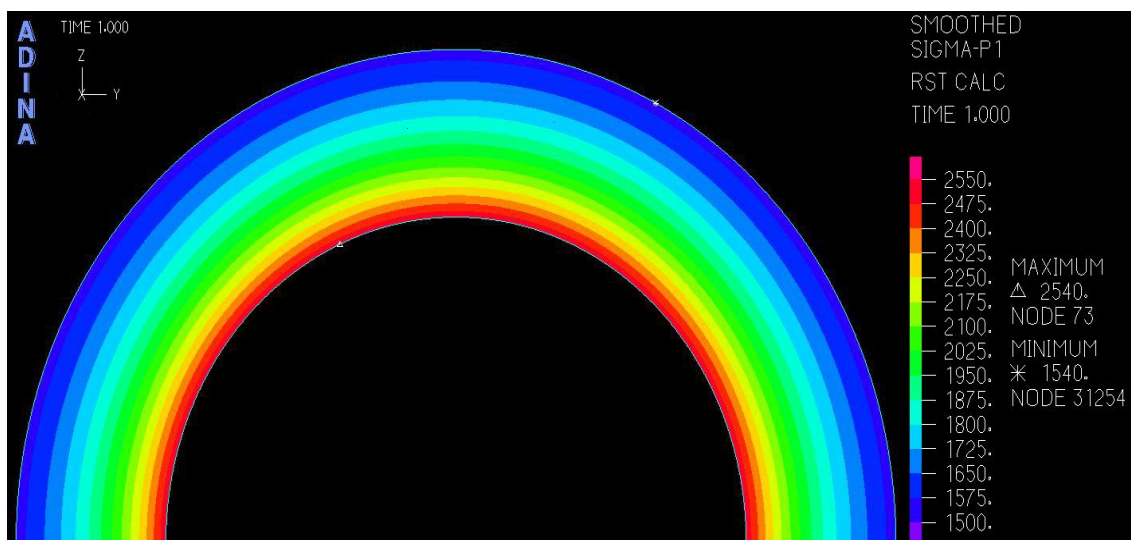
As análises quanto à distribuição de tensão e temperatura foram feitas separadamente, ou seja, inicialmente foi considerada a tubulação sujeita a pressão interna e, após, foi feito o estudo devido à temperatura interna, o que gerou tensões térmicas. Como se trata de tensões lineares elásticas, foi possível superpor tensões mecânica e térmica, quando necessário. Os casos foram avaliados em módulos a fim de detectar possíveis erros que pudessem ocorrer ao longo da análise pelo Método dos Elementos Finitos.

### 4.1 Avaliação do Modelo

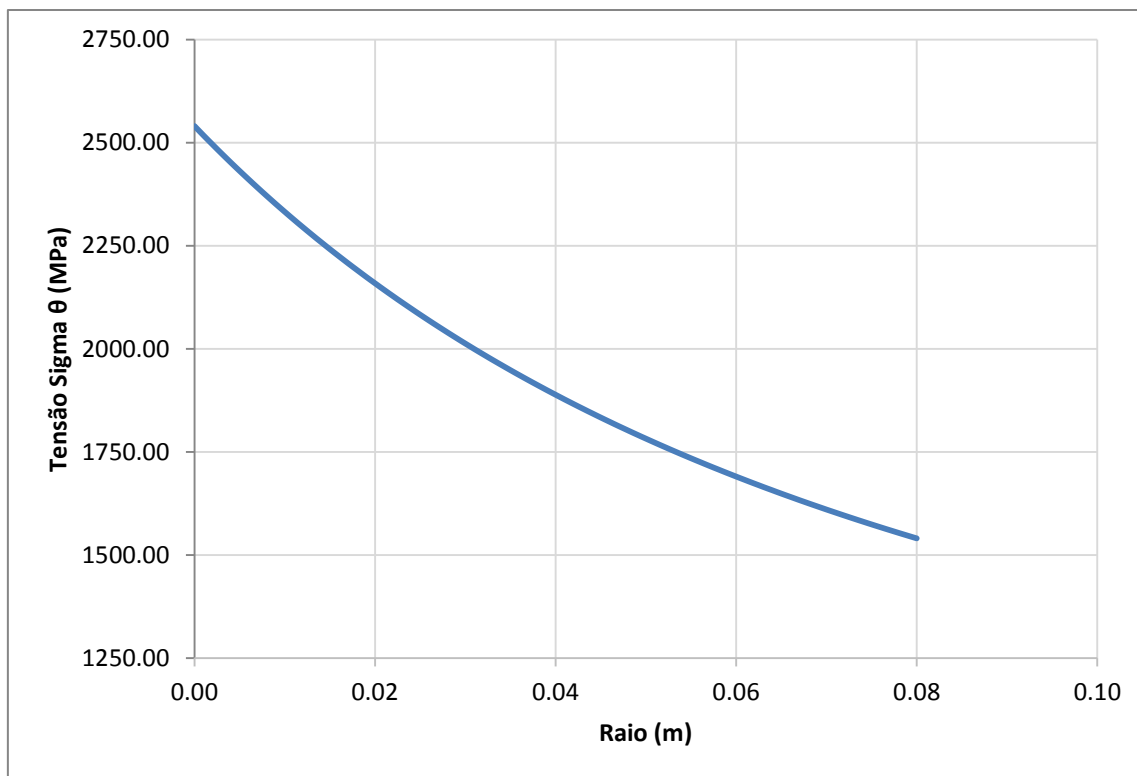
#### 4.1.1 Geometria: Tubo Íntegro

##### 4.1.1.1 Estudo Devido a Pressão

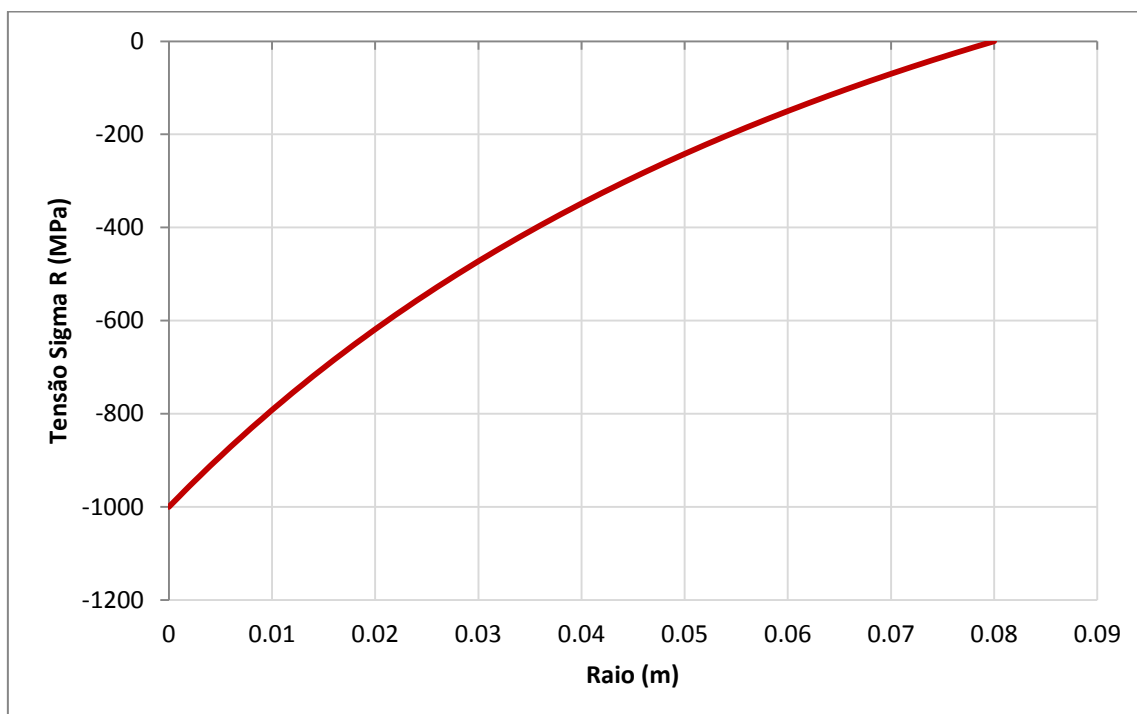
Foi considerada a tubulação submetida a uma pressão interna,  $p_i = 1000$  MPa, e foi realizada a comparação entre o MEF e as equações clássicas. Como pressão externa foi considerada pressão atmosférica, logo, através das equações 11 e 12 foram encontradas as distribuições de tensões ao longo da espessura da tubulação. As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 representam a distribuição de tensão tangencial e radial ao longo do raio.



**Figura 4.1:** Ilustração da análise da tensão tangencial sigma  $\theta$  para tubo perfeito via MEF.



**Figura 4.2:** Representação gráfica da distribuição de tensão tangencial ao longo da espessura da tubulação: MEF e equação.



**Figura 4.3:** Representação gráfica da distribuição de tensão radial ao longo da espessura da tubulação: MEF e equação.

É importante ressaltar que as representações gráficas da distribuição de tensão tanto tangencial (Figura 4.2) quanto radial (Figura 4.3) já eram esperadas, conforme previsto em literatura, Figura 2.2 do presente trabalho. A média dos erros associados às análises de tais tensões em relação ao Método dos Elementos Finitos e as equações clássicas é 0,006% para tensão tangencial e 0,02% para tensão radial, ou seja, a distribuição de tensão tangencial é a mesma para análise numérica e para referência bibliográfica (Budynas, 2011). O mesmo ocorre com a distribuição de tensão radial. Por esse motivo, as curvas para ambas as análises se superpõem quando se trata de análise numérica e equação. Logo, através de tais análises, pode-se constatar a validação do modelo em estudo.

Os cálculos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 podem ser verificados no apêndice I.

#### **4.1.1.2 Estudo Devido ao Gradiente de Temperatura**

Primeiramente foi avaliada a distribuição de temperatura na tubulação considerando que a mesma estava submetida a uma temperatura interna,  $T_i = 550$  °C, na parede do tubo, e, externamente, foi considerado temperatura ambiente,  $T_o = 30$  °C. Com essa análise foi possível comparar os resultados das variações das temperaturas ao longo do raio via MEF e a equação 14 (apêndice II). Após esta análise, adicionou-se ao estudo um fluido quente no interior do tubo, vapor superaquecido, representado pelo coeficiente de convecção,  $h$ .

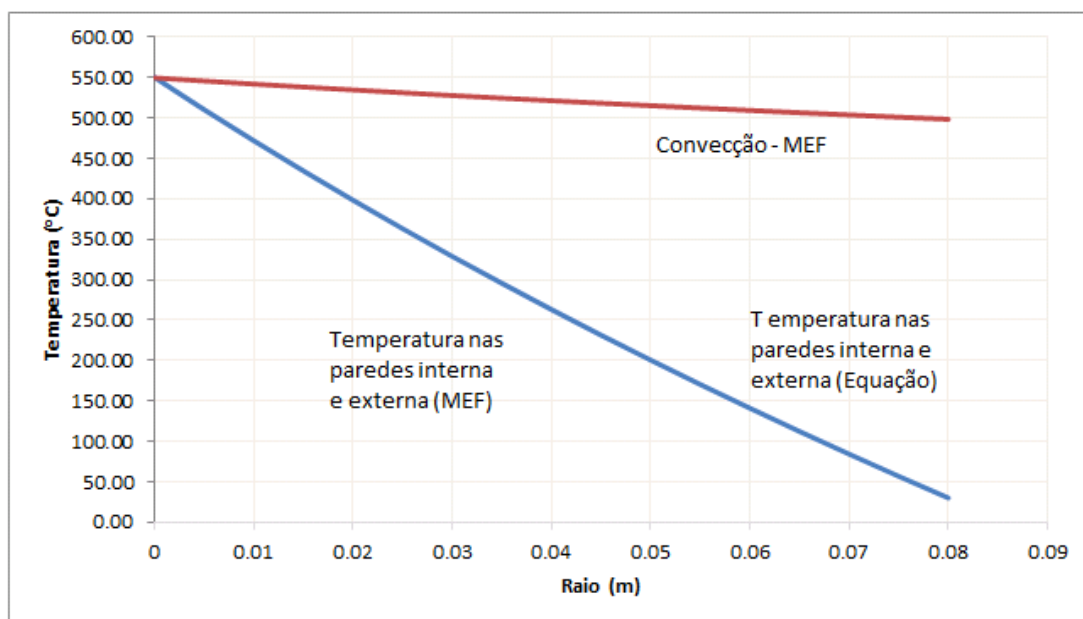
Foi constatado que há diferença nos gradientes de temperatura quando o componente é submetido à fixação de temperaturas nas paredes do tubo e quando é a convecção que controla a distribuição de temperatura na tubulação. Quando se trata de convecção, tem-se menores variações de temperatura, ou seja, menor gradiente de temperatura se comparado a fixação de temperaturas nas paredes do componente.

As Figuras 4.4 e 4.5 representam a distribuição de temperatura ao longo do raio da tubulação.





**Figura 4.4:** Ilustração da análise da distribuição de temperatura para tubo perfeito via MEF (convecção).



**Figura 4.5:** Representação gráfica da distribuição de temperatura ao longo da espessura da tubulação.

A verificação da convergência dos resultados obtidos pelas malhas sucessivamente refinadas foi feita empregando-se um modelo que fixa as temperaturas nas paredes interna e externa da tubulação. A razão disto é que o modelo teórico (equação 14 do presente trabalho) para comparação é facilmente encontrado na referência bibliográfica (Incropera, 1990). Comparando ambos os modelos, tanto pela análise numérica quanto pela

equação, obteve-se uma média de erro inferior a 0,007%, o que se conclui que o resultado numérico é representativo.

No entanto, este estudo emprega um modelo que simula as condições reais encontradas em um duto de parede grossa que recebe um fluido com características próprias. A justificativa para a escolha do modelo alternativo é que o que varia no modelo empregado é que a convecção controla a temperatura da parede do tubo (menor gradiente de temperatura), e não há a imposição, à priori, de uma temperatura constante na parede da tubulação durante todo o processo. A convecção é um fenômeno de superfície e, portanto, não altera a forma com que os gradientes de temperatura se distribuem no interior do corpo (Incropera, 1990).

#### **4.1.2 Geometria: Tubo com Descontinuidade**

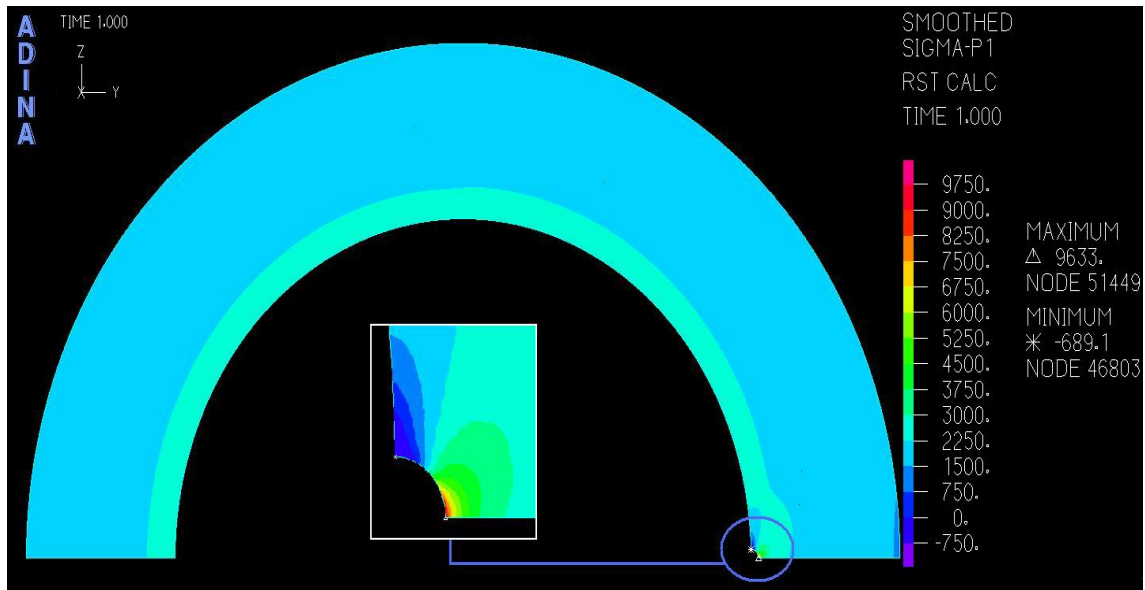
Foram avaliados 5 casos de descontinuidade da tubulação. São eles:  $a/w = 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25$ . Onde, “a” representa a profundidade do dano e “w” corresponde a espessura nominal do tubo perfeito (vide Figura 3.1). Cada um dos 5 casos avaliados para distribuição de tensão tangencial foi também avaliado para distribuição de temperatura no componente / tensões térmicas.

##### **4.1.2.1 Estudo Devido a Pressão – MEF**

###### **4.1.2.1.1 Estudo Devido a Pressão - Tensão Tangencial - MEF**

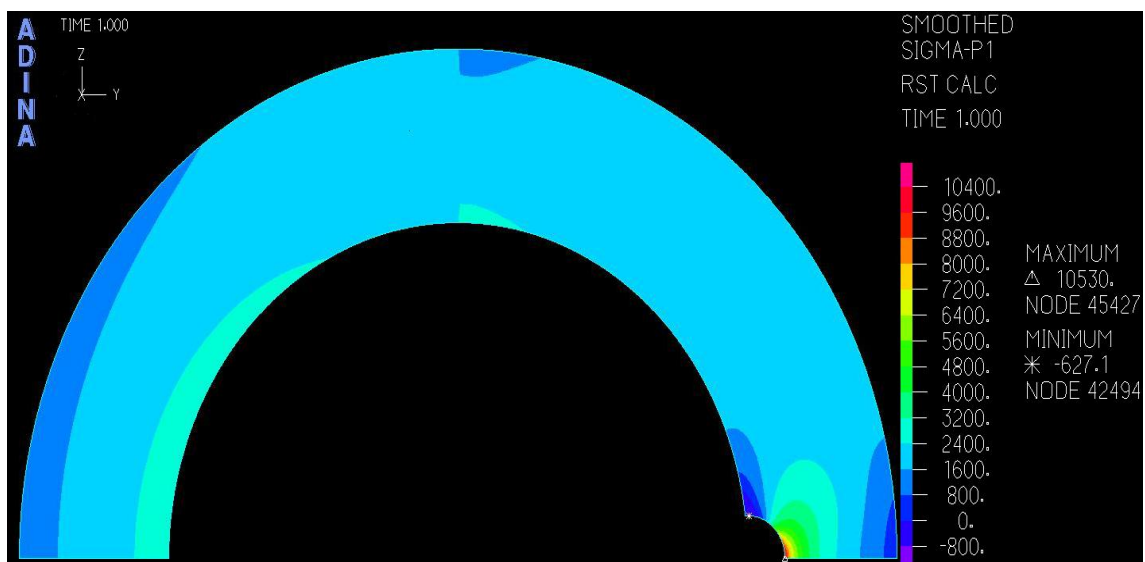
Em cada um dos casos estudados, foi considerado a tubulação submetida a uma mesma pressão interna,  $p_i = 1000$  MPa, e, externamente, foi considerada pressão atmosférica. Cada caso foi avaliado separadamente.

As Figuras 4.6 e 4.7 ilustram duas das análises numéricas realizadas com a finalidade de avaliação do campo de tensão nos componentes. Elas representam a distribuição de tensão tangencial ao longo do raio da tubulação para as razões de  $a/w = 0,05$  e de  $a/w = 0,25$ . Esses casos correspondem, respectivamente, a menor e a maior descontinuidade avaliada neste trabalho.



**Figura 4.6:** Ilustração da análise de distribuição de tensão tangencial considerando  $a/w = 0,05$  - MEF.

A figura do concentrador de tensão é considerada pela literatura técnica como sendo pontual (Pilkey, 1997), porém, a análise de MEF na Figura 4.6 revela que a influência exercida pela presença da descontinuidade expande-se por uma região considerável da tubulação. Este fenômeno pode ser observado de forma mais radical conforme o tamanho da descontinuidade aumenta, Figura 4.7.

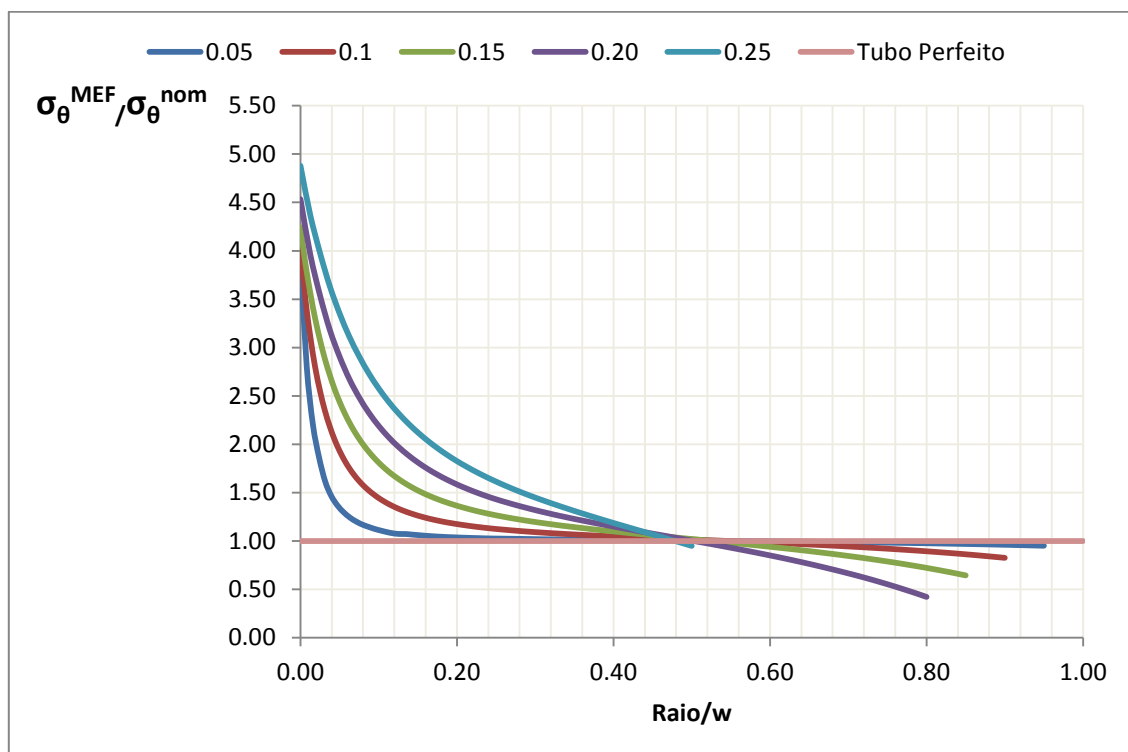


**Figura 4.7:** Ilustração da análise de distribuição de tensão tangencial considerando  $a/w = 0,25$  - MEF.

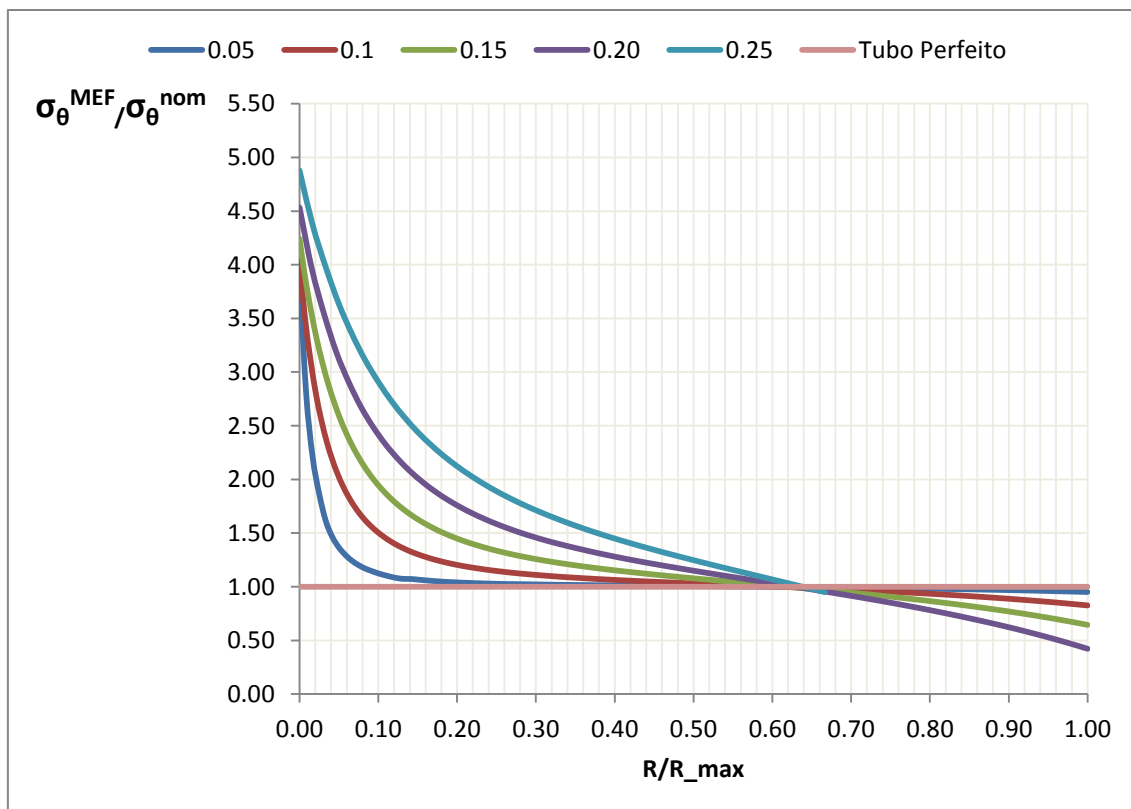
As Figuras 4.6 e 4.7 representam os modelos das análises numéricas e a perturbação no campo de tensão devido à presença da descontinuidade em ambos os casos. É importante ressaltar que um defeito muito pequeno em relação à geometria (Figura 4.6) não é simples de ser representado, uma vez que requer malha altamente refinada, disponibilizando de mais tempo e de maior capacidade de memória dos computadores para obtenção de soluções aceitáveis. Maiores razões de defeito, Figura 4.7, permitem um menor refinamento de malha o que facilita o estudo, devido a limitação de memória RAM e capacidade de processamento dos computadores disponíveis.

Quando se tem em um mesmo modelo regiões muito refinada e grosseira, pode-se correr o risco da solução não convergir. Contudo, é necessário refinar também as regiões adjacentes, o que implica no aumento do número de nós do modelo, necessitando, portanto, de computadores mais sofisticados, com maior capacidade de memória RAM, para fornecimento de resultados mais precisos.

A Figura 4.8 representa a distribuição de tensão tangencial ao longo do raio da tubulação para cada uma das 5 razões de  $a/w$ :



(a)



(b)

**Figura 4.8:** (a) Distribuição de tensão tangencial ao longo da espessura da tubulação em componentes com diferentes descontinuidades. (b) Distribuição da tensão tangencial adimensionalizada em componentes com diferentes descontinuidades.

As curvas do gráfico da Figura 4.8 são similares e representam o efeito da concentração de tensão sobre a distribuição de tensão ao longo da linha normal ao reparo. Na origem da abscissa, a face interna (fundo do entalhe) representa o valor do concentrador de tensão e a linha subsequente representa a severidade da concentração de tensão atuante na região. O gráfico (a) mostra a adimensionalização de cada curva em relação à espessura nominal de parede do tubo, ou seja, considerando a espessura de um tubo íntegro. O gráfico (b) mostra a adimensionalização em relação as espessuras residuais de parede de cada caso. Por esse motivo o valor máximo da abscissa é 1. Essa adimensionalização foi feita a fim de comparação entre as curvas dos casos estudados. Como pode ser observado, quanto maior é a razão  $a/w$ , maior o valor do concentrador de tensão presente no duto.

É importante ressaltar que foi realizada a simulação da distribuição de tensão para dois casos de descontinuidades no tubo alterando as propriedades do aço estudado, AISI 316L, para um aço estrutural convencional, o SAE 1040, e não foi detectada alteração significativa nas análises estudadas. As diferenças encontradas foram inferiores a 0,2%

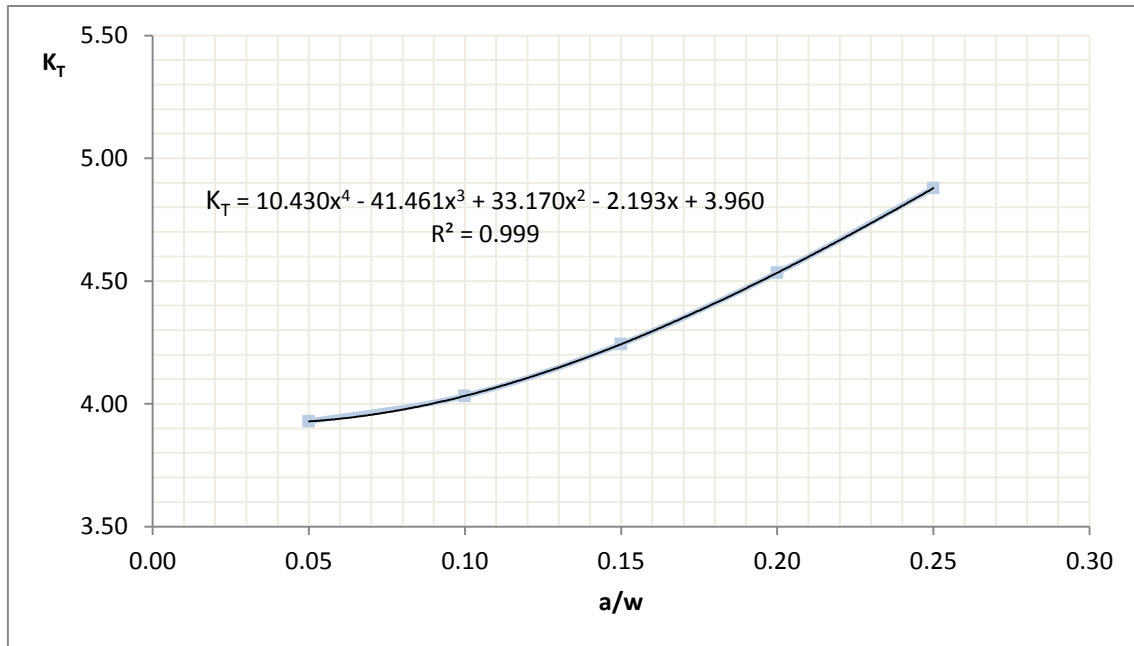
Diversos problemas relacionados a refinamento de malha foram encontrados ao longo do estudo disponibilizando-se de muito tempo para alcance de resultados satisfatórios. Certos instantes o modelo estudado apresentava excesso de número de nós (malha altamente refinada) e o problema não convergia. Já em outros momentos, o número insuficiente de nós (malha pouco refinada) não permitia a obtenção de coerência de resultados. A questão de refinamento de malha, portanto, foi o que demandou muito tempo para conclusão do estudo da tubulação sujeita à pressão interna.

Os cálculos da Figura 4.8 podem ser verificados no apêndice III deste trabalho.

#### **4.1.2.1.2 Avaliação do Concentrador de Tensão Devido a Pressão Interna**

A Figura 4.9 representa o comportamento do concentrador de tensão com a variação progressiva da razão  $a/w$ . O gráfico ilustra a expressão que melhor representa o concentrador de tensão devido às tensões mecânicas para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação. O mesmo foi confeccionado considerando as máximas tensões tangenciais encontradas em cada uma das 5 variações de  $a/w$ . Para que seja possível calcular com maior facilidade os valores intermediários, foi feito um processo de *curve-fitting* empregando-se o Método de Mínimos Quadrados Não Linear, normalmente utilizado em MEF para aproximar curvas. O *curve-fitting* resultou em um polinômio facilitando o cálculo dos valores intermediários.

Para esta análise foi utilizado um polinômio de 4<sup>a</sup> ordem porque foi o que apresentou  $R^2$  mais próximo de 1 (vide Figura 4.9), indicando que este é o grau que melhor representa o fenômeno estudado.



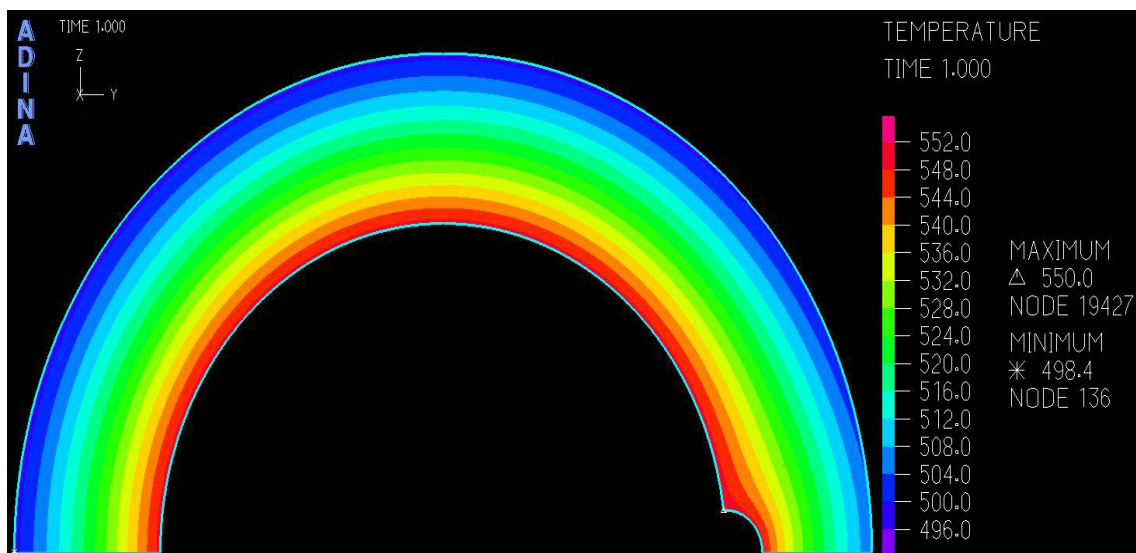
**Figura 4.9:** Expressão do concentrador de tensão devido as tensões mecânicas para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação.

Os cálculos da Figura 4.9 podem ser verificados no apêndice IV no final deste trabalho.

#### 4.1.2.2 Estudo Devido ao Gradiente de Temperatura – MEF

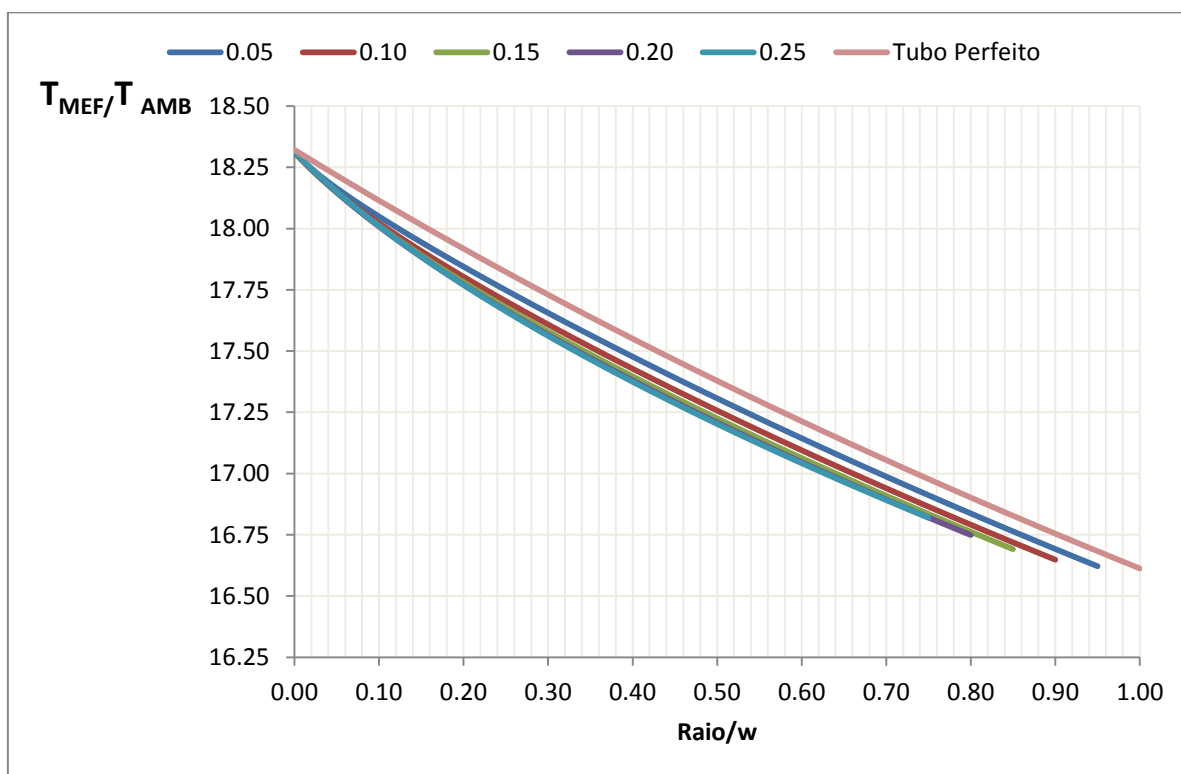
Foi considerada a tubulação submetida a um fluido quente,  $T_i = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ , em seu interior representado pelo coeficiente de convecção  $h$ , e, externamente, foi considerado temperatura ambiente,  $T_o = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Assim como no caso de pressão, também foram estudadas 5 razões de  $a/w$  para avaliação dos gradientes de temperatura.

A Figura 4.10 ilustra a distribuição de temperatura ao longo do raio da tubulação para a razão de  $a/w = 0,25$ . Neste caso, a convecção controla as temperaturas nas paredes da tubulação.



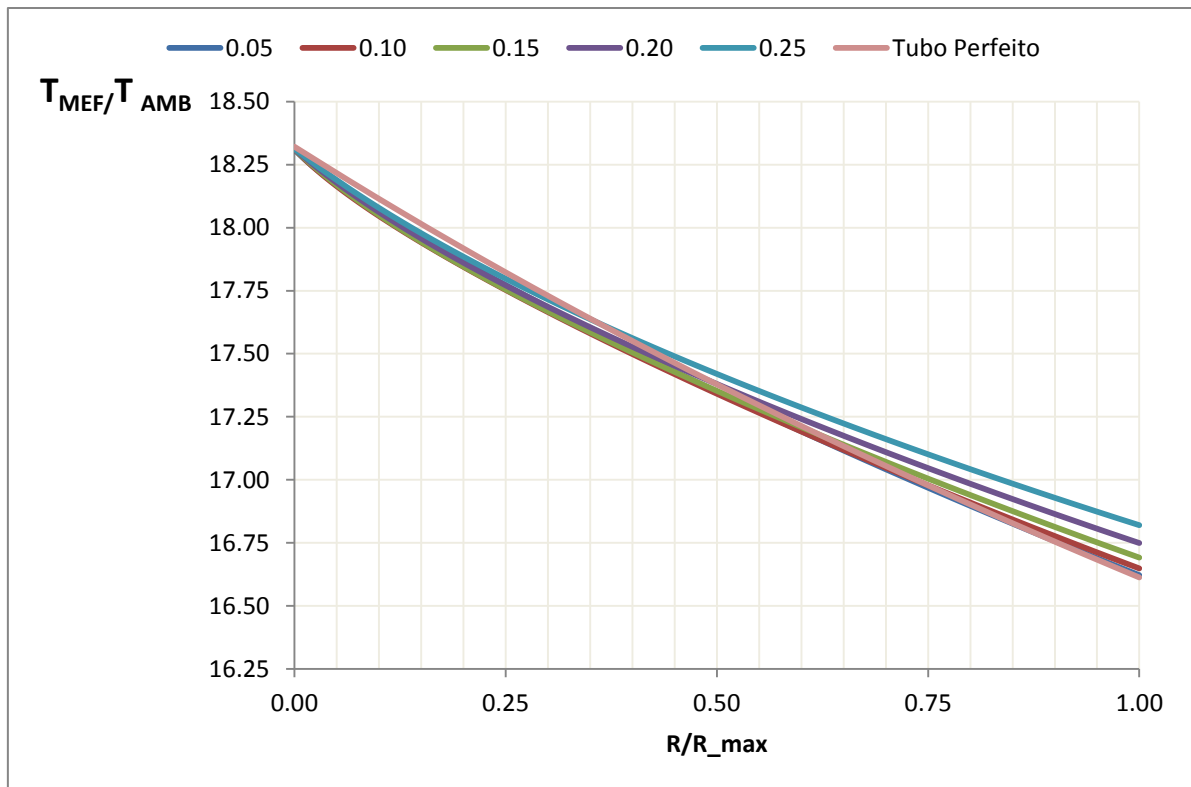
**Figura 4.10:** Ilustração da análise de distribuição de temperatura considerando  $a/w = 0,25$  - MEF.

A Figura 4.11 representa a distribuição de temperatura ao longo do raio da tubulação para cada uma das 5 razões de  $a/w$ :



(a)





(b)

**Figura 4.11:** (a) Distribuição de temperatura ao longo da espessura da tubulação em componentes com diferentes descontinuidades. (b) Distribuição de temperatura adimensionalizada em tubos com diferentes descontinuidades.

Os gráficos da Figura 4.11 são similares. Assim como no estudo devido a pressão, o gráfico (a) mostra a adimensionalização das curvas em relação a espessura nominal de parede do tubo, ou seja, considerando a espessura de um tubo íntegro. O gráfico (b) mostra a adimensionalização em relação as espessuras residuais de parede de cada caso. Em relação as temperaturas, os valores foram adimensionalizados tendo como referência a temperatura ambiente. Essa adimensionalização foi feita a fim de comparação entre as curvas, pois, elas permitem melhor compreensão dos resultados obtidos.

O eixo da abscissa apresenta a posição relativa onde a origem é a raiz do entalhe e a unidade representa a espessura residual da parede do tubo (Figura 4.11 (b)). A medida em que a profundidade do dano tornava-se maior, reduzia-se os gradientes de temperatura, o que já era esperado, já que o gradiente é menor onde se tem parede mais fina (Incropera, 1990).

A determinação dos coeficientes de convecção,  $h$ , se deve ao fato de consulta a valores típicos em ambientes industriais para o estudo em questão e que são apresentados na referência bibliográfica (Incropera, 1990).

É importante ressaltar que para avaliação de distribuição de temperatura no componente, as malhas necessitaram de um menor número de refinamentos se comparado ao estudo devido a pressão interna.

Os cálculos realizados para confecção da Figura 4.11 podem ser encontrados no apêndice V no final deste trabalho.

#### 4.1.2.2.1 Tensões Térmicas - Tensão Tangencial – MEF

A variação de temperatura entre os meios interno ( $T_i = 550\text{ }^\circ\text{C}$ ) e externo ( $T_o = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ) da tubulação provocada pela presença do fluido quente no interior do tubo, gerou as chamadas tensões térmicas no componente.

Assim como no caso de pressão, também foram estudadas 5 razões de  $a/w$  para avaliação das tensões térmicas.

**Tabela 4.1:** Avaliação das tensões térmicas.

<b>Tubo – 8 cm</b>				
<b>a/w</b>	<b>Pico de tensão (Sigma_P1) do tubo defeituoso - Pa (t=15s)</b>	<b>Tensão estabilizada do tubo defeituoso (Sigma_P1) - Pa (t=infinito)</b>	<b>Tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura total de 8 cm) - Pa (t=infinito)</b>	<b>Tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura residual de cada defeito) - Pa (t=infinito)</b>
0.05	32540000.00	16614800.00	16175000.00	15420000.00
0.10	34730000.00	17710300.00	16175000.00	14670000.00
0.15	37700000.00	19206400.00	16175000.00	13910000.00
0.20	41170000.00	20930000.00	16175000.00	13140000.00
0.25	44750000.00	22720000.00	16175000.00	12360000.00

É importante ressaltar que o pico de tensão, regime transiente, já era esperado, conforme foi mostrado na seção 2.3.5.

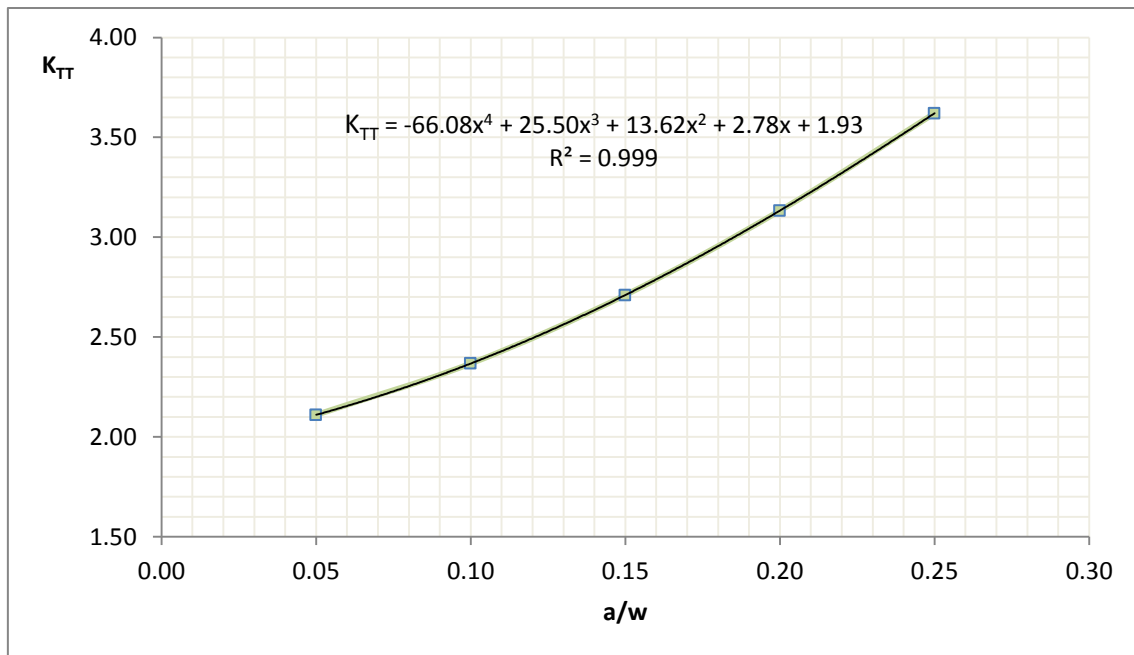
A técnica utilizada nesta análise foi inserir, gradativamente, pequenos incrementos de tempo a fim de verificar o ponto de transição onde a tensão parava de aumentar sucessivamente e começava a diminuir. Enquanto a tensão ( $\sigma_{\theta_T}$ ) aumentava, o  $K_{TT}$  também aumentava, conforme pode ser verificado pela equação 16. O ponto de transição representa, portanto, o  $K_{TT}^{máx}$  (Figura 2.11) que era o valor desejado. Após a obtenção da máxima tensão térmica, as demais tensões tendiam a diminuir com o passar do tempo atingindo a estabilidade no regime permanente. Esse mecanismo foi realizado para cada uma das 5 razões de  $a/w$  a fim de se obter o valor do concentrador de tensão térmico transiente máximo em cada caso.

O estudo da tubulação sujeita à alta temperatura, ou seja, a verificação da parte térmica do problema, foi a que demandou mais tempo para o alcance dos resultados, uma vez que os sucessivos incrementos de tempo eram muito pequenos, exigindo grande quantidade de análises até a obtenção do resultado desejado para cada um dos cinco casos.

Os cálculos realizados para confecção da tabela 4.1 podem ser encontrados no apêndice VI no final deste trabalho. Os dados da tabela anterior correspondem às máximas tensões encontradas em cada caso.

#### **4.1.2.2.2 Avaliação do Concentrador de Tensão Devido ao Gradiente de Temperatura / Tensões Térmicas**

A Figura 4.12 ilustra a expressão que melhor representa o concentrador de tensão devido às tensões térmicas para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação. Esse gráfico foi confeccionado considerando as máximas tensões térmicas tangenciais encontradas em cada uma das 5 variações de  $a/w$ .



**Figura 4.12:** Expressão do concentrador de tensão devido às tensões térmicas para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação.

A análise do concentrador de tensão devido às tensões térmicas com a variação progressiva da razão  $a/w$  foi realizada adotando o mesmo método utilizado para avaliação do concentrador de tensão devido às tensões mecânicas. Foi feito um processo de *curve-fitting* empregando-se o Método de Mínimos Quadrados Não Linear, normalmente utilizado em MEF para aproximar curvas.

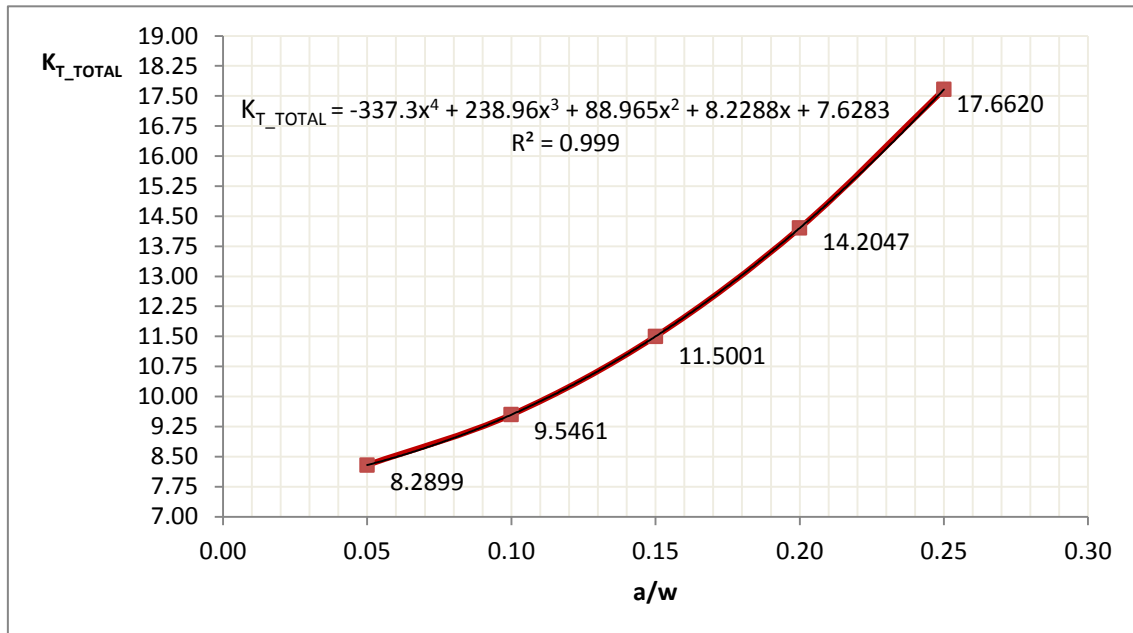
Os cálculos da Figura 4.12 podem ser verificados no apêndice VII.

#### 4.1.2.3 Avaliação do Concentrador Total de Tensão

Conforme foi verificado na seção 2.3.5 do presente trabalho, o concentrador total de tensão de um componente corresponde a multiplicação dos concentradores de tensão atuantes no mesmo.

A Figura 4.13 ilustra o concentrador total de tensão avaliado durante os períodos críticos de funcionamento do equipamento, ou seja, nos momentos de

partida e parada do componente. Os cálculos foram feitos para reparos semicirculares na faixa de 0.05 até 0.25 da espessura da parede da tubulação.



**Figura 4.13:** Expressão do concentrador total de tensão para reparos semicirculares na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação.

Os cálculos da Figura 4.13 podem ser verificados no apêndice VIII.

#### 4.1.2.4 Utilização dos Concentradores de Tensão

Normalmente, a máxima tensão tangencial é fornecida pelo fabricante do equipamento para diversas faixas de temperatura de trabalho. Esse valor máximo deverá ser comparado com a tensão de trabalho do componente. No entanto, em caso de tubulação com descontinuidade, o concentrador de tensão deve ser aplicado juntamente com a tensão de trabalho da peça.

Para um processo de partida e de parada do equipamento do qual trata este trabalho, tem-se às chamadas, tensões térmicas transientes, além das tensões mecânicas ocasionadas pela presença de pressão interna na

tubulação. Logo, a tensão de trabalho adotada para uma tubulação danificada, neste caso, deverá ser  $\sigma_{\text{trabalho}} \times (K_{T\_TOTAL})$ , que, por sua vez, deverá ser menor que a máxima tensão tangencial do fabricante. Desta forma, conclui-se o limite máximo de pressão que deve ser adotado no vaso de pressão.

Durante o processo de funcionamento contínuo, ou melhor, de estabilização do equipamento, tem-se um regime de tensão térmica permanente, além das tensões mecânicas atuando no tubo. No entanto, como no regime permanente, as tensões térmicas são inferiores às do regime transiente, por questão de segurança, o cálculo do concentrador total de tensão é feito considerando o concentrador de tensão térmico transiente juntamente com o concentrador de tensão mecânica.

Na prática, por normas de segurança, recupera-se, no máximo, um defeito de até 25% na espessura de uma tubulação.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

O estudo em questão permitiu obter as seguintes conclusões:

- O método de elementos finitos permitiu avaliar, além das tensões térmicas e mecânicas no componente, a perturbação no campo de tensão originada pela presença da descontinuidade na tubulação.
- Foi possível determinar uma expressão polinomial que descreve os valores dos concentradores de tensão transientes térmicos para os reparos semicirculares de  $a/w$  na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação. Esses concentradores de tensão são de suma importância, uma vez que podem ocasionar falhas catastróficas no vaso de pressão durante o processo de ligamento/desligamento do equipamento (choque térmico).
- Foi possível determinar uma expressão polinomial que descreve os valores dos concentradores totais de tensão devido às tensões mecânicas e térmicas para os reparos semicirculares de  $a/w$  na faixa de 0,05 até 0,25 da espessura da parede da tubulação. Este intervalo permite, com segurança, todo e qualquer reparo possível de ser feito em peças desta natureza.
- Para menores profundidades de dano na tubulação, as malhas necessitaram cada vez mais de sucessivos refinamentos a fim de se alcançar resultados satisfatórios. A presença de descontinuidades com tamanhos cada vez menores em relação ao equipamento gerou gradientes de tensão cada vez mais agressivos necessitando de refinamentos cada vez maiores, quanto menores eram os entalhes.
- Foi avaliada a simulação da distribuição de tensão para dois casos de descontinuidades no tubo alterando as propriedades do aço estudado, AISI 316L, para um aço estrutural convencional, SAE 1040, e não foi detectado alteração significativa nas análises estudadas. Constatou-se que as diferenças foram inferiores a 0,2%.

- Cada caso foi avaliado separadamente e observou-se que para a avaliação de distribuição de temperatura no componente, as malhas necessitaram de um menor número de refinamentos se comparado ao estudo devido à pressão interna.
- O formato do entalhe, quando aumentava de profundidade, reduzia os gradientes de temperatura, uma vez que a espessura do componente tornava-se cada vez menor.



## **CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Seguem abaixo sugestões de trabalhos futuros:

- Suavização dos entalhes e reavaliação dos concentradores de tensão.
- Avaliação do uso de isolamento térmico na tubulação para minimizar os efeitos de troca de calor entre os meios interno e externo do tubo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Gahtani H., Khathlan A., Sunar M., Naffa'a M. (2014) Local pressure testing of spherical vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 114-115v, 61-68p.

Alian, A. R., Shazly M., Megahed M. M. (2016) 3D finite element modeling of in-service sleeve repair welding of gas Pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 146v, 216-229p.

Asemi, K., Salehi, M., Akhlaghi, M. (2014) Transient thermal stresses in functionally graded thick truncated cones by graded finite element method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 119v, 52-61p.

Boley, B. A., Weiner, J. H. (1985) *Theory of Thermal Stresses*. Ed. Krieger. Columbia University Institute of Flight Structure.

Boniatti, D. L., Iturrioz, I. (2003) *Análise do Comportamento de Fadiga para Estruturas Submetidas a Temperaturas Elevadas Aliadas a Esforços Cíclicos*. Brasil: UFRGS.

Branco, M., Carlos A. G., Fernandes, A., Castro, P. M. S. T. (1986) *Fadiga de Estruturas Soldadas*. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Budynas, R. G. (1977) *Advanced Strength and Applied Stress Analysis*. McGraw-Hill.

Budynas, Richard G., Nisbett, J. Keith. (2011) *Elementos de Máquinas de Shigley*. McGraw-Hill.

Bueckner, H.F. (1970) A novel principle for the computation of the stress intensity factors. *ZAMM*, 50v, 529-546p.

Callister, W. D. Jr. (2008) *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 7 ed. LTC.

Carvalho, E. A. (1992) *Determinação de Fatores de Intensificação e Concentração de Tensões para Entalhes do Tipo "V"*. Dissertação, Brasil: PUC-RJ.

Carvalho, E. A. (1997) *Characterization of the Effect of Severe Environment on Advanced Materials*. Tese - Texas - USA, Texas A&M University.

Carvalho, C. V. (1999) *Simulação Bidimensional Adaptativa de Processos de Fraturamento por Fadiga*. Computational Methods in Engineering.

Carvalho, E.A. (2005) Stress concentration factors for an internally pressurized circular vessel containing a radial U-notch. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 82v, 517–521p.

Carvalho, E. A., Burger C.P., Chona R. (2005) *Transient Thermal Stress Intensity Factor For An Edge-Cracked Circular Disk*. Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, 77843-3123, USA.

Castro, J. T. P., Meggiolaro, M. A. (2009) *Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço*. Vol. I e II.

Chen, X., Chen, Xu, Yu, D., Gao, B. (2013) Recent progresses in experimental investigation and finite element analysis of ratcheting in pressurized piping. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 101v, 113-142p.

Choi, W., Fujiyama, K., Kim, B., Song, G. (2012) Development of thermal stress concentration factors for life assessment of turbine casings. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98v, 1-7p.

Cimini JR., Carlos A. (2001) Conceitos de Análise Estrutural em Aeronaves. Brasil: UFMG.

Depradeux, L. (2004) Simulation Numerique du Soudage – Acier 316L – Validation sur Cas Tests de Complexite Croissante. Tese de Doutorado. Ecole Doctorale des Sciences de L'Ingénieur de Lyon. L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon.

Favorit Aços Especiais. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br>>. Acesso em 11 de junho de 2018.

Fett, T. (2001) Stress intensity factors and t-stress for internally cracked circular disks under various boundary conditions. Engineering Fracture Mechanics, 68v, 1119-1136p.

Fillery, B. P., Hu, X. Z. (2010) Compliance based assessment of stress intensity factor in cracked hollow cylinders with finite boundary restraint: Application to thermal shock part I. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 77v, 2662-2681p.

Fish, J., Belytschko, T. (2009) Um Primeiro Curso em Elementos Finitos. LTC, Rio de Janeiro.

Gentil, V. (2007) Corrosão. 5 ed., LTC, Rio de Janeiro.

Gere, J. M. (2003) Mecânica dos Materiais. Ed. Thomson, São Paulo.

Grupo Elinox de Aço Inoxidável. Disponível em: <<http://www.elinox.com.br/categoria/tubos/>>. Acesso em 15 de junho de 2018.

Hibbeler, R. C. (2004) Resistência dos Materiais. 5 ed., LTC, São Paulo.

Hibbeler, R. C. (2010) Resistência dos Materiais. 7 ed., Pearson, São Paulo.

Incropera, F.P., De Witt, P. (1990) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3 ed., Wiley.

Introdução ao Método dos Elementos Finitos. (2004) Programa de Engenharia Civil - COPPE / UFRJ, Notas de aula do Prof. Fernando L. B. Ribeiro.

Ishida, M. A., Reguly, A. (2009) Avaliação Comparativa de Barras Laminadas do Aço AISI 316L Com e Sem Tratamento Térmico de Solubilização. Brasil: UFRGS.

Jorge, N. R. M., Dinis, L. M. J. S. (2004/2005) Teoria da Plasticidade. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto - Portugal.

Kim, Y.W., Lee, H.Y., and Yoo, B. (1994) Numerical evaluation of stress intensity factor for vessel and pipe subjected to thermal shock. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 58v, 215-222p.

Kim Y.W., Kim, D.O., Lee, J.S., Choi, S., Zee, S.Q. (2005) Thermal-mechanical simulation for nozzle header of once-through steam generator by experiment and finite element method. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 82v, 602-609p.

Li,J., Song, F., Jiang, C. (2015) A non-local approach to crack process modeling in ceramic materials subjected to thermal shock. Engineering Fracture Mechanics, 133v, 85-98

Liu, M.S., Dong, Q.W., Wang, D.B., Ling, X. (1999) Numerical simulation of thermal stress in tube-sheet of heat transfer equipment. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 76v, 671-675p.

Lu, Y.L., Zhang, S.J., Huang, X.P., Huang, J. (2003) Determination of Histories of SIF Distributions for Axial Semi-Elliptical Surface Cracks in Hollow. Cylinders Subjected to Thermal Shock. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 80v, 167-178p.

McCready J. R., Knofczynski M., Keller M. W. (2017) Survivability of composite repairs of piping subjected to flexural loads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 152v, 7-14p.

Megyesy, E.F. (2001) *Pressure Vessel Handbook*. Pressure Vessel Handbook Pub., 12 ed.

Oh, C., Kim, Y., Yoon, K. (2010) Elastic-plastic behaviours of pressurised tubes under cyclic thermal stresses with temperature gradients. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87v, 245-253p.

Oliveira, R., Wu, X.R. (1987) Stress intensity factors for axial cracks in hollow cylinders subjected to thermal shock. *Engineering Fracture Mechanics*, 27v, 185-197p.

Pilkey W.D. (1997) *Peterson's Stress Concentration Factors*. 2 ed., Wiley Interscience.

Radu, V., Taylor, N., Paffumi, E. (2008) Development of new analytical solutions for elastic thermal stress components in a hollow cylinder under sinusoidal transient thermal loading. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85v, 885-893p.

Rice, J.R. (1972) Some remarks on elastic crack-tip stress fields. *International Journal of Solids and Structures*, 8v, 751-758p.

SENAI-RJ (2012) *Aços Alta Liga Resistentes a Fluência e ao Calor*. Módulo Materiais. Disciplina: Aços para Alta Temperatura. Programa de Pós Graduação. Notas de aula do Prof. Paulo Roberto O. Emydio.

Shigley, J.E. (1970) *Mechanical Engineering Design*. First Metric ed., McGraw-Hill.

SINMEC EMC-UFSC. (2018) Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor. Disponível em: <<http://www.sinmec.ufsc.br/site/>>. Acesso em 26 de maio de 2018.

Timoshenko, S.P., Goodier, J.N. (1982) Theory of Elasticity. International Student ed., McGraw-Hill.

UNIOESTE (2009) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Foz do Iguaçu – SC. Centro de Engenharias e Ciências Exatas – CECE. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Notas de aula do Prof. Dr. Samuel da Silva.

Uslu, M., Demir, O., Ayhan, A. (2014) Surface cracks in finite thickness plates under thermal and displacement-controlled loads – Part 1: Stress intensity factors. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 115v, 284-295p.

Vicente, W. M. (2009) Análise de Tensões em Placas Circulares Utilizando Elementos Finitos Axissimétricos. Brasil: UNIFEI.

Xu, R.X., Wu, X.R. (1989) A weight function approach to stress intensity factors for half-elliptical surface cracks in cylindrical pressure vessels subjected to thermal shock. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 39v, 375-391p.

## APÊNDICE

### APÊNDICE I

#### Tubo Perfeito: Estudo Devido a Pressão - Tensão Tangencial - Figura 4.2.

MEF		EQUAÇÃO 11 (sigma $\Theta$ )		Kt (MEF)	ERRO%
Distância (m)	Sigma P1 (MPa)	Raio (m)	Sigma $\Theta$ (MPa)	Sigma P1 (MEF)/ Sigma $\Theta$ (Equação)	
0.00E+00	2.54E+03	1.55E-01	2540.064103	0.999981931	1.81E-03
1.00E-03	2.52E+03	1.56E-01	2517.444117	1.000005608	-5.61E-04
2.00E-03	2.50E+03	1.57E-01	2495.254983	0.999981959	1.80E-03
3.00E-03	2.47E+03	1.58E-01	2473.485826	1.000006398	-6.40E-04
4.00E-03	2.45E+03	1.59E-01	2452.126115	0.999982104	1.79E-03
5.00E-03	2.43E+03	1.60E-01	2431.165646	1.000006436	-6.44E-04
6.00E-03	2.41E+03	1.61E-01	2410.594531	0.999981138	1.89E-03
7.00E-03	2.39E+03	1.62E-01	2390.403185	1.000005516	-5.52E-04
8.00E-03	2.37E+03	1.63E-01	2370.582318	0.999984105	1.59E-03
9.00E-03	2.35E+03	1.64E-01	2351.122921	1.000005496	-5.50E-04
1.00E-02	2.33E+03	1.65E-01	2332.016258	0.999981243	1.88E-03
1.10E-02	2.31E+03	1.66E-01	2313.253855	1.00000599	-5.99E-04
1.20E-02	2.29E+03	1.67E-01	2294.827491	0.999981477	1.85E-03
1.30E-02	2.28E+03	1.68E-01	2276.72919	1.000004036	-4.04E-04
1.40E-02	2.26E+03	1.69E-01	2258.951208	0.999982828	1.72E-03
1.50E-02	2.24E+03	1.70E-01	2241.486032	1.000007152	-7.15E-04
1.60E-02	2.22E+03	1.71E-01	2224.326365	0.999984879	1.51E-03
1.70E-02	2.21E+03	1.72E-01	2207.465124	1.000006851	-6.85E-04
1.80E-02	2.19E+03	1.73E-01	2190.895429	0.999984221	1.58E-03
1.90E-02	2.17E+03	1.74E-01	2174.610596	1.000004873	-4.87E-04
2.00E-02	2.16E+03	1.75E-01	2158.604134	0.999983385	1.66E-03
2.10E-02	2.14E+03	1.76E-01	2142.869733	1.000004542	-4.54E-04
2.20E-02	2.13E+03	1.77E-01	2127.401263	0.999986492	1.35E-03
2.30E-02	2.11E+03	1.78E-01	2112.192764	1.000006043	-6.04E-04
2.40E-02	2.10E+03	1.79E-01	2097.238444	0.999984954	1.50E-03
2.50E-02	2.08E+03	1.80E-01	2082.53267	1.000006084	-6.08E-04
2.60E-02	2.07E+03	1.81E-01	2068.069963	0.999985476	1.45E-03
2.70E-02	2.05E+03	1.82E-01	2053.844998	1.000002433	-2.43E-04
2.80E-02	2.04E+03	1.83E-01	2039.85259	0.999986563	1.34E-03
2.90E-02	2.03E+03	1.84E-01	2026.0877	1.0000038	-3.80E-04
3.00E-02	2.01E+03	1.85E-01	2012.54542	0.999987787	1.22E-03
3.10E-02	2.00E+03	1.86E-01	1999.220976	1.00000549	-5.49E-04
3.20E-02	1.99E+03	1.87E-01	1986.109721	0.99998979	1.02E-03
3.30E-02	1.97E+03	1.88E-01	1973.207131	1.000003614	-3.61E-04



3.40E-02	1.96E+03	1.89E-01	1960.508803	0.999989188	1.08E-03
3.50E-02	1.95E+03	1.90E-01	1948.010446	1.000005362	-5.36E-04
3.60E-02	1.94E+03	1.91E-01	1935.707883	0.999988575	1.14E-03
3.70E-02	1.92E+03	1.92E-01	1923.597048	1.000003664	-3.66E-04
3.80E-02	1.91E+03	1.93E-01	1911.673975	0.999986387	1.36E-03
3.90E-02	1.90E+03	1.94E-01	1899.934805	1.000002529	-2.53E-04
4.00E-02	1.89E+03	1.95E-01	1888.375773	0.999987171	1.28E-03
4.10E-02	1.88E+03	1.96E-01	1876.993214	1.000001712	-1.71E-04
4.20E-02	1.87E+03	1.97E-01	1865.783553	0.999991185	8.81E-04
4.30E-02	1.85E+03	1.98E-01	1854.743306	1.000001782	-1.78E-04
4.40E-02	1.84E+03	1.99E-01	1843.869076	0.999988652	1.13E-03
4.50E-02	1.83E+03	2.00E-01	1833.157552	1.00000412	-4.12E-04
4.60E-02	1.82E+03	2.01E-01	1822.605503	0.999992046	7.95E-04
4.70E-02	1.81E+03	2.02E-01	1812.20978	0.999999878	1.22E-05
4.80E-02	1.80E+03	2.03E-01	1801.967309	0.999987408	1.26E-03
4.90E-02	1.79E+03	2.04E-01	1791.875093	1.000002842	-2.84E-04
5.00E-02	1.78E+03	2.05E-01	1781.930208	0.999988893	1.11E-03
5.10E-02	1.77E+03	2.06E-01	1772.129799	1.00000553	-5.53E-04
5.20E-02	1.76E+03	2.07E-01	1762.471082	0.999989266	1.07E-03
5.30E-02	1.75E+03	2.08E-01	1752.951338	1.000000763	-7.63E-05
5.40E-02	1.74E+03	2.09E-01	1743.567914	0.999993068	6.93E-04
5.50E-02	1.73E+03	2.10E-01	1734.31822	1.00000474	-4.74E-04
5.60E-02	1.73E+03	2.11E-01	1725.199726	0.999994045	5.96E-04
5.70E-02	1.72E+03	2.12E-01	1716.209962	0.999999978	2.20E-06
5.80E-02	1.71E+03	2.13E-01	1707.346518	0.999992103	7.90E-04
5.90E-02	1.70E+03	2.14E-01	1698.607037	1.000004143	-4.14E-04
6.00E-02	1.69E+03	2.15E-01	1689.989218	0.99999362	6.38E-04
6.10E-02	1.68E+03	2.16E-01	1681.490814	1.000000484	-4.84E-05
6.20E-02	1.67E+03	2.17E-01	1673.109628	0.999993801	6.20E-04
6.30E-02	1.66E+03	2.18E-01	1664.843516	1.000002112	-2.11E-04
6.40E-02	1.66E+03	2.19E-01	1656.690379	0.999994192	5.81E-04
6.50E-02	1.65E+03	2.20E-01	1648.648168	1.000004954	-4.95E-04
6.60E-02	1.64E+03	2.21E-01	1640.71488	0.999990785	9.22E-04
6.70E-02	1.63E+03	2.22E-01	1632.888557	1.00000524	-5.24E-04
6.80E-02	1.63E+03	2.23E-01	1625.167285	0.999992176	7.82E-04
6.90E-02	1.62E+03	2.24E-01	1617.549192	0.9999995	5.00E-05
7.00E-02	1.61E+03	2.25E-01	1610.032447	0.999995309	4.69E-04
7.10E-02	1.60E+03	2.26E-01	1602.615261	1.000003283	-3.28E-04
7.20E-02	1.60E+03	2.27E-01	1595.295884	0.999991152	8.85E-04
7.30E-02	1.59E+03	2.28E-01	1588.072603	1.000001639	-1.64E-04
7.40E-02	1.58E+03	2.29E-01	1580.943743	0.999996042	3.96E-04
7.50E-02	1.57E+03	2.30E-01	1573.907666	1.000004871	-4.87E-04
7.60E-02	1.57E+03	2.31E-01	1566.962769	0.999995385	4.61E-04
7.70E-02	1.56E+03	2.32E-01	1560.107483	1.000004796	-4.80E-04
7.80E-02	1.55E+03	2.33E-01	1553.340273	0.999993738	6.26E-04
7.90E-02	1.55E+03	2.34E-01	1546.659636	0.999999765	2.35E-05

8.00E-02 1.54E+03 2.35E-01 1540.064103

0.999996171

3.83E-04

**Tubo Perfeito: Estudo Devido a Pressão - Tensão Radial - Figura 4.3.**

MEF		EQUAÇÃO 12 (sigma R)		ERRO%
Distância (m)	Sigma P3(MPa)	Raio (m)	Sigma R (MPa)	
0.00E+00	-999.82	1.55E-01	-1000	-1.80E-02
1.00E-03	-9.78E+02	1.56E-01	-977.3800145	1.58E-02
2.00E-03	-9.55E+02	1.57E-01	-955.19088	-1.82E-02
3.00E-03	-9.34E+02	1.58E-01	-933.4217234	1.57E-02
4.00E-03	-9.12E+02	1.59E-01	-912.0620127	-1.80E-02
5.00E-03	-8.91E+02	1.60E-01	-891.1015437	1.56E-02
6.00E-03	-8.70E+02	1.61E-01	-870.5304283	-1.76E-02
7.00E-03	-8.50E+02	1.62E-01	-850.3390824	1.56E-02
8.00E-03	-8.30E+02	1.63E-01	-830.5182153	-1.80E-02
9.00E-03	-8.11E+02	1.64E-01	-811.0588184	1.56E-02
1.00E-02	-7.92E+02	1.65E-01	-791.9521556	-1.78E-02
1.10E-02	-7.73E+02	1.66E-01	-773.1897528	1.57E-02
1.20E-02	-7.55E+02	1.67E-01	-754.7633889	-1.77E-02
1.30E-02	-7.37E+02	1.68E-01	-736.665087	1.57E-02
1.40E-02	-7.19E+02	1.69E-01	-718.8871053	-1.74E-02
1.50E-02	-7.02E+02	1.70E-01	-701.4219291	1.55E-02
1.60E-02	-6.84E+02	1.71E-01	-684.2622626	-1.83E-02
1.70E-02	-6.68E+02	1.72E-01	-667.4010217	1.56E-02
1.80E-02	-6.51E+02	1.73E-01	-650.8313264	-1.80E-02
1.90E-02	-6.35E+02	1.74E-01	-634.5464938	1.57E-02
2.00E-02	-6.18E+02	1.75E-01	-618.5400314	-1.80E-02
2.10E-02	-6.03E+02	1.76E-01	-602.8056305	1.58E-02
2.20E-02	-5.87E+02	1.77E-01	-587.3371604	-1.79E-02
2.30E-02	-5.72E+02	1.78E-01	-572.1286618	1.60E-02
2.40E-02	-5.57E+02	1.79E-01	-557.1743415	-1.82E-02
2.50E-02	-5.43E+02	1.80E-01	-542.468567	1.61E-02
2.60E-02	-5.28E+02	1.81E-01	-528.0058606	-1.83E-02
2.70E-02	-5.14E+02	1.82E-01	-513.780895	1.62E-02
2.80E-02	-5.00E+02	1.83E-01	-499.7884878	-1.87E-02
2.90E-02	-4.86E+02	1.84E-01	-486.0235971	1.65E-02
3.00E-02	-4.72E+02	1.85E-01	-472.4813171	-1.87E-02
3.10E-02	-4.59E+02	1.86E-01	-459.1568732	1.68E-02
3.20E-02	-4.46E+02	1.87E-01	-446.0456184	-1.90E-02
3.30E-02	-4.33E+02	1.88E-01	-433.1430288	1.68E-02
3.40E-02	-4.20E+02	1.89E-01	-420.4447	-1.94E-02

3.50E-02	-4.08E+02	1.90E-01	-407.946343	1.73E-02
3.60E-02	-3.96E+02	1.91E-01	-395.6437809	-1.99E-02
3.70E-02	-3.84E+02	1.92E-01	-383.5329452	1.75E-02
3.80E-02	-3.72E+02	1.93E-01	-371.6098729	-2.02E-02
3.90E-02	-3.60E+02	1.94E-01	-359.8707023	1.81E-02
4.00E-02	-3.48E+02	1.95E-01	-348.3116708	-2.06E-02
4.10E-02	-3.37E+02	1.96E-01	-336.9291116	1.87E-02
4.20E-02	-3.26E+02	1.97E-01	-325.7194505	-2.10E-02
4.30E-02	-3.15E+02	1.98E-01	-314.6792035	1.90E-02
4.40E-02	-3.04E+02	1.99E-01	-303.8049738	-2.17E-02
4.50E-02	-2.93E+02	2.00E-01	-293.0934495	2.00E-02
4.60E-02	-2.82E+02	2.01E-01	-282.5414007	-2.24E-02
4.70E-02	-2.72E+02	2.02E-01	-272.1456772	2.07E-02
4.80E-02	-2.62E+02	2.03E-01	-261.9032064	-2.26E-02
4.90E-02	-2.52E+02	2.04E-01	-251.8109906	2.10E-02
5.00E-02	-2.42E+02	2.05E-01	-241.8661053	-2.53E-02
5.10E-02	-2.32E+02	2.06E-01	-232.0656967	2.17E-02
5.20E-02	-2.22E+02	2.07E-01	-222.4069795	-2.56E-02
5.30E-02	-2.13E+02	2.08E-01	-212.8872357	2.29E-02
5.40E-02	-2.03E+02	2.09E-01	-203.5038117	-2.69E-02
5.50E-02	-1.94E+02	2.10E-01	-194.2541172	2.41E-02
5.60E-02	-1.85E+02	2.11E-01	-185.1356231	-2.84E-02
5.70E-02	-1.76E+02	2.12E-01	-176.1458597	2.56E-02
5.80E-02	-1.67E+02	2.13E-01	-167.2824152	-3.01E-02
5.90E-02	-1.59E+02	2.14E-01	-158.5429341	2.78E-02
6.00E-02	-1.50E+02	2.15E-01	-149.9251154	-3.21E-02
6.10E-02	-1.41E+02	2.16E-01	-141.4267114	2.99E-02
6.20E-02	-1.33E+02	2.17E-01	-133.0455259	-3.57E-02
6.30E-02	-1.25E+02	2.18E-01	-124.7794131	3.25E-02
6.40E-02	-1.17E+02	2.19E-01	-116.6262759	-3.88E-02
6.50E-02	-1.09E+02	2.20E-01	-108.5840651	3.58E-02
6.60E-02	-1.01E+02	2.21E-01	-100.6507773	-4.35E-02
6.70E-02	-9.29E+01	2.22E-01	-92.82445452	4.05E-02
6.80E-02	-8.51E+01	2.23E-01	-85.10318233	-5.02E-02
6.90E-02	-7.75E+01	2.24E-01	-77.48508903	4.67E-02
7.00E-02	-6.99E+01	2.25E-01	-69.96834441	-5.83E-02
7.10E-02	-6.26E+01	2.26E-01	-62.55115868	5.61E-02
7.20E-02	-5.52E+01	2.27E-01	-55.23178136	-7.06E-02
7.30E-02	-4.80E+01	2.28E-01	-48.00850027	7.04E-02
7.40E-02	-4.08E+01	2.29E-01	-40.87964056	-9.39E-02
7.50E-02	-3.39E+01	2.30E-01	-33.84356369	9.63E-02
7.60E-02	-2.69E+01	2.31E-01	-26.89866651	-1.36E-01
7.70E-02	-2.01E+01	2.32E-01	-20.04338035	1.57E-01
7.80E-02	-1.32E+01	2.33E-01	-13.27617013	-2.71E-01
7.90E-02	-6.63E+00	2.34E-01	-6.595533495	4.57E-01
8.00E-02	3.49E-02	2.35E-01	-1.13869E-13	1.00E-01

**OBSERVAÇÕES:**

1 - raio externo = 0.235 m / raio interno = 0.155 m
2 - $p_i=1000\text{MPa}$
3 - sigma P1 no MEF = tensão tangencial
4 - sigma P3 no MEF = tensão radial
5 - cálculo ao longo da espessura do tubo

## APÊNDICE II

**Tubo Perfeito:** Estudo Devido ao Gradiente de Temperatura - Distribuição de Temperatura na Tubulação Considerando Temperatura Inicial nas Paredes Interna e Externa do Tubo e Considerando a Convecção no Controle da Temperatura –Figura 4.5.

MEF e Equação 14 (Temperatura nas paredes do tubo)	
Raio (m)	T (°C)

Convecção - MEF	
Raio (m)	T (°C)

1	0	5.50E+02	0	5.50E+02
2	5.00E-03	5.10E+02	5.00E-03	5.46E+02
3	1.00E-02	4.72E+02	1.00E-02	5.42E+02
4	1.50E-02	4.35E+02	1.50E-02	5.38E+02
5	2.00E-02	3.98E+02	2.00E-02	5.35E+02
6	2.50E-02	3.63E+02	2.50E-02	5.31E+02
7	3.00E-02	3.29E+02	3.00E-02	5.28E+02
8	3.50E-02	2.96E+02	3.50E-02	5.25E+02
9	4.00E-02	2.63E+02	4.00E-02	5.21E+02
10	4.50E-02	2.32E+02	4.50E-02	5.18E+02
11	5.00E-02	2.01E+02	5.00E-02	5.15E+02
12	5.50E-02	1.71E+02	5.50E-02	5.12E+02
13	6.00E-02	1.41E+02	6.00E-02	5.09E+02
14	6.50E-02	1.12E+02	6.50E-02	5.06E+02
15	7.00E-02	8.43E+01	7.00E-02	5.04E+02
16	7.50E-02	5.69E+01	7.50E-02	5.01E+02
17	8.00E-02	3.00E+01	8.00E-02	4.98E+02

**OBSERVAÇÕES:**

1 - raio externo = 0.235 m / raio interno = 0.155 m
2 - $T_i=550^\circ\text{C}$ / $T_o=30^\circ\text{C}$ / $\Delta T=T_i-T_o=520^\circ\text{C}=520\text{K}$ / $h_e=15$ ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) / $h_i=30000$ ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
3 - cálculo ao longo da espessura do tubo

## APÊNDICE III

**Tubo com Descontinuidade:** Estudo Devido a Pressão ( $a/w = 0,05, 0,1, 0,15, 0,2$  e  $0,25$ ) - Tensão Tangencial - Figura 4.8.

Tubo Perfeito (TP)				
sigma P1 (MPa)	sigma $\Theta$ (MPa)	distância p/ TP (m)	distância/ distância_max_TP	sigma P1/sigma $\Theta$
2.54E+03	2540.064103	0.00E+00	0.0000E+00	1.0000E+00
2.52E+03	2517.444117	1.00E-03	1.2500E-02	9.9999E-01
2.50E+03	2495.254983	2.00E-03	2.5000E-02	1.0000E+00
2.47E+03	2473.485826	3.00E-03	3.7500E-02	9.9999E-01
2.45E+03	2452.126115	4.00E-03	5.0000E-02	1.0000E+00
2.43E+03	2431.165646	5.00E-03	6.2500E-02	9.9999E-01
2.41E+03	2410.594531	6.00E-03	7.5000E-02	1.0000E+00
2.39E+03	2390.403185	7.00E-03	8.7500E-02	9.9999E-01
2.37E+03	2370.582318	8.00E-03	1.0000E-01	1.0000E+00
2.35E+03	2351.122921	9.00E-03	1.1250E-01	9.9999E-01
2.33E+03	2332.016258	1.00E-02	1.2500E-01	1.0000E+00
2.31E+03	2313.253855	1.10E-02	1.3750E-01	9.9999E-01
2.29E+03	2294.827491	1.20E-02	1.5000E-01	1.0000E+00
2.28E+03	2276.72919	1.30E-02	1.6250E-01	1.0000E+00
2.26E+03	2258.951208	1.40E-02	1.7500E-01	1.0000E+00
2.24E+03	2241.486032	1.50E-02	1.8750E-01	9.9999E-01
2.22E+03	2224.326365	1.60E-02	2.0000E-01	1.0000E+00
2.21E+03	2207.465124	1.70E-02	2.1250E-01	9.9999E-01
2.19E+03	2190.895429	1.80E-02	2.2500E-01	1.0000E+00
2.17E+03	2174.610596	1.90E-02	2.3750E-01	1.0000E+00
2.16E+03	2158.604134	2.00E-02	2.5000E-01	1.0000E+00
2.14E+03	2142.869733	2.10E-02	2.6250E-01	1.0000E+00
2.13E+03	2127.401263	2.20E-02	2.7500E-01	1.0000E+00
2.11E+03	2112.192764	2.30E-02	2.8750E-01	9.9999E-01
2.10E+03	2097.238444	2.40E-02	3.0000E-01	1.0000E+00
2.08E+03	2082.53267	2.50E-02	3.1250E-01	9.9999E-01
2.07E+03	2068.069963	2.60E-02	3.2500E-01	1.0000E+00
2.05E+03	2053.844998	2.70E-02	3.3750E-01	1.0000E+00
2.04E+03	2039.85259	2.80E-02	3.5000E-01	1.0000E+00
2.03E+03	2026.0877	2.90E-02	3.6250E-01	1.0000E+00
2.01E+03	2012.54542	3.00E-02	3.7500E-01	1.0000E+00
2.00E+03	1999.220976	3.10E-02	3.8750E-01	9.9999E-01
1.99E+03	1986.109721	3.20E-02	4.0000E-01	1.0000E+00
1.97E+03	1973.207131	3.30E-02	4.1250E-01	1.0000E+00
1.96E+03	1960.508803	3.40E-02	4.2500E-01	1.0000E+00

1.95E+03	1948.010446	3.50E-02	4.3750E-01	9.9999E-01
1.94E+03	1935.707883	3.60E-02	4.5000E-01	1.0000E+00
1.92E+03	1923.597048	3.70E-02	4.6250E-01	1.0000E+00
1.91E+03	1911.673975	3.80E-02	4.7500E-01	1.0000E+00
1.90E+03	1899.934805	3.90E-02	4.8750E-01	1.0000E+00
1.89E+03	1888.375773	4.00E-02	5.0000E-01	1.0000E+00
1.88E+03	1876.993214	4.10E-02	5.1250E-01	1.0000E+00
1.87E+03	1865.783553	4.20E-02	5.2500E-01	1.0000E+00
1.85E+03	1854.743306	4.30E-02	5.3750E-01	1.0000E+00
1.84E+03	1843.869076	4.40E-02	5.5000E-01	1.0000E+00
1.83E+03	1833.157552	4.50E-02	5.6250E-01	1.0000E+00
1.82E+03	1822.605503	4.60E-02	5.7500E-01	1.0000E+00
1.81E+03	1812.20978	4.70E-02	5.8750E-01	1.0000E+00
1.80E+03	1801.967309	4.80E-02	6.0000E-01	1.0000E+00
1.79E+03	1791.875093	4.90E-02	6.1250E-01	1.0000E+00
1.78E+03	1781.930208	5.00E-02	6.2500E-01	1.0000E+00
1.77E+03	1772.129799	5.10E-02	6.3750E-01	9.9999E-01
1.76E+03	1762.471082	5.20E-02	6.5000E-01	1.0000E+00
1.75E+03	1752.951338	5.30E-02	6.6250E-01	1.0000E+00
1.74E+03	1743.567914	5.40E-02	6.7500E-01	1.0000E+00
1.73E+03	1734.31822	5.50E-02	6.8750E-01	1.0000E+00
1.73E+03	1725.199726	5.60E-02	7.0000E-01	1.0000E+00
1.72E+03	1716.209962	5.70E-02	7.1250E-01	1.0000E+00
1.71E+03	1707.346518	5.80E-02	7.2500E-01	1.0000E+00
1.70E+03	1698.607037	5.90E-02	7.3750E-01	1.0000E+00
1.69E+03	1689.989218	6.00E-02	7.5000E-01	1.0000E+00
1.68E+03	1681.490814	6.10E-02	7.6250E-01	1.0000E+00
1.67E+03	1673.109628	6.20E-02	7.7500E-01	1.0000E+00
1.66E+03	1664.843516	6.30E-02	7.8750E-01	1.0000E+00
1.66E+03	1656.690379	6.40E-02	8.0000E-01	1.0000E+00
1.65E+03	1648.648168	6.50E-02	8.1250E-01	1.0000E+00
1.64E+03	1640.71488	6.60E-02	8.2500E-01	1.0000E+00
1.63E+03	1632.888557	6.70E-02	8.3750E-01	9.9999E-01
1.63E+03	1625.167285	6.80E-02	8.5000E-01	1.0000E+00
1.62E+03	1617.549192	6.90E-02	8.6250E-01	1.0000E+00
1.61E+03	1610.032447	7.00E-02	8.7500E-01	1.0000E+00
1.60E+03	1602.615261	7.10E-02	8.8750E-01	1.0000E+00
1.60E+03	1595.295884	7.20E-02	9.0000E-01	1.0000E+00
1.59E+03	1588.072603	7.30E-02	9.1250E-01	1.0000E+00
1.58E+03	1580.943743	7.40E-02	9.2500E-01	1.0000E+00
1.57E+03	1573.907666	7.50E-02	9.3750E-01	1.0000E+00
1.57E+03	1566.962769	7.60E-02	9.5000E-01	1.0000E+00
1.56E+03	1560.107483	7.70E-02	9.6250E-01	1.0000E+00
1.55E+03	1553.340273	7.80E-02	9.7500E-01	1.0000E+00
1.55E+03	1546.659636	7.90E-02	9.8750E-01	1.0000E+00
1.54E+03	1540.064103	8.00E-02	1.0000E+00	1.0000E+00

0.05

sigma P1 (MPa)	sigma $\Theta$ (MPa)	distância p/0.05 (m)	distância/ distância_max_0.05	sigma P1/sigma $\Theta$
9.63E+03	2.4521E+03	0.00E+00	0.0000E+00	3.9285E+00
6.86E+03	2.4388E+03	6.33E-04	8.3333E-03	2.8112E+00
5.35E+03	2.4256E+03	1.27E-03	1.6667E-02	2.2073E+00
4.50E+03	2.4126E+03	1.90E-03	2.5000E-02	1.8644E+00
3.87E+03	2.3998E+03	2.53E-03	3.3333E-02	1.6135E+00
3.49E+03	2.3871E+03	3.17E-03	4.1667E-02	1.4630E+00
3.24E+03	2.3745E+03	3.80E-03	5.0000E-02	1.3653E+00
3.06E+03	2.3621E+03	4.43E-03	5.8333E-02	1.2954E+00
2.92E+03	2.3498E+03	5.07E-03	6.6667E-02	1.2418E+00
2.81E+03	2.3377E+03	5.70E-03	7.5000E-02	1.2014E+00
2.72E+03	2.3257E+03	6.33E-03	8.3333E-02	1.1698E+00
2.65E+03	2.3139E+03	6.97E-03	9.1667E-02	1.1463E+00
2.59E+03	2.3022E+03	7.60E-03	1.0000E-01	1.1247E+00
2.54E+03	2.2906E+03	8.23E-03	1.0833E-01	1.1076E+00
2.49E+03	2.2791E+03	8.87E-03	1.1667E-01	1.0919E+00
2.45E+03	2.2678E+03	9.50E-03	1.2500E-01	1.0792E+00
2.42E+03	2.2566E+03	1.01E-02	1.3333E-01	1.0731E+00
2.41E+03	2.2455E+03	1.08E-02	1.4167E-01	1.0728E+00
2.38E+03	2.2346E+03	1.14E-02	1.5000E-01	1.0667E+00
2.36E+03	2.2238E+03	1.20E-02	1.5833E-01	1.0614E+00
2.34E+03	2.2131E+03	1.27E-02	1.6667E-01	1.0556E+00
2.32E+03	2.2025E+03	1.33E-02	1.7500E-01	1.0512E+00
2.29E+03	2.1920E+03	1.39E-02	1.8333E-01	1.0469E+00
2.28E+03	2.1816E+03	1.46E-02	1.9167E-01	1.0436E+00
2.26E+03	2.1714E+03	1.52E-02	2.0000E-01	1.0405E+00
2.24E+03	2.1613E+03	1.58E-02	2.0833E-01	1.0379E+00
2.23E+03	2.1512E+03	1.65E-02	2.1667E-01	1.0355E+00
2.21E+03	2.1413E+03	1.71E-02	2.2500E-01	1.0334E+00
2.20E+03	2.1315E+03	1.77E-02	2.3333E-01	1.0314E+00
2.18E+03	2.1218E+03	1.84E-02	2.4167E-01	1.0296E+00
2.17E+03	2.1122E+03	1.90E-02	2.5000E-01	1.0278E+00
2.16E+03	2.1027E+03	1.96E-02	2.5833E-01	1.0263E+00
2.15E+03	2.0933E+03	2.03E-02	2.6667E-01	1.0253E+00
2.14E+03	2.0840E+03	2.09E-02	2.7500E-01	1.0246E+00
2.12E+03	2.0748E+03	2.15E-02	2.8333E-01	1.0236E+00
2.11E+03	2.0657E+03	2.22E-02	2.9167E-01	1.0231E+00
2.10E+03	2.0567E+03	2.28E-02	3.0000E-01	1.0219E+00
2.09E+03	2.0478E+03	2.34E-02	3.0833E-01	1.0208E+00
2.08E+03	2.0389E+03	2.41E-02	3.1667E-01	1.0197E+00
2.07E+03	2.0302E+03	2.47E-02	3.2500E-01	1.0188E+00
2.06E+03	2.0215E+03	2.53E-02	3.3333E-01	1.0181E+00
2.05E+03	2.0130E+03	2.60E-02	3.4167E-01	1.0175E+00

2.04E+03	2.0045E+03	2.66E-02	3.5000E-01	1.0169E+00
2.03E+03	1.9961E+03	2.72E-02	3.5833E-01	1.0163E+00
2.02E+03	1.9878E+03	2.79E-02	3.6667E-01	1.0156E+00
2.01E+03	1.9796E+03	2.85E-02	3.7500E-01	1.0149E+00
2.00E+03	1.9715E+03	2.91E-02	3.8333E-01	1.0142E+00
1.99E+03	1.9635E+03	2.98E-02	3.9167E-01	1.0135E+00
1.98E+03	1.9555E+03	3.04E-02	4.0000E-01	1.0129E+00
1.97E+03	1.9476E+03	3.10E-02	4.0833E-01	1.0123E+00
1.96E+03	1.9398E+03	3.17E-02	4.1667E-01	1.0117E+00
1.95E+03	1.9321E+03	3.23E-02	4.2500E-01	1.0111E+00
1.94E+03	1.9244E+03	3.29E-02	4.3333E-01	1.0105E+00
1.94E+03	1.9168E+03	3.36E-02	4.4167E-01	1.0100E+00
1.93E+03	1.9093E+03	3.42E-02	4.5000E-01	1.0095E+00
1.92E+03	1.9019E+03	3.48E-02	4.5833E-01	1.0089E+00
1.91E+03	1.8945E+03	3.55E-02	4.6667E-01	1.0083E+00
1.90E+03	1.8872E+03	3.61E-02	4.7500E-01	1.0078E+00
1.89E+03	1.8800E+03	3.67E-02	4.8333E-01	1.0072E+00
1.89E+03	1.8729E+03	3.74E-02	4.9167E-01	1.0066E+00
1.88E+03	1.8658E+03	3.80E-02	5.0000E-01	1.0060E+00
1.87E+03	1.8588E+03	3.86E-02	5.0833E-01	1.0055E+00
1.86E+03	1.8518E+03	3.93E-02	5.1667E-01	1.0050E+00
1.85E+03	1.8449E+03	3.99E-02	5.2500E-01	1.0046E+00
1.85E+03	1.8381E+03	4.05E-02	5.3333E-01	1.0041E+00
1.84E+03	1.8314E+03	4.12E-02	5.4167E-01	1.0035E+00
1.83E+03	1.8247E+03	4.18E-02	5.5000E-01	1.0029E+00
1.82E+03	1.8181E+03	4.24E-02	5.5833E-01	1.0023E+00
1.81E+03	1.8115E+03	4.31E-02	5.6667E-01	1.0017E+00
1.81E+03	1.8050E+03	4.37E-02	5.7500E-01	1.0012E+00
1.80E+03	1.7986E+03	4.43E-02	5.8333E-01	1.0006E+00
1.79E+03	1.7922E+03	4.50E-02	5.9167E-01	9.9999E-01
1.78E+03	1.7859E+03	4.56E-02	6.0000E-01	9.9941E-01
1.78E+03	1.7796E+03	4.62E-02	6.0833E-01	9.9883E-01
1.77E+03	1.7734E+03	4.69E-02	6.1667E-01	9.9823E-01
1.76E+03	1.7673E+03	4.75E-02	6.2500E-01	9.9762E-01
1.76E+03	1.7612E+03	4.81E-02	6.3333E-01	9.9699E-01
1.75E+03	1.7552E+03	4.88E-02	6.4167E-01	9.9636E-01
1.74E+03	1.7492E+03	4.94E-02	6.5000E-01	9.9572E-01
1.73E+03	1.7433E+03	5.00E-02	6.5833E-01	9.9508E-01
1.73E+03	1.7374E+03	5.07E-02	6.6667E-01	9.9443E-01
1.72E+03	1.7316E+03	5.13E-02	6.7500E-01	9.9376E-01
1.71E+03	1.7258E+03	5.19E-02	6.8333E-01	9.9307E-01
1.71E+03	1.7201E+03	5.26E-02	6.9167E-01	9.9237E-01
1.70E+03	1.7144E+03	5.32E-02	7.0000E-01	9.9167E-01
1.69E+03	1.7088E+03	5.38E-02	7.0833E-01	9.9094E-01
1.69E+03	1.7033E+03	5.45E-02	7.1667E-01	9.9021E-01
1.68E+03	1.6977E+03	5.51E-02	7.2500E-01	9.8947E-01



1.67E+03	1.6923E+03	5.57E-02	7.3333E-01	9.8871E-01
1.67E+03	1.6869E+03	5.64E-02	7.4167E-01	9.8793E-01
1.66E+03	1.6815E+03	5.70E-02	7.5000E-01	9.8713E-01
1.65E+03	1.6762E+03	5.76E-02	7.5833E-01	9.8631E-01
1.65E+03	1.6709E+03	5.83E-02	7.6667E-01	9.8547E-01
1.64E+03	1.6657E+03	5.89E-02	7.7500E-01	9.8462E-01
1.63E+03	1.6605E+03	5.95E-02	7.8333E-01	9.8375E-01
1.63E+03	1.6553E+03	6.02E-02	7.9167E-01	9.8287E-01
1.62E+03	1.6502E+03	6.08E-02	8.0000E-01	9.8197E-01
1.61E+03	1.6452E+03	6.14E-02	8.0833E-01	9.8103E-01
1.61E+03	1.6402E+03	6.21E-02	8.1667E-01	9.8007E-01
1.60E+03	1.6352E+03	6.27E-02	8.2500E-01	9.7909E-01
1.59E+03	1.6303E+03	6.33E-02	8.3333E-01	9.7809E-01
1.59E+03	1.6254E+03	6.40E-02	8.4167E-01	9.7706E-01
1.58E+03	1.6206E+03	6.46E-02	8.5000E-01	9.7601E-01
1.58E+03	1.6158E+03	6.52E-02	8.5833E-01	9.7492E-01
1.57E+03	1.6110E+03	6.59E-02	8.6667E-01	9.7381E-01
1.56E+03	1.6063E+03	6.65E-02	8.7500E-01	9.7267E-01
1.56E+03	1.6016E+03	6.71E-02	8.8333E-01	9.7150E-01
1.55E+03	1.5970E+03	6.78E-02	8.9167E-01	9.7030E-01
1.54E+03	1.5924E+03	6.84E-02	9.0000E-01	9.6907E-01
1.54E+03	1.5878E+03	6.90E-02	9.0833E-01	9.6780E-01
1.53E+03	1.5833E+03	6.97E-02	9.1667E-01	9.6651E-01
1.52E+03	1.5788E+03	7.03E-02	9.2500E-01	9.6517E-01
1.52E+03	1.5744E+03	7.09E-02	9.3333E-01	9.6380E-01
1.51E+03	1.5700E+03	7.16E-02	9.4167E-01	9.6239E-01
1.50E+03	1.5656E+03	7.22E-02	9.5000E-01	9.6093E-01
1.50E+03	1.5612E+03	7.28E-02	9.5833E-01	9.5944E-01
1.49E+03	1.5569E+03	7.35E-02	9.6667E-01	9.5791E-01
1.48E+03	1.5527E+03	7.41E-02	9.7500E-01	9.5633E-01
1.48E+03	1.5484E+03	7.47E-02	9.8333E-01	9.5470E-01
1.47E+03	1.5442E+03	7.54E-02	9.9167E-01	9.5303E-01
1.47E+03	1.5401E+03	7.60E-02	1.0000E+00	9.5130E-01

0.1

sigma P1 (MPa)	sigma $\Theta$ (MPa)	distância p/0.1 (m)	distância/ distância_max_0.1	sigma P1/sigma $\Theta$
9.56E+03	2.3706E+03	0.00E+00	0.0000E+00	4.0321E+00
8.27E+03	2.3608E+03	5.00E-04	6.9444E-03	3.5046E+00
7.33E+03	2.3511E+03	1.00E-03	1.3889E-02	3.1159E+00
6.55E+03	2.3415E+03	1.50E-03	2.0833E-02	2.7967E+00
5.95E+03	2.3320E+03	2.00E-03	2.7778E-02	2.5507E+00
5.45E+03	2.3226E+03	2.50E-03	3.4722E-02	2.3469E+00

5.05E+03	2.3133E+03	3.00E-03	4.1667E-02	2.1830E+00
4.71E+03	2.3040E+03	3.50E-03	4.8611E-02	2.0455E+00
4.43E+03	2.2948E+03	4.00E-03	5.5556E-02	1.9313E+00
4.19E+03	2.2857E+03	4.50E-03	6.2500E-02	1.8339E+00
3.99E+03	2.2767E+03	5.00E-03	6.9444E-02	1.7516E+00
3.81E+03	2.2678E+03	5.50E-03	7.6389E-02	1.6807E+00
3.66E+03	2.2590E+03	6.00E-03	8.3333E-02	1.6198E+00
3.53E+03	2.2502E+03	6.50E-03	9.0278E-02	1.5672E+00
3.41E+03	2.2415E+03	7.00E-03	9.7222E-02	1.5212E+00
3.31E+03	2.2329E+03	7.50E-03	1.0417E-01	1.4806E+00
3.21E+03	2.2243E+03	8.00E-03	1.1111E-01	1.4443E+00
3.13E+03	2.2159E+03	8.50E-03	1.1806E-01	1.4123E+00
3.05E+03	2.2075E+03	9.00E-03	1.2500E-01	1.3834E+00
2.99E+03	2.1991E+03	9.50E-03	1.3194E-01	1.3579E+00
2.92E+03	2.1909E+03	1.00E-02	1.3889E-01	1.3347E+00
2.87E+03	2.1827E+03	1.05E-02	1.4583E-01	1.3144E+00
2.82E+03	2.1746E+03	1.10E-02	1.5278E-01	1.2956E+00
2.77E+03	2.1666E+03	1.15E-02	1.5972E-01	1.2786E+00
2.73E+03	2.1586E+03	1.20E-02	1.6667E-01	1.2628E+00
2.69E+03	2.1507E+03	1.25E-02	1.7361E-01	1.2485E+00
2.65E+03	2.1429E+03	1.30E-02	1.8056E-01	1.2352E+00
2.61E+03	2.1351E+03	1.35E-02	1.8750E-01	1.2232E+00
2.58E+03	2.1274E+03	1.40E-02	1.9444E-01	1.2119E+00
2.55E+03	2.1198E+03	1.45E-02	2.0139E-01	1.2017E+00
2.52E+03	2.1122E+03	1.50E-02	2.0833E-01	1.1921E+00
2.49E+03	2.1047E+03	1.55E-02	2.1528E-01	1.1835E+00
2.46E+03	2.0972E+03	1.60E-02	2.2222E-01	1.1753E+00
2.44E+03	2.0899E+03	1.65E-02	2.2917E-01	1.1677E+00
2.42E+03	2.0825E+03	1.70E-02	2.3611E-01	1.1603E+00
2.39E+03	2.0753E+03	1.75E-02	2.4306E-01	1.1536E+00
2.37E+03	2.0681E+03	1.80E-02	2.5000E-01	1.1470E+00
2.35E+03	2.0609E+03	1.85E-02	2.5694E-01	1.1410E+00
2.33E+03	2.0538E+03	1.90E-02	2.6389E-01	1.1352E+00
2.31E+03	2.0468E+03	1.95E-02	2.7083E-01	1.1298E+00
2.29E+03	2.0399E+03	2.00E-02	2.7778E-01	1.1247E+00
2.28E+03	2.0329E+03	2.05E-02	2.8472E-01	1.1201E+00
2.26E+03	2.0261E+03	2.10E-02	2.9167E-01	1.1157E+00
2.24E+03	2.0193E+03	2.15E-02	2.9861E-01	1.1114E+00
2.23E+03	2.0125E+03	2.20E-02	3.0556E-01	1.1071E+00
2.21E+03	2.0059E+03	2.25E-02	3.1250E-01	1.1031E+00
2.20E+03	1.9992E+03	2.30E-02	3.1944E-01	1.0992E+00
2.18E+03	1.9926E+03	2.35E-02	3.2639E-01	1.0956E+00
2.17E+03	1.9861E+03	2.40E-02	3.3333E-01	1.0920E+00
2.16E+03	1.9796E+03	2.45E-02	3.4028E-01	1.0887E+00
2.14E+03	1.9732E+03	2.50E-02	3.4722E-01	1.0854E+00
2.13E+03	1.9668E+03	2.55E-02	3.5417E-01	1.0823E+00

2.12E+03	1.9605E+03	2.60E-02	3.6111E-01	1.0793E+00
2.10E+03	1.9542E+03	2.65E-02	3.6806E-01	1.0763E+00
2.09E+03	1.9480E+03	2.70E-02	3.7500E-01	1.0734E+00
2.08E+03	1.9418E+03	2.75E-02	3.8194E-01	1.0707E+00
2.07E+03	1.9357E+03	2.80E-02	3.8889E-01	1.0679E+00
2.06E+03	1.9296E+03	2.85E-02	3.9583E-01	1.0653E+00
2.04E+03	1.9236E+03	2.90E-02	4.0278E-01	1.0627E+00
2.03E+03	1.9176E+03	2.95E-02	4.0972E-01	1.0603E+00
2.02E+03	1.9117E+03	3.00E-02	4.1667E-01	1.0578E+00
2.01E+03	1.9058E+03	3.05E-02	4.2361E-01	1.0554E+00
2.00E+03	1.8999E+03	3.10E-02	4.3056E-01	1.0531E+00
1.99E+03	1.8941E+03	3.15E-02	4.3750E-01	1.0508E+00
1.98E+03	1.8884E+03	3.20E-02	4.4444E-01	1.0485E+00
1.97E+03	1.8827E+03	3.25E-02	4.5139E-01	1.0463E+00
1.96E+03	1.8770E+03	3.30E-02	4.5833E-01	1.0441E+00
1.95E+03	1.8714E+03	3.35E-02	4.6528E-01	1.0419E+00
1.94E+03	1.8658E+03	3.40E-02	4.7222E-01	1.0398E+00
1.93E+03	1.8602E+03	3.45E-02	4.7917E-01	1.0377E+00
1.92E+03	1.8547E+03	3.50E-02	4.8611E-01	1.0356E+00
1.91E+03	1.8493E+03	3.55E-02	4.9306E-01	1.0335E+00
1.90E+03	1.8439E+03	3.60E-02	5.0000E-01	1.0314E+00
1.89E+03	1.8385E+03	3.65E-02	5.0694E-01	1.0294E+00
1.88E+03	1.8332E+03	3.70E-02	5.1389E-01	1.0274E+00
1.87E+03	1.8279E+03	3.75E-02	5.2083E-01	1.0253E+00
1.87E+03	1.8226E+03	3.80E-02	5.2778E-01	1.0233E+00
1.86E+03	1.8174E+03	3.85E-02	5.3472E-01	1.0213E+00
1.85E+03	1.8122E+03	3.90E-02	5.4167E-01	1.0193E+00
1.84E+03	1.8071E+03	3.95E-02	5.4861E-01	1.0173E+00
1.83E+03	1.8020E+03	4.00E-02	5.5556E-01	1.0153E+00
1.82E+03	1.7969E+03	4.05E-02	5.6250E-01	1.0134E+00
1.81E+03	1.7919E+03	4.10E-02	5.6944E-01	1.0114E+00
1.80E+03	1.7869E+03	4.15E-02	5.7639E-01	1.0094E+00
1.80E+03	1.7819E+03	4.20E-02	5.8333E-01	1.0074E+00
1.79E+03	1.7770E+03	4.25E-02	5.9028E-01	1.0054E+00
1.78E+03	1.7721E+03	4.30E-02	5.9722E-01	1.0034E+00
1.77E+03	1.7673E+03	4.35E-02	6.0417E-01	1.0013E+00
1.76E+03	1.7625E+03	4.40E-02	6.1111E-01	9.9930E-01
1.75E+03	1.7577E+03	4.45E-02	6.1806E-01	9.9726E-01
1.74E+03	1.7530E+03	4.50E-02	6.2500E-01	9.9518E-01
1.74E+03	1.7482E+03	4.55E-02	6.3194E-01	9.9311E-01
1.73E+03	1.7436E+03	4.60E-02	6.3889E-01	9.9101E-01
1.72E+03	1.7389E+03	4.65E-02	6.4583E-01	9.8892E-01
1.71E+03	1.7343E+03	4.70E-02	6.5278E-01	9.8680E-01
1.70E+03	1.7297E+03	4.75E-02	6.5972E-01	9.8466E-01
1.69E+03	1.7252E+03	4.80E-02	6.6667E-01	9.8248E-01
1.69E+03	1.7207E+03	4.85E-02	6.7361E-01	9.8030E-01

1.68E+03	1.7162E+03	4.90E-02	6.8056E-01	9.7808E-01
1.67E+03	1.7118E+03	4.95E-02	6.8750E-01	9.7585E-01
1.66E+03	1.7073E+03	5.00E-02	6.9444E-01	9.7359E-01
1.65E+03	1.7030E+03	5.05E-02	7.0139E-01	9.7130E-01
1.65E+03	1.6986E+03	5.10E-02	7.0833E-01	9.6898E-01
1.64E+03	1.6943E+03	5.15E-02	7.1528E-01	9.6663E-01
1.63E+03	1.6900E+03	5.20E-02	7.2222E-01	9.6425E-01
1.62E+03	1.6857E+03	5.25E-02	7.2917E-01	9.6184E-01
1.61E+03	1.6815E+03	5.30E-02	7.3611E-01	9.5940E-01
1.61E+03	1.6773E+03	5.35E-02	7.4306E-01	9.5692E-01
1.60E+03	1.6731E+03	5.40E-02	7.5000E-01	9.5440E-01
1.59E+03	1.6690E+03	5.45E-02	7.5694E-01	9.5185E-01
1.58E+03	1.6648E+03	5.50E-02	7.6389E-01	9.4925E-01
1.57E+03	1.6608E+03	5.55E-02	7.7083E-01	9.4662E-01
1.56E+03	1.6567E+03	5.60E-02	7.7778E-01	9.4394E-01
1.56E+03	1.6527E+03	5.65E-02	7.8472E-01	9.4122E-01
1.55E+03	1.6486E+03	5.70E-02	7.9167E-01	9.3845E-01
1.54E+03	1.6447E+03	5.75E-02	7.9861E-01	9.3564E-01
1.53E+03	1.6407E+03	5.80E-02	8.0556E-01	9.3278E-01
1.52E+03	1.6368E+03	5.85E-02	8.1250E-01	9.2989E-01
1.51E+03	1.6329E+03	5.90E-02	8.1944E-01	9.2695E-01
1.51E+03	1.6290E+03	5.95E-02	8.2639E-01	9.2393E-01
1.50E+03	1.6252E+03	6.00E-02	8.3333E-01	9.2087E-01
1.49E+03	1621.3455	6.05E-02	8.4028E-01	9.1775E-01
1.48E+03	1617.5492	6.10E-02	8.4722E-01	9.1457E-01
1.47E+03	1613.7783	6.15E-02	8.5417E-01	9.1133E-01
1.46E+03	1610.0324	6.20E-02	8.6111E-01	9.0803E-01
1.45E+03	1606.3115	6.25E-02	8.6806E-01	9.0468E-01
1.44E+03	1602.6153	6.30E-02	8.7500E-01	9.0125E-01
1.44E+03	1598.9435	6.35E-02	8.8194E-01	8.9776E-01
1.43E+03	1595.2959	6.40E-02	8.8889E-01	8.9419E-01
1.42E+03	1591.6723	6.45E-02	8.9583E-01	8.9057E-01
1.41E+03	1588.0726	6.50E-02	9.0278E-01	8.8686E-01
1.40E+03	1584.4965	6.55E-02	9.0972E-01	8.8308E-01
1.39E+03	1580.9437	6.60E-02	9.1667E-01	8.7923E-01
1.38E+03	1577.4142	6.65E-02	9.2361E-01	8.7530E-01
1.37E+03	1573.9077	6.70E-02	9.3056E-01	8.7128E-01
1.36E+03	1570.4239	6.75E-02	9.3750E-01	8.6719E-01
1.35E+03	1566.9628	6.80E-02	9.4444E-01	8.6299E-01
1.34E+03	1563.524	6.85E-02	9.5139E-01	8.5873E-01
1.33E+03	1560.1075	6.90E-02	9.5833E-01	8.5436E-01
1.32E+03	1556.713	6.95E-02	9.6528E-01	8.4991E-01
1.31E+03	1553.3403	7.00E-02	9.7222E-01	8.4535E-01
1.30E+03	1549.9892	7.05E-02	9.7917E-01	8.4070E-01
1.29E+03	1546.6596	7.10E-02	9.8611E-01	8.3594E-01
1.28E+03	1543.3513	7.15E-02	9.9306E-01	8.3108E-01

1.27E+03 1540.0641 7.20E-02 1.0000E+00 8.2611E-01

0.15

sigma P1 (MPa)	sigma $\Theta$ (MPa)	distância p/0.15 (m)	distância/ distância_max_0.15	sigma P1/sigma $\Theta$
9.74E+03	2.2948E+03	0.00E+00	0.0000E+00	4.2429E+00
8.85E+03	2.2857E+03	5.00E-04	7.3529E-03	3.8712E+00
8.12E+03	2.2767E+03	1.00E-03	1.4706E-02	3.5662E+00
7.48E+03	2.2678E+03	1.50E-03	2.2059E-02	3.2999E+00
6.95E+03	2.2590E+03	2.00E-03	2.9412E-02	3.0775E+00
6.48E+03	2.2502E+03	2.50E-03	3.6765E-02	2.8812E+00
6.09E+03	2.2415E+03	3.00E-03	4.4118E-02	2.7150E+00
5.73E+03	2.2329E+03	3.50E-03	5.1471E-02	2.5669E+00
5.43E+03	2.2243E+03	4.00E-03	5.8824E-02	2.4394E+00
5.15E+03	2.2159E+03	4.50E-03	6.6176E-02	2.3253E+00
4.91E+03	2.2075E+03	5.00E-03	7.3529E-02	2.2255E+00
4.70E+03	2.1991E+03	5.50E-03	8.0882E-02	2.1358E+00
4.51E+03	2.1909E+03	6.00E-03	8.8235E-02	2.0565E+00
4.33E+03	2.1827E+03	6.50E-03	9.5588E-02	1.9850E+00
4.18E+03	2.1746E+03	7.00E-03	1.0294E-01	1.9211E+00
4.04E+03	2.1666E+03	7.50E-03	1.1029E-01	1.8630E+00
3.91E+03	2.1586E+03	8.00E-03	1.1765E-01	1.8104E+00
3.79E+03	2.1507E+03	8.50E-03	1.2500E-01	1.7624E+00
3.68E+03	2.1429E+03	9.00E-03	1.3235E-01	1.7188E+00
3.59E+03	2.1351E+03	9.50E-03	1.3971E-01	1.6791E+00
3.49E+03	2.1274E+03	1.00E-02	1.4706E-01	1.6427E+00
3.41E+03	2.1198E+03	1.05E-02	1.5441E-01	1.6091E+00
3.33E+03	2.1122E+03	1.10E-02	1.6176E-01	1.5779E+00
3.26E+03	2.1047E+03	1.15E-02	1.6912E-01	1.5492E+00
3.19E+03	2.0972E+03	1.20E-02	1.7647E-01	1.5224E+00
3.13E+03	2.0899E+03	1.25E-02	1.8382E-01	1.4977E+00
3.07E+03	2.0825E+03	1.30E-02	1.9118E-01	1.4746E+00
3.02E+03	2.0753E+03	1.35E-02	1.9853E-01	1.4531E+00
2.96E+03	2.0681E+03	1.40E-02	2.0588E-01	1.4330E+00
2.92E+03	2.0609E+03	1.45E-02	2.1324E-01	1.4145E+00
2.87E+03	2.0538E+03	1.50E-02	2.2059E-01	1.3970E+00
2.83E+03	2.0468E+03	1.55E-02	2.2794E-01	1.3805E+00
2.78E+03	2.0399E+03	1.60E-02	2.3529E-01	1.3648E+00
2.74E+03	2.0329E+03	1.65E-02	2.4265E-01	1.3501E+00
2.71E+03	2.0261E+03	1.70E-02	2.5000E-01	1.3360E+00
2.67E+03	2.0193E+03	1.75E-02	2.5735E-01	1.3228E+00
2.64E+03	2.0125E+03	1.80E-02	2.6471E-01	1.3102E+00
2.60E+03	2.0059E+03	1.85E-02	2.7206E-01	1.2984E+00

2.57E+03	1.9992E+03	1.90E-02	2.7941E-01	1.2869E+00
2.54E+03	1.9926E+03	1.95E-02	2.8676E-01	1.2762E+00
2.51E+03	1.9861E+03	2.00E-02	2.9412E-01	1.2658E+00
2.49E+03	1.9796E+03	2.05E-02	3.0147E-01	1.2560E+00
2.46E+03	1.9732E+03	2.10E-02	3.0882E-01	1.2464E+00
2.43E+03	1.9668E+03	2.15E-02	3.1618E-01	1.2374E+00
2.41E+03	1.9605E+03	2.20E-02	3.2353E-01	1.2285E+00
2.38E+03	1.9542E+03	2.25E-02	3.3088E-01	1.2202E+00
2.36E+03	1.9480E+03	2.30E-02	3.3824E-01	1.2120E+00
2.34E+03	1.9418E+03	2.35E-02	3.4559E-01	1.2043E+00
2.32E+03	1.9357E+03	2.40E-02	3.5294E-01	1.1967E+00
2.30E+03	1.9296E+03	2.45E-02	3.6029E-01	1.1894E+00
2.27E+03	1.9236E+03	2.50E-02	3.6765E-01	1.1823E+00
2.25E+03	1917.612	2.55E-02	3.7500E-01	1.1754E+00
2.23E+03	1911.674	2.60E-02	3.8235E-01	1.1686E+00
2.21E+03	1905.782	2.65E-02	3.8971E-01	1.1620E+00
2.20E+03	1899.935	2.70E-02	3.9706E-01	1.1557E+00
2.18E+03	1894.133	2.75E-02	4.0441E-01	1.1496E+00
2.16E+03	1888.376	2.80E-02	4.1176E-01	1.1436E+00
2.14E+03	1882.663	2.85E-02	4.1912E-01	1.1378E+00
2.12E+03	1876.993	2.90E-02	4.2647E-01	1.1319E+00
2.11E+03	1871.367	2.95E-02	4.3382E-01	1.1262E+00
2.09E+03	1865.784	3.00E-02	4.4118E-01	1.1206E+00
2.07E+03	1860.242	3.05E-02	4.4853E-01	1.1151E+00
2.06E+03	1854.743	3.10E-02	4.5588E-01	1.1097E+00
2.04E+03	1849.286	3.15E-02	4.6324E-01	1.1044E+00
2.03E+03	1843.869	3.20E-02	4.7059E-01	1.0991E+00
2.01E+03	1838.493	3.25E-02	4.7794E-01	1.0940E+00
2.00E+03	1833.158	3.30E-02	4.8529E-01	1.0889E+00
1.98E+03	1827.862	3.35E-02	4.9265E-01	1.0839E+00
1.97E+03	1822.606	3.40E-02	5.0000E-01	1.0788E+00
1.95E+03	1817.388	3.45E-02	5.0735E-01	1.0738E+00
1.94E+03	1812.210	3.50E-02	5.1471E-01	1.0689E+00
1.92E+03	1807.070	3.55E-02	5.2206E-01	1.0640E+00
1.91E+03	1801.967	3.60E-02	5.2941E-01	1.0591E+00
1.89E+03	1796.903	3.65E-02	5.3676E-01	1.0543E+00
1.88E+03	1791.875	3.70E-02	5.4412E-01	1.0495E+00
1.87E+03	1786.884	3.75E-02	5.5147E-01	1.0447E+00
1.85E+03	1781.930	3.80E-02	5.5882E-01	1.0399E+00
1.84E+03	1777.012	3.85E-02	5.6618E-01	1.0351E+00
1.83E+03	1772.130	3.90E-02	5.7353E-01	1.0303E+00
1.81E+03	1767.283	3.95E-02	5.8088E-01	1.0255E+00
1.80E+03	1762.471	4.00E-02	5.8824E-01	1.0207E+00
1.79E+03	1757.694	4.05E-02	5.9559E-01	1.0160E+00
1.77E+03	1752.951	4.10E-02	6.0294E-01	1.0111E+00
1.76E+03	1748.243	4.15E-02	6.1029E-01	1.0063E+00

1.75E+03	1743.568	4.20E-02	6.1765E-01	1.0014E+00
1.73E+03	1738.927	4.25E-02	6.2500E-01	9.9658E-01
1.72E+03	1734.318	4.30E-02	6.3235E-01	9.9167E-01
1.71E+03	1729.743	4.35E-02	6.3971E-01	9.8676E-01
1.69E+03	1725.200	4.40E-02	6.4706E-01	9.8179E-01
1.68E+03	1720.689	4.45E-02	6.5441E-01	9.7682E-01
1.67E+03	1716.210	4.50E-02	6.6176E-01	9.7178E-01
1.65E+03	1711.763	4.55E-02	6.6912E-01	9.6673E-01
1.64E+03	1707.347	4.60E-02	6.7647E-01	9.6161E-01
1.63E+03	1702.961	4.65E-02	6.8382E-01	9.5652E-01
1.62E+03	1698.607	4.70E-02	6.9118E-01	9.5134E-01
1.60E+03	1694.283	4.75E-02	6.9853E-01	9.4611E-01
1.59E+03	1689.989	4.80E-02	7.0588E-01	9.4079E-01
1.58E+03	1685.725	4.85E-02	7.1324E-01	9.3543E-01
1.56E+03	1681.491	4.90E-02	7.2059E-01	9.2998E-01
1.55E+03	1677.286	4.95E-02	7.2794E-01	9.2450E-01
1.54E+03	1673.110	5.00E-02	7.3529E-01	9.1893E-01
1.52E+03	1668.962	5.05E-02	7.4265E-01	9.1331E-01
1.51E+03	1664.844	5.10E-02	7.5000E-01	9.0759E-01
1.50E+03	1660.753	5.15E-02	7.5735E-01	9.0182E-01
1.48E+03	1656.690	5.20E-02	7.6471E-01	8.9595E-01
1.47E+03	1652.656	5.25E-02	7.7206E-01	8.9003E-01
1.46E+03	1648.648	5.30E-02	7.7941E-01	8.8402E-01
1.44E+03	1644.668	5.35E-02	7.8676E-01	8.7790E-01
1.43E+03	1640.715	5.40E-02	7.9412E-01	8.7169E-01
1.42E+03	1636.788	5.45E-02	8.0147E-01	8.6538E-01
1.40E+03	1632.889	5.50E-02	8.0882E-01	8.5897E-01
1.39E+03	1629.015	5.55E-02	8.1618E-01	8.5248E-01
1.37E+03	1625.167	5.60E-02	8.2353E-01	8.4586E-01
1.36E+03	1621.345	5.65E-02	8.3088E-01	8.3915E-01
1.35E+03	1617.549	5.70E-02	8.3824E-01	8.3231E-01
1.33E+03	1613.778	5.75E-02	8.4559E-01	8.2536E-01
1.32E+03	1610.032	5.80E-02	8.5294E-01	8.1828E-01
1.30E+03	1606.312	5.85E-02	8.6029E-01	8.1109E-01
1.29E+03	1602.615	5.90E-02	8.6765E-01	8.0375E-01
1.27E+03	1598.943	5.95E-02	8.7500E-01	7.9630E-01
1.26E+03	1595.296	6.00E-02	8.8235E-01	7.8869E-01
1.24E+03	1591.672	6.05E-02	8.8971E-01	7.8096E-01
1.23E+03	1588.073	6.10E-02	8.9706E-01	7.7308E-01
1.21E+03	1584.496	6.15E-02	9.0441E-01	7.6506E-01
1.20E+03	1580.944	6.20E-02	9.1176E-01	7.5686E-01
1.18E+03	1577.414	6.25E-02	9.1912E-01	7.4853E-01
1.16E+03	1573.908	6.30E-02	9.2647E-01	7.4002E-01
1.15E+03	1570.424	6.35E-02	9.3382E-01	7.3138E-01
1.13E+03	1566.963	6.40E-02	9.4118E-01	7.2255E-01
1.12E+03	1563.524	6.45E-02	9.4853E-01	7.1354E-01

1.10E+03	1560.107	6.50E-02	9.5588E-01	7.0432E-01
1.08E+03	1556.713	6.55E-02	9.6324E-01	6.9494E-01
1.06E+03	1553.340	6.60E-02	9.7059E-01	6.8534E-01
1.05E+03	1549.989	6.65E-02	9.7794E-01	6.7557E-01
1.03E+03	1546.660	6.70E-02	9.8529E-01	6.6557E-01
1.01E+03	1543.351	6.75E-02	9.9265E-01	6.5539E-01
9.93E+02	1540.064	6.80E-02	1.0000E+00	6.4496E-01

0.2

sigma P1 (MPa)	sigma $\Theta$ (MPa)	distância p/0.2 (m)	distância/ distância_max_0.2	sigma P1/sigma $\Theta$
1.01E+04	2.2243E+03	0.00E+00	0.0000E+00	4.5335E+00
8.75E+03	2.2075E+03	1.00E-03	1.5625E-02	3.9625E+00
7.75E+03	2.1909E+03	2.00E-03	3.1250E-02	3.5380E+00
6.92E+03	2.1746E+03	3.00E-03	4.6875E-02	3.1824E+00
6.27E+03	2.1586E+03	4.00E-03	6.2500E-02	2.9061E+00
5.73E+03	2.1429E+03	5.00E-03	7.8125E-02	2.6734E+00
5.29E+03	2.1274E+03	6.00E-03	9.3750E-02	2.4846E+00
4.91E+03	2.1122E+03	7.00E-03	1.0938E-01	2.3244E+00
4.59E+03	2.0972E+03	8.00E-03	1.2500E-01	2.1902E+00
4.32E+03	2.0825E+03	9.00E-03	1.4063E-01	2.0743E+00
4.08E+03	2.0681E+03	1.00E-02	1.5625E-01	1.9751E+00
3.88E+03	2.0538E+03	1.10E-02	1.7188E-01	1.8884E+00
3.70E+03	2.0399E+03	1.20E-02	1.8750E-01	1.8127E+00
3.54E+03	2.0261E+03	1.30E-02	2.0313E-01	1.7457E+00
3.39E+03	2.0125E+03	1.40E-02	2.1875E-01	1.6862E+00
3.26E+03	1.9992E+03	1.50E-02	2.3438E-01	1.6330E+00
3.15E+03	1.9861E+03	1.60E-02	2.5000E-01	1.5849E+00
3.04E+03	1.9732E+03	1.70E-02	2.6563E-01	1.5415E+00
2.94E+03	1.9605E+03	1.80E-02	2.8125E-01	1.5014E+00
2.85E+03	1.9480E+03	1.90E-02	2.9688E-01	1.4651E+00
2.77E+03	1.9357E+03	2.00E-02	3.1250E-01	1.4314E+00
2.70E+03	1.9236E+03	2.10E-02	3.2813E-01	1.4011E+00
2.62E+03	1.9117E+03	2.20E-02	3.4375E-01	1.3725E+00
2.56E+03	1.8999E+03	2.30E-02	3.5938E-01	1.3455E+00
2.49E+03	1.8884E+03	2.40E-02	3.7500E-01	1.3195E+00
2.43E+03	1.8770E+03	2.50E-02	3.9063E-01	1.2952E+00
2.37E+03	1.8658E+03	2.60E-02	4.0625E-01	1.2718E+00
2.32E+03	1.8547E+03	2.70E-02	4.2188E-01	1.2497E+00
2.26E+03	1.8439E+03	2.80E-02	4.3750E-01	1.2282E+00
2.21E+03	1.8332E+03	2.90E-02	4.5313E-01	1.2080E+00
2.17E+03	1.8226E+03	3.00E-02	4.6875E-01	1.1882E+00
2.12E+03	1.8122E+03	3.10E-02	4.8438E-01	1.1689E+00



2.07E+03	1.8020E+03	3.20E-02	5.0000E-01	1.1498E+00
2.03E+03	1.7919E+03	3.30E-02	5.1563E-01	1.1312E+00
1.98E+03	1.7819E+03	3.40E-02	5.3125E-01	1.1127E+00
1.94E+03	1.7721E+03	3.50E-02	5.4688E-01	1.0946E+00
1.90E+03	1.7625E+03	3.60E-02	5.6250E-01	1.0765E+00
1.86E+03	1.7530E+03	3.70E-02	5.7813E-01	1.0586E+00
1.81E+03	1.7436E+03	3.80E-02	5.9375E-01	1.0405E+00
1.77E+03	1.7343E+03	3.90E-02	6.0938E-01	1.0227E+00
1.73E+03	1.7252E+03	4.00E-02	6.2500E-01	1.0046E+00
1.69E+03	1.7162E+03	4.10E-02	6.4063E-01	9.8650E-01
1.65E+03	1.7073E+03	4.20E-02	6.5625E-01	9.6811E-01
1.61E+03	1.6986E+03	4.30E-02	6.7188E-01	9.4953E-01
1.57E+03	1.6900E+03	4.40E-02	6.8750E-01	9.3054E-01
1.53E+03	1.6815E+03	4.50E-02	7.0313E-01	9.1143E-01
1.49E+03	1.6731E+03	4.60E-02	7.1875E-01	8.9182E-01
1.45E+03	1.6648E+03	4.70E-02	7.3438E-01	8.7186E-01
1.41E+03	1.6567E+03	4.80E-02	7.5000E-01	8.5133E-01
1.37E+03	1.6486E+03	4.90E-02	7.6563E-01	8.3040E-01
1.33E+03	1.6407E+03	5.00E-02	7.8125E-01	8.0882E-01
1.28E+03	1.6329E+03	5.10E-02	7.9688E-01	7.8675E-01
1.24E+03	1.6252E+03	5.20E-02	8.1250E-01	7.6394E-01
1.20E+03	1.6175E+03	5.30E-02	8.2813E-01	7.4054E-01
1.15E+03	1.6100E+03	5.40E-02	8.4375E-01	7.1631E-01
1.11E+03	1.6026E+03	5.50E-02	8.5938E-01	6.9141E-01
1.06E+03	1.5953E+03	5.60E-02	8.7500E-01	6.6576E-01
1.02E+03	1.5881E+03	5.70E-02	8.9063E-01	6.3954E-01
9.67E+02	1.5809E+03	5.80E-02	9.0625E-01	6.1186E-01
9.18E+02	1.5739E+03	5.90E-02	9.2188E-01	5.8322E-01
8.67E+02	1.5670E+03	6.00E-02	9.3750E-01	5.5344E-01
8.15E+02	1.5601E+03	6.10E-02	9.5313E-01	5.2263E-01
7.62E+02	1.5533E+03	6.20E-02	9.6875E-01	4.9050E-01
7.07E+02	1.5467E+03	6.30E-02	9.8438E-01	4.5722E-01
6.51E+02	1.5401E+03	6.40E-02	1.0000E+00	4.2245E-01

0.25

sigma P1 (MPa)	sigma $\Theta$ (MPa)	distância p/0.25 (m)	distância/ distância_max_0.25	sigma P1/sigma $\Theta$
1.05E+04	2.1586E+03	0.00E+00	0.0000E+00	4.8784E+00
9.36E+03	2.1429E+03	1.00E-03	1.6667E-02	4.3699E+00
8.46E+03	2.1274E+03	2.00E-03	3.3333E-02	3.9769E+00
7.67E+03	2.1122E+03	3.00E-03	5.0000E-02	3.6337E+00
7.03E+03	2.0972E+03	4.00E-03	6.6667E-02	3.3529E+00
6.48E+03	2.0825E+03	5.00E-03	8.3333E-02	3.1119E+00

6.02E+03	2.0681E+03	6.00E-03	1.0000E-01	2.9090E+00
5.61E+03	2.0538E+03	7.00E-03	1.1667E-01	2.7304E+00
5.26E+03	2.0399E+03	8.00E-03	1.3333E-01	2.5774E+00
4.95E+03	2.0261E+03	9.00E-03	1.5000E-01	2.4414E+00
4.67E+03	2.0125E+03	1.00E-02	1.6667E-01	2.3228E+00
4.43E+03	1.9992E+03	1.10E-02	1.8333E-01	2.2168E+00
4.22E+03	1.9861E+03	1.20E-02	2.0000E-01	2.1226E+00
4.02E+03	1.9732E+03	1.30E-02	2.1667E-01	2.0374E+00
3.84E+03	1.9605E+03	1.40E-02	2.3333E-01	1.9602E+00
3.68E+03	1.9480E+03	1.50E-02	2.5000E-01	1.8900E+00
3.53E+03	1.9357E+03	1.60E-02	2.6667E-01	1.8258E+00
3.40E+03	1.9236E+03	1.70E-02	2.8333E-01	1.7670E+00
3.27E+03	1.9117E+03	1.80E-02	3.0000E-01	1.7126E+00
3.16E+03	1.8999E+03	1.90E-02	3.1667E-01	1.6619E+00
3.05E+03	1.8884E+03	2.00E-02	3.3333E-01	1.6142E+00
2.95E+03	1.8770E+03	2.10E-02	3.5000E-01	1.5695E+00
2.85E+03	1.8658E+03	2.20E-02	3.6667E-01	1.5272E+00
2.76E+03	1.8547E+03	2.30E-02	3.8333E-01	1.4873E+00
2.67E+03	1.8439E+03	2.40E-02	4.0000E-01	1.4491E+00
2.59E+03	1.8332E+03	2.50E-02	4.1667E-01	1.4129E+00
2.51E+03	1.8226E+03	2.60E-02	4.3333E-01	1.3779E+00
2.44E+03	1.8122E+03	2.70E-02	4.5000E-01	1.3441E+00
2.36E+03	1.8020E+03	2.80E-02	4.6667E-01	1.3111E+00
2.29E+03	1.7919E+03	2.90E-02	4.8333E-01	1.2792E+00
2.22E+03	1.7819E+03	3.00E-02	5.0000E-01	1.2477E+00
2.16E+03	1.7721E+03	3.10E-02	5.1667E-01	1.2170E+00
2.09E+03	1.7625E+03	3.20E-02	5.3333E-01	1.1866E+00
2.03E+03	1.7530E+03	3.30E-02	5.5000E-01	1.1570E+00
1.97E+03	1.7436E+03	3.40E-02	5.6667E-01	1.1275E+00
1.90E+03	1.7343E+03	3.50E-02	5.8333E-01	1.0981E+00
1.84E+03	1.7252E+03	3.60E-02	6.0000E-01	1.0684E+00
1.78E+03	1.7162E+03	3.70E-02	6.1667E-01	1.0390E+00
1.72E+03	1.7073E+03	3.80E-02	6.3333E-01	1.0092E+00
1.66E+03	1.6986E+03	3.90E-02	6.5000E-01	9.7968E-01
1.60E+03	1.6900E+03	4.00E-02	6.6667E-01	9.4965E-01
1.55E+03	1681.49081	4.10E-02	6.8333E-01	9.1926E-01
1.49E+03	1673.10963	4.20E-02	7.0000E-01	8.8827E-01
1.43E+03	1664.84352	4.30E-02	7.1667E-01	8.5693E-01
1.37E+03	1656.69038	4.40E-02	7.3333E-01	8.2487E-01
1.31E+03	1648.64817	4.50E-02	7.5000E-01	7.9231E-01
1.25E+03	1640.71488	4.60E-02	7.6667E-01	7.5889E-01
1.18E+03	1632.88856	4.70E-02	7.8333E-01	7.2495E-01
1.12E+03	1625.16728	4.80E-02	8.0000E-01	6.9000E-01
1.06E+03	1617.54919	4.90E-02	8.1667E-01	6.5413E-01
9.94E+02	1610.03245	5.00E-02	8.3333E-01	6.1711E-01
9.28E+02	1602.61526	5.10E-02	8.5000E-01	5.7914E-01

8.61E+02	1595.29588	5.20E-02	8.6667E-01	5.3984E-01
7.93E+02	1588.0726	5.30E-02	8.8333E-01	4.9954E-01
7.24E+02	1580.94374	5.40E-02	9.0000E-01	4.5774E-01
6.53E+02	1573.90767	5.50E-02	9.1667E-01	4.1457E-01
5.79E+02	1566.96277	5.60E-02	9.3333E-01	3.6972E-01
5.05E+02	1560.10748	5.70E-02	9.5000E-01	3.2350E-01
4.28E+02	1553.34027	5.80E-02	9.6667E-01	2.7537E-01
3.49E+02	1546.65964	5.90E-02	9.8333E-01	2.2553E-01
2.67E+02	1540.0641	6.00E-02	1.0000E+00	1.7358E-01

**OBSERVAÇÕES:**

1 - raio externo = 0.235 m / raio interno = 0.155 m
2 - $p_i=1000\text{MPa}$
3 - $\sigma_\Theta$ = tensão calculada pela equação 11
4 - $\sigma_{P1}$ no MEF = tensão tangencial
5 - cálculo ao longo da espessura do tubo

## APÊNDICE IV

**Tubo com Descontinuidade:** Avaliação do Concentrador de Tensão na Tubulação Devido a Pressão Interna ( $a/w = 0,05, 0,1, 0,15, 0,2$  e  $0,25$ ) - Figura 4.9.

$(a/w)=x$	$K_T$ (MEF)	$K_T$ (Equação do gráfico de $K_T$ )	ERRO% ( $K_T$ )
0.05	3.9285	3.9282	0.008718
0.10	4.0323	4.0320	0.007887
0.15	4.2431	4.2427	0.008855
0.20	4.5336	4.5332	0.008824
0.25	4.8782	4.8778	0.008425

**OBSERVAÇÃO:**

1 - O concentrador de tensão para cada caso corresponde a razão da máxima tensão  $\sigma_{P1}$  calculada via MEF pela tensão  $\sigma_\Theta$  encontrada via equação 11 do presente trabalho. Para cálculo de  $K_T$  (MEF) da tabela anterior vide valor máximo da razão  $\sigma_{P1}/\sigma_\Theta$  do Apêndice III.

## APÊNDICE V

**Tubo com Descontinuidade:** Estudo Devido ao Gradiente de Temperatura  
( $a/w = 0,05, 0,1, 0,15, 0,2$  e  $0,25$ ) – Convecção: MEF – Figura 4.11.

Tubo Perfeito (TP)
--------------------

temperatura (°C)	distância p/ TP (m)	distância p/ TP / espessura	distância / distância_max_TP	temperatura/ temperatura_ ambiente
5.496E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.0000E+00	1.8322E+01
5.457E+02	5.000E-03	6.250E-02	6.2500E-02	1.8191E+01
5.419E+02	1.000E-02	1.250E-01	1.2500E-01	1.8065E+01
5.383E+02	1.500E-02	1.875E-01	1.8750E-01	1.7942E+01
5.347E+02	2.000E-02	2.500E-01	2.5000E-01	1.7823E+01
5.312E+02	2.500E-02	3.125E-01	3.1250E-01	1.7707E+01
5.278E+02	3.000E-02	3.750E-01	3.7500E-01	1.7595E+01
5.246E+02	3.500E-02	4.375E-01	4.3750E-01	1.7485E+01
5.214E+02	4.000E-02	5.000E-01	5.0000E-01	1.7379E+01
5.182E+02	4.500E-02	5.625E-01	5.6250E-01	1.7275E+01
5.152E+02	5.000E-02	6.250E-01	6.2500E-01	1.7173E+01
5.122E+02	5.500E-02	6.875E-01	6.8750E-01	1.7074E+01
5.093E+02	6.000E-02	7.500E-01	7.5000E-01	1.6978E+01
5.065E+02	6.500E-02	8.125E-01	8.1250E-01	1.6883E+01
5.037E+02	7.000E-02	8.750E-01	8.7500E-01	1.6791E+01
5.010E+02	7.500E-02	9.375E-01	9.3750E-01	1.6701E+01
4.984E+02	8.000E-02	1.000E+00	1.0000E+00	1.6612E+01

0.05
------

temperatura (°C)	distância p/0.05 (m)	distância p/0.05/ espessura	distância/ distância_max_0.05	temperatura/ temperatura_ ambiente
5.493E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.0000E+00	1.8310E+01
5.481E+02	1.000E-03	1.250E-02	1.3158E-02	1.8268E+01
5.469E+02	2.000E-03	2.500E-02	2.6316E-02	1.8231E+01
5.459E+02	3.000E-03	3.750E-02	3.9474E-02	1.8197E+01
5.449E+02	4.000E-03	5.000E-02	5.2632E-02	1.8165E+01
5.440E+02	5.000E-03	6.250E-02	6.5789E-02	1.8134E+01
5.432E+02	6.000E-03	7.500E-02	7.8947E-02	1.8105E+01
5.423E+02	7.000E-03	8.750E-02	9.2105E-02	1.8077E+01

5.415E+02	8.000E-03	1.000E-01	1.0526E-01	1.8050E+01
5.407E+02	9.000E-03	1.125E-01	1.1842E-01	1.8023E+01
5.399E+02	1.000E-02	1.250E-01	1.3158E-01	1.7996E+01
5.391E+02	1.100E-02	1.375E-01	1.4474E-01	1.7970E+01
5.383E+02	1.200E-02	1.500E-01	1.5789E-01	1.7945E+01
5.376E+02	1.300E-02	1.625E-01	1.7105E-01	1.7919E+01
5.368E+02	1.400E-02	1.750E-01	1.8421E-01	1.7894E+01
5.361E+02	1.500E-02	1.875E-01	1.9737E-01	1.7869E+01
5.353E+02	1.600E-02	2.000E-01	2.1053E-01	1.7845E+01
5.346E+02	1.700E-02	2.125E-01	2.2368E-01	1.7821E+01
5.339E+02	1.800E-02	2.250E-01	2.3684E-01	1.7796E+01
5.332E+02	1.900E-02	2.375E-01	2.5000E-01	1.7773E+01
5.325E+02	2.000E-02	2.500E-01	2.6316E-01	1.7749E+01
5.318E+02	2.100E-02	2.625E-01	2.7632E-01	1.7725E+01
5.311E+02	2.200E-02	2.750E-01	2.8947E-01	1.7702E+01
5.304E+02	2.300E-02	2.875E-01	3.0263E-01	1.7679E+01
5.297E+02	2.400E-02	3.000E-01	3.1579E-01	1.7656E+01
5.290E+02	2.500E-02	3.125E-01	3.2895E-01	1.7633E+01
5.283E+02	2.600E-02	3.250E-01	3.4211E-01	1.7610E+01
5.276E+02	2.700E-02	3.375E-01	3.5526E-01	1.7588E+01
5.270E+02	2.800E-02	3.500E-01	3.6842E-01	1.7565E+01
5.263E+02	2.900E-02	3.625E-01	3.8158E-01	1.7543E+01
5.256E+02	3.000E-02	3.750E-01	3.9474E-01	1.7521E+01
5.250E+02	3.100E-02	3.875E-01	4.0789E-01	1.7499E+01
5.243E+02	3.200E-02	4.000E-01	4.2105E-01	1.7477E+01
5.237E+02	3.300E-02	4.125E-01	4.3421E-01	1.7456E+01
5.230E+02	3.400E-02	4.250E-01	4.4737E-01	1.7434E+01
5.224E+02	3.500E-02	4.375E-01	4.6053E-01	1.7412E+01
5.217E+02	3.600E-02	4.500E-01	4.7368E-01	1.7391E+01
5.211E+02	3.700E-02	4.625E-01	4.8684E-01	1.7370E+01
5.205E+02	3.800E-02	4.750E-01	5.0000E-01	1.7349E+01
5.198E+02	3.900E-02	4.875E-01	5.1316E-01	1.7328E+01
5.192E+02	4.000E-02	5.000E-01	5.2632E-01	1.7307E+01
5.186E+02	4.100E-02	5.125E-01	5.3947E-01	1.7286E+01
5.180E+02	4.200E-02	5.250E-01	5.5263E-01	1.7266E+01
5.174E+02	4.300E-02	5.375E-01	5.6579E-01	1.7245E+01
5.167E+02	4.400E-02	5.500E-01	5.7895E-01	1.7225E+01
5.161E+02	4.500E-02	5.625E-01	5.9211E-01	1.7204E+01
5.155E+02	4.600E-02	5.750E-01	6.0526E-01	1.7184E+01
5.149E+02	4.700E-02	5.875E-01	6.1842E-01	1.7164E+01
5.143E+02	4.800E-02	6.000E-01	6.3158E-01	1.7144E+01
5.137E+02	4.900E-02	6.125E-01	6.4474E-01	1.7124E+01
5.131E+02	5.000E-02	6.250E-01	6.5789E-01	1.7104E+01
5.125E+02	5.100E-02	6.375E-01	6.7105E-01	1.7085E+01
5.119E+02	5.200E-02	6.500E-01	6.8421E-01	1.7065E+01
5.114E+02	5.300E-02	6.625E-01	6.9737E-01	1.7045E+01

5.108E+02	5.400E-02	6.750E-01	7.1053E-01	1.7026E+01
5.102E+02	5.500E-02	6.875E-01	7.2368E-01	1.7007E+01
5.096E+02	5.600E-02	7.000E-01	7.3684E-01	1.6988E+01
5.091E+02	5.700E-02	7.125E-01	7.5000E-01	1.6968E+01
5.085E+02	5.800E-02	7.250E-01	7.6316E-01	1.6949E+01
5.079E+02	5.900E-02	7.375E-01	7.7632E-01	1.6930E+01
5.073E+02	6.000E-02	7.500E-01	7.8947E-01	1.6912E+01
5.068E+02	6.100E-02	7.625E-01	8.0263E-01	1.6893E+01
5.062E+02	6.200E-02	7.750E-01	8.1579E-01	1.6874E+01
5.057E+02	6.300E-02	7.875E-01	8.2895E-01	1.6856E+01
5.051E+02	6.400E-02	8.000E-01	8.4211E-01	1.6837E+01
5.046E+02	6.500E-02	8.125E-01	8.5526E-01	1.6819E+01
5.040E+02	6.600E-02	8.250E-01	8.6842E-01	1.6800E+01
5.035E+02	6.700E-02	8.375E-01	8.8158E-01	1.6782E+01
5.029E+02	6.800E-02	8.500E-01	8.9474E-01	1.6764E+01
5.024E+02	6.900E-02	8.625E-01	9.0789E-01	1.6746E+01
5.018E+02	7.000E-02	8.750E-01	9.2105E-01	1.6728E+01
5.013E+02	7.100E-02	8.875E-01	9.3421E-01	1.6710E+01
5.008E+02	7.200E-02	9.000E-01	9.4737E-01	1.6692E+01
5.002E+02	7.300E-02	9.125E-01	9.6053E-01	1.6674E+01
4.997E+02	7.400E-02	9.250E-01	9.7368E-01	1.6657E+01
4.992E+02	7.500E-02	9.375E-01	9.8684E-01	1.6639E+01
4.986E+02	7.600E-02	9.500E-01	1.0000E+00	1.6621E+01

0.1

temperatura (°C)	distância p/0.1 (m)	distância p/0.1/ espessura	distância/ distância_max_0.1	temperatura/ temperatura_ ambiente
5.494E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.0000E+00	1.8312E+01
5.480E+02	1.000E-03	1.250E-02	1.3889E-02	1.8266E+01
5.467E+02	2.000E-03	2.500E-02	2.7778E-02	1.8225E+01
5.456E+02	3.000E-03	3.750E-02	4.1667E-02	1.8187E+01
5.445E+02	4.000E-03	5.000E-02	5.5556E-02	1.8151E+01
5.435E+02	5.000E-03	6.250E-02	6.9444E-02	1.8117E+01
5.425E+02	6.000E-03	7.500E-02	8.3333E-02	1.8084E+01
5.416E+02	7.000E-03	8.750E-02	9.7222E-02	1.8053E+01
5.407E+02	8.000E-03	1.000E-01	1.1111E-01	1.8022E+01
5.398E+02	9.000E-03	1.125E-01	1.2500E-01	1.7993E+01
5.389E+02	1.000E-02	1.250E-01	1.3889E-01	1.7964E+01
5.381E+02	1.100E-02	1.375E-01	1.5278E-01	1.7936E+01
5.373E+02	1.200E-02	1.500E-01	1.6667E-01	1.7909E+01
5.365E+02	1.300E-02	1.625E-01	1.8056E-01	1.7882E+01
5.357E+02	1.400E-02	1.750E-01	1.9444E-01	1.7855E+01
5.349E+02	1.500E-02	1.875E-01	2.0833E-01	1.7829E+01

5.341E+02	1.600E-02	2.000E-01	2.222E-01	1.7804E+01
5.333E+02	1.700E-02	2.125E-01	2.3611E-01	1.7778E+01
5.326E+02	1.800E-02	2.250E-01	2.5000E-01	1.7753E+01
5.319E+02	1.900E-02	2.375E-01	2.6389E-01	1.7728E+01
5.311E+02	2.000E-02	2.500E-01	2.7778E-01	1.7704E+01
5.304E+02	2.100E-02	2.625E-01	2.9167E-01	1.7680E+01
5.297E+02	2.200E-02	2.750E-01	3.0556E-01	1.7656E+01
5.290E+02	2.300E-02	2.875E-01	3.1944E-01	1.7632E+01
5.283E+02	2.400E-02	3.000E-01	3.3333E-01	1.7609E+01
5.276E+02	2.500E-02	3.125E-01	3.4722E-01	1.7585E+01
5.269E+02	2.600E-02	3.250E-01	3.6111E-01	1.7562E+01
5.262E+02	2.700E-02	3.375E-01	3.7500E-01	1.7540E+01
5.255E+02	2.800E-02	3.500E-01	3.8889E-01	1.7517E+01
5.248E+02	2.900E-02	3.625E-01	4.0278E-01	1.7494E+01
5.242E+02	3.000E-02	3.750E-01	4.1667E-01	1.7472E+01
5.235E+02	3.100E-02	3.875E-01	4.3056E-01	1.7450E+01
5.228E+02	3.200E-02	4.000E-01	4.4444E-01	1.7428E+01
5.222E+02	3.300E-02	4.125E-01	4.5833E-01	1.7406E+01
5.215E+02	3.400E-02	4.250E-01	4.7222E-01	1.7384E+01
5.209E+02	3.500E-02	4.375E-01	4.8611E-01	1.7363E+01
5.202E+02	3.600E-02	4.500E-01	5.0000E-01	1.7341E+01
5.196E+02	3.700E-02	4.625E-01	5.1389E-01	1.7320E+01
5.190E+02	3.800E-02	4.750E-01	5.2778E-01	1.7299E+01
5.183E+02	3.900E-02	4.875E-01	5.4167E-01	1.7278E+01
5.177E+02	4.000E-02	5.000E-01	5.5556E-01	1.7257E+01
5.171E+02	4.100E-02	5.125E-01	5.6944E-01	1.7237E+01
5.165E+02	4.200E-02	5.250E-01	5.8333E-01	1.7216E+01
5.159E+02	4.300E-02	5.375E-01	5.9722E-01	1.7195E+01
5.153E+02	4.400E-02	5.500E-01	6.1111E-01	1.7175E+01
5.146E+02	4.500E-02	5.625E-01	6.2500E-01	1.7155E+01
5.140E+02	4.600E-02	5.750E-01	6.3889E-01	1.7135E+01
5.134E+02	4.700E-02	5.875E-01	6.5278E-01	1.7115E+01
5.128E+02	4.800E-02	6.000E-01	6.6667E-01	1.7095E+01
5.123E+02	4.900E-02	6.125E-01	6.8056E-01	1.7075E+01
5.117E+02	5.000E-02	6.250E-01	6.9444E-01	1.7055E+01
5.111E+02	5.100E-02	6.375E-01	7.0833E-01	1.7036E+01
5.105E+02	5.200E-02	6.500E-01	7.2222E-01	1.7017E+01
5.099E+02	5.300E-02	6.625E-01	7.3611E-01	1.6997E+01
5.093E+02	5.400E-02	6.750E-01	7.5000E-01	1.6978E+01
5.088E+02	5.500E-02	6.875E-01	7.6389E-01	1.6959E+01
5.082E+02	5.600E-02	7.000E-01	7.7778E-01	1.6940E+01
5.076E+02	5.700E-02	7.125E-01	7.9167E-01	1.6921E+01
5.071E+02	5.800E-02	7.250E-01	8.0556E-01	1.6902E+01
5.065E+02	5.900E-02	7.375E-01	8.1944E-01	1.6883E+01
5.059E+02	6.000E-02	7.500E-01	8.3333E-01	1.6865E+01
5.054E+02	6.100E-02	7.625E-01	8.4722E-01	1.6846E+01

5.048E+02	6.200E-02	7.750E-01	8.6111E-01	1.6828E+01
5.043E+02	6.300E-02	7.875E-01	8.7500E-01	1.6809E+01
5.037E+02	6.400E-02	8.000E-01	8.8889E-01	1.6791E+01
5.032E+02	6.500E-02	8.125E-01	9.0278E-01	1.6773E+01
5.026E+02	6.600E-02	8.250E-01	9.1667E-01	1.6755E+01
5.021E+02	6.700E-02	8.375E-01	9.3056E-01	1.6737E+01
5.016E+02	6.800E-02	8.500E-01	9.4444E-01	1.6719E+01
5.010E+02	6.900E-02	8.625E-01	9.5833E-01	1.6701E+01
5.005E+02	7.000E-02	8.750E-01	9.7222E-01	1.6683E+01
5.000E+02	7.100E-02	8.875E-01	9.8611E-01	1.6666E+01
4.994E+02	7.200E-02	9.000E-01	1.0000E+00	1.6648E+01

0.15

temperatura (°C)	distância p/0.15 (m)	distância p/0.15/ espessura	distância/ distância_max_0.15	temperatura/ temperatura_ ambiente
5.494E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00	1.8312E+01
5.480E+02	1.000E-03	1.250E-02	1.4706E-02	1.8267E+01
5.467E+02	2.000E-03	2.500E-02	2.9412E-02	1.8225E+01
5.455E+02	3.000E-03	3.750E-02	4.4118E-02	1.8185E+01
5.444E+02	4.000E-03	5.000E-02	5.8824E-02	1.8147E+01
5.433E+02	5.000E-03	6.250E-02	7.3529E-02	1.8111E+01
5.423E+02	6.000E-03	7.500E-02	8.8235E-02	1.8077E+01
5.413E+02	7.000E-03	8.750E-02	1.0294E-01	1.8043E+01
5.403E+02	8.000E-03	1.000E-01	1.1765E-01	1.8011E+01
5.394E+02	9.000E-03	1.125E-01	1.3235E-01	1.7980E+01
5.385E+02	1.000E-02	1.250E-01	1.4706E-01	1.7950E+01
5.376E+02	1.100E-02	1.375E-01	1.6176E-01	1.7920E+01
5.367E+02	1.200E-02	1.500E-01	1.7647E-01	1.7891E+01
5.359E+02	1.300E-02	1.625E-01	1.9118E-01	1.7863E+01
5.351E+02	1.400E-02	1.750E-01	2.0588E-01	1.7835E+01
5.342E+02	1.500E-02	1.875E-01	2.2059E-01	1.7808E+01
5.334E+02	1.600E-02	2.000E-01	2.3529E-01	1.7781E+01
5.326E+02	1.700E-02	2.125E-01	2.5000E-01	1.7755E+01
5.319E+02	1.800E-02	2.250E-01	2.6471E-01	1.7729E+01
5.311E+02	1.900E-02	2.375E-01	2.7941E-01	1.7704E+01
5.303E+02	2.000E-02	2.500E-01	2.9412E-01	1.7678E+01
5.296E+02	2.100E-02	2.625E-01	3.0882E-01	1.7653E+01
5.289E+02	2.200E-02	2.750E-01	3.2353E-01	1.7629E+01
5.281E+02	2.300E-02	2.875E-01	3.3824E-01	1.7605E+01
5.274E+02	2.400E-02	3.000E-01	3.5294E-01	1.7580E+01
5.267E+02	2.500E-02	3.125E-01	3.6765E-01	1.7557E+01
5.260E+02	2.600E-02	3.250E-01	3.8235E-01	1.7533E+01



5.253E+02	2.700E-02	3.375E-01	3.9706E-01	1.7510E+01
5.246E+02	2.800E-02	3.500E-01	4.1176E-01	1.7487E+01
5.239E+02	2.900E-02	3.625E-01	4.2647E-01	1.7464E+01
5.232E+02	3.000E-02	3.750E-01	4.4118E-01	1.7441E+01
5.226E+02	3.100E-02	3.875E-01	4.5588E-01	1.7419E+01
5.219E+02	3.200E-02	4.000E-01	4.7059E-01	1.7397E+01
5.212E+02	3.300E-02	4.125E-01	4.8529E-01	1.7375E+01
5.206E+02	3.400E-02	4.250E-01	5.0000E-01	1.7353E+01
5.199E+02	3.500E-02	4.375E-01	5.1471E-01	1.7331E+01
5.193E+02	3.600E-02	4.500E-01	5.2941E-01	1.7310E+01
5.186E+02	3.700E-02	4.625E-01	5.4412E-01	1.7288E+01
5.180E+02	3.800E-02	4.750E-01	5.5882E-01	1.7267E+01
5.174E+02	3.900E-02	4.875E-01	5.7353E-01	1.7246E+01
5.168E+02	4.000E-02	5.000E-01	5.8824E-01	1.7225E+01
5.161E+02	4.100E-02	5.125E-01	6.0294E-01	1.7204E+01
5.155E+02	4.200E-02	5.250E-01	6.1765E-01	1.7184E+01
5.149E+02	4.300E-02	5.375E-01	6.3235E-01	1.7163E+01
5.143E+02	4.400E-02	5.500E-01	6.4706E-01	1.7143E+01
5.137E+02	4.500E-02	5.625E-01	6.6176E-01	1.7123E+01
5.131E+02	4.600E-02	5.750E-01	6.7647E-01	1.7103E+01
5.125E+02	4.700E-02	5.875E-01	6.9118E-01	1.7083E+01
5.119E+02	4.800E-02	6.000E-01	7.0588E-01	1.7063E+01
5.113E+02	4.900E-02	6.125E-01	7.2059E-01	1.7043E+01
5.107E+02	5.000E-02	6.250E-01	7.3529E-01	1.7024E+01
5.101E+02	5.100E-02	6.375E-01	7.5000E-01	1.7005E+01
5.096E+02	5.200E-02	6.500E-01	7.6471E-01	1.6985E+01
5.090E+02	5.300E-02	6.625E-01	7.7941E-01	1.6966E+01
5.084E+02	5.400E-02	6.750E-01	7.9412E-01	1.6947E+01
5.078E+02	5.500E-02	6.875E-01	8.0882E-01	1.6928E+01
5.073E+02	5.600E-02	7.000E-01	8.2353E-01	1.6909E+01
5.067E+02	5.700E-02	7.125E-01	8.3824E-01	1.6890E+01
5.062E+02	5.800E-02	7.250E-01	8.5294E-01	1.6872E+01
5.056E+02	5.900E-02	7.375E-01	8.6765E-01	1.6853E+01
5.050E+02	6.000E-02	7.500E-01	8.8235E-01	1.6835E+01
5.045E+02	6.100E-02	7.625E-01	8.9706E-01	1.6817E+01
5.040E+02	6.200E-02	7.750E-01	9.1176E-01	1.6798E+01
5.034E+02	6.300E-02	7.875E-01	9.2647E-01	1.6780E+01
5.029E+02	6.400E-02	8.000E-01	9.4118E-01	1.6762E+01
5.023E+02	6.500E-02	8.125E-01	9.5588E-01	1.6744E+01
5.018E+02	6.600E-02	8.250E-01	9.7059E-01	1.6727E+01
5.013E+02	6.700E-02	8.375E-01	9.8529E-01	1.6709E+01
5.007E+02	6.800E-02	8.500E-01	1.0000E+00	1.6691E+01

## 0.2

temperatura (°C)	distância p/0.2 (m)	distância p/0.2/ espessura	distância/ distância_max_0.2	temperatura/ temperatura_ ambiente
5.494E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.0000E+00	1.8313E+01
5.474E+02	1.524E-03	1.905E-02	2.3810E-02	1.8246E+01
5.455E+02	3.048E-03	3.810E-02	4.7619E-02	1.8185E+01
5.438E+02	4.571E-03	5.714E-02	7.1429E-02	1.8127E+01
5.422E+02	6.095E-03	7.619E-02	9.5238E-02	1.8073E+01
5.406E+02	7.619E-03	9.524E-02	1.1905E-01	1.8021E+01
5.392E+02	9.143E-03	1.143E-01	1.4286E-01	1.7972E+01
5.377E+02	1.067E-02	1.333E-01	1.6667E-01	1.7925E+01
5.364E+02	1.219E-02	1.524E-01	1.9048E-01	1.7879E+01
5.351E+02	1.371E-02	1.714E-01	2.1429E-01	1.7835E+01
5.338E+02	1.524E-02	1.905E-01	2.3810E-01	1.7792E+01
5.325E+02	1.676E-02	2.095E-01	2.6190E-01	1.7751E+01
5.313E+02	1.829E-02	2.286E-01	2.8571E-01	1.7710E+01
5.301E+02	1.981E-02	2.476E-01	3.0952E-01	1.7671E+01
5.290E+02	2.133E-02	2.667E-01	3.3333E-01	1.7632E+01
5.278E+02	2.286E-02	2.857E-01	3.5714E-01	1.7594E+01
5.267E+02	2.438E-02	3.048E-01	3.8095E-01	1.7557E+01
5.256E+02	2.590E-02	3.238E-01	4.0476E-01	1.7520E+01
5.245E+02	2.743E-02	3.429E-01	4.2857E-01	1.7484E+01
5.235E+02	2.895E-02	3.619E-01	4.5238E-01	1.7449E+01
5.224E+02	3.048E-02	3.810E-01	4.7619E-01	1.7414E+01
5.214E+02	3.200E-02	4.000E-01	5.0000E-01	1.7380E+01
5.204E+02	3.352E-02	4.190E-01	5.2381E-01	1.7346E+01
5.194E+02	3.505E-02	4.381E-01	5.4762E-01	1.7313E+01
5.184E+02	3.657E-02	4.571E-01	5.7143E-01	1.7280E+01
5.174E+02	3.810E-02	4.762E-01	5.9524E-01	1.7248E+01
5.165E+02	3.962E-02	4.952E-01	6.1905E-01	1.7216E+01
5.155E+02	4.114E-02	5.143E-01	6.4286E-01	1.7184E+01
5.146E+02	4.267E-02	5.333E-01	6.6667E-01	1.7153E+01
5.137E+02	4.419E-02	5.524E-01	6.9048E-01	1.7122E+01
5.127E+02	4.571E-02	5.714E-01	7.1429E-01	1.7091E+01
5.118E+02	4.724E-02	5.905E-01	7.3810E-01	1.7061E+01
5.109E+02	4.876E-02	6.095E-01	7.6190E-01	1.7031E+01
5.101E+02	5.029E-02	6.286E-01	7.8571E-01	1.7002E+01
5.092E+02	5.181E-02	6.476E-01	8.0952E-01	1.6972E+01
5.083E+02	5.333E-02	6.667E-01	8.3333E-01	1.6944E+01
5.074E+02	5.486E-02	6.857E-01	8.5714E-01	1.6915E+01
5.066E+02	5.638E-02	7.048E-01	8.8095E-01	1.6887E+01
5.058E+02	5.790E-02	7.238E-01	9.0476E-01	1.6858E+01
5.049E+02	5.943E-02	7.429E-01	9.2857E-01	1.6831E+01
5.041E+02	6.095E-02	7.619E-01	9.5238E-01	1.6803E+01

5.033E+02	6.248E-02	7.810E-01	9.7619E-01	1.6776E+01
5.025E+02	6.400E-02	8.000E-01	1.0000E+00	1.6749E+01

0.25

temperatura (°C)	distância p/0.25 (m)	distância p/0.25/ espessura	distância/ distância_max_0.25	temperatura/ temperatura_ ambiente
5.494E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.0000E+00	1.8314E+01
5.475E+02	1.500E-03	1.875E-02	2.5000E-02	1.8249E+01
5.457E+02	3.000E-03	3.750E-02	5.0000E-02	1.8189E+01
5.440E+02	4.500E-03	5.625E-02	7.5000E-02	1.8133E+01
5.424E+02	6.000E-03	7.500E-02	1.0000E-01	1.8079E+01
5.408E+02	7.500E-03	9.375E-02	1.2500E-01	1.8027E+01
5.393E+02	9.000E-03	1.125E-01	1.5000E-01	1.7978E+01
5.379E+02	1.050E-02	1.313E-01	1.7500E-01	1.7931E+01
5.366E+02	1.200E-02	1.500E-01	2.0000E-01	1.7885E+01
5.352E+02	1.350E-02	1.688E-01	2.2500E-01	1.7841E+01
5.339E+02	1.500E-02	1.875E-01	2.5000E-01	1.7798E+01
5.327E+02	1.650E-02	2.063E-01	2.7500E-01	1.7756E+01
5.315E+02	1.800E-02	2.250E-01	3.0000E-01	1.7716E+01
5.303E+02	1.950E-02	2.438E-01	3.2500E-01	1.7676E+01
5.291E+02	2.100E-02	2.625E-01	3.5000E-01	1.7637E+01
5.280E+02	2.250E-02	2.813E-01	3.7500E-01	1.7599E+01
5.269E+02	2.400E-02	3.000E-01	4.0000E-01	1.7562E+01
5.258E+02	2.550E-02	3.188E-01	4.2500E-01	1.7525E+01
5.247E+02	2.700E-02	3.375E-01	4.5000E-01	1.7490E+01
5.236E+02	2.850E-02	3.563E-01	4.7500E-01	1.7454E+01
5.226E+02	3.000E-02	3.750E-01	5.0000E-01	1.7420E+01
5.216E+02	3.150E-02	3.938E-01	5.2500E-01	1.7386E+01
5.206E+02	3.300E-02	4.125E-01	5.5000E-01	1.7352E+01
5.196E+02	3.450E-02	4.313E-01	5.7500E-01	1.7319E+01
5.186E+02	3.600E-02	4.500E-01	6.0000E-01	1.7287E+01
5.176E+02	3.750E-02	4.688E-01	6.2500E-01	1.7255E+01
5.167E+02	3.900E-02	4.875E-01	6.5000E-01	1.7223E+01
5.158E+02	4.050E-02	5.063E-01	6.7500E-01	1.7192E+01
5.148E+02	4.200E-02	5.250E-01	7.0000E-01	1.7161E+01
5.139E+02	4.350E-02	5.438E-01	7.2500E-01	1.7131E+01
5.130E+02	4.500E-02	5.625E-01	7.5000E-01	1.7101E+01
5.121E+02	4.650E-02	5.813E-01	7.7500E-01	1.7071E+01
5.113E+02	4.800E-02	6.000E-01	8.0000E-01	1.7042E+01
5.104E+02	4.950E-02	6.188E-01	8.2500E-01	1.7013E+01
5.095E+02	5.100E-02	6.375E-01	8.5000E-01	1.6985E+01
5.087E+02	5.250E-02	6.563E-01	8.7500E-01	1.6956E+01

5.079E+02	5.400E-02	6.750E-01	9.0000E-01	1.6928E+01
5.070E+02	5.550E-02	6.938E-01	9.2500E-01	1.6901E+01
5.062E+02	5.700E-02	7.125E-01	9.5000E-01	1.6873E+01
5.054E+02	5.850E-02	7.313E-01	9.7500E-01	1.6846E+01
5.046E+02	6.000E-02	7.500E-01	1.0000E+00	1.6820E+01

**OBSERVAÇÕES:**

1 - raio externo = 0.235 m / raio interno = 0.155 m
2 - $T_i=550^{\circ}\text{C}$ / $T_o=30^{\circ}\text{C}$ / $\Delta T=T_i-T_o=520^{\circ}\text{C}=520\text{K}$ / $h_e=15$ (W/m <sup>2</sup> K) / $h_i=30000$ (W/m <sup>2</sup> K)
3 - cálculo ao longo da espessura do tubo

## APÊNDICE VI

**Tubo com Descontinuidade:** Avaliação das tensões térmicas ( $a/w = 0,05, 0,1, 0,15, 0,2$  e  $0,25$ ) – Tabela 4.1.

0.05

espessura (m) ao longo do tubo p/ TP (8 cm)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura total de 8 cm) - Pa (t=infinito)	espessura ao longo do tubo p/0.05 (m)	pico de tensão (Sigma_P1) do tubo defeituoso - Pa (t=15s)	tensão estabilizada do tubo defeituoso (Sigma_P1) - Pa (t=infinito)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura residual de cada defeito) - Pa (t=infinito)
0.0000E+00	-2.1284E+07	0.0000E+00	-1.9330E+08	-5.6940E+07	-2.0094E+07
5.0000E-03	-1.7840E+07	1.0000E-03	-2.1022E+07	-3.7878E+07	-1.9396E+07
1.0000E-02	-1.4573E+07	2.0000E-03	-8.1491E+07	-2.7885E+07	-1.8706E+07
1.5000E-02	-1.1555E+07	3.0000E-03	-3.0601E+07	-2.3642E+07	-1.8027E+07
2.0000E-02	-8.6785E+06	4.0000E-03	-3.9676E+07	-2.0584E+07	-1.7356E+07
2.5000E-02	-6.0015E+06	5.0000E-03	-3.0415E+07	-1.8727E+07	-1.6695E+07
3.0000E-02	-3.4404E+06	6.0000E-03	-2.8726E+07	-1.7200E+07	-1.6041E+07
3.5000E-02	-1.0465E+06	7.0000E-03	-2.4801E+07	-1.6021E+07	-1.5398E+07
4.0000E-02	1.2533E+06	8.0000E-03	-2.3424E+07	-1.4983E+07	-1.4762E+07
4.5000E-02	3.4153E+06	9.0000E-03	-2.2740E+07	-1.4084E+07	-1.4135E+07
5.0000E-02	5.4976E+06	1.0000E-02	-2.2384E+07	-1.3245E+07	-1.3515E+07
5.5000E-02	7.4642E+06	1.1000E-02	-2.1058E+07	-1.2485E+07	-1.2905E+07
6.0000E-02	9.3634E+06	1.2000E-02	-1.9955E+07	-1.1775E+07	-1.2300E+07
6.5000E-02	1.1164E+07	1.3000E-02	-2.1010E+07	-1.1127E+07	-1.1705E+07
7.0000E-02	1.2907E+07	1.4000E-02	-1.8756E+07	-1.0474E+07	-1.1116E+07

7.5000E-02	1.4566E+07	1.5000E-02	-1.7595E+07	-9.8302E+06	-1.0535E+07
8.0000E-02	1.6175E+07	1.6000E-02	-1.7195E+07	-9.2001E+06	-9.9603E+06
		1.7000E-02	-1.5730E+07	-8.5935E+06	-9.3939E+06
		1.8000E-02	-1.5066E+07	-8.0012E+06	-8.8327E+06
		1.9000E-02	-1.3495E+07	-7.4334E+06	-8.2797E+06
		2.0000E-02	-1.2233E+07	-6.8736E+06	-7.7319E+06
		2.1000E-02	-1.1375E+07	-6.3185E+06	-7.1918E+06
		2.2000E-02	-1.0481E+07	-5.7683E+06	-6.6567E+06
		2.3000E-02	-9.4431E+06	-5.2302E+06	-6.1291E+06
		2.4000E-02	-8.7764E+06	-4.6998E+06	-5.6062E+06
		2.5000E-02	-7.5384E+06	-4.1833E+06	-5.0905E+06
		2.6000E-02	-6.3339E+06	-3.6718E+06	-4.5793E+06
		2.7000E-02	-5.3994E+06	-3.1642E+06	-4.0752E+06
		2.8000E-02	-4.6115E+06	-2.6593E+06	-3.5753E+06
		2.9000E-02	-3.6783E+06	-2.1592E+06	-3.0822E+06
		3.0000E-02	-2.9995E+06	-1.6668E+06	-2.5932E+06
		3.1000E-02	-2.2576E+06	-1.1899E+06	-2.1107E+06
		3.2000E-02	-1.2515E+06	-7.1174E+05	-1.6322E+06
		3.3000E-02	-2.7280E+05	-2.3843E+05	-1.1600E+06
		3.4000E-02	5.2738E+05	2.3109E+05	-6.9157E+05
		3.5000E-02	1.5189E+06	6.9373E+05	-2.2916E+05
		3.6000E-02	2.3627E+06	1.1526E+06	2.2952E+05
		3.7000E-02	3.3151E+06	1.6065E+06	6.8242E+05
		3.8000E-02	4.0964E+06	2.0569E+06	1.1317E+06
		3.9000E-02	5.0122E+06	2.5014E+06	1.5755E+06
		4.0000E-02	5.8070E+06	2.9423E+06	2.0157E+06
		4.1000E-02	6.7691E+06	3.3779E+06	2.4506E+06
		4.2000E-02	7.5240E+06	3.8104E+06	2.8822E+06
		4.3000E-02	8.4177E+06	4.2382E+06	3.3085E+06
		4.4000E-02	9.1782E+06	4.6630E+06	3.7316E+06
		4.5000E-02	1.0051E+07	5.0831E+06	4.1498E+06
		4.6000E-02	1.0795E+07	5.5002E+06	4.5648E+06
		4.7000E-02	1.1662E+07	5.9127E+06	4.9749E+06
		4.8000E-02	1.2394E+07	6.3224E+06	5.3820E+06
		4.9000E-02	1.3241E+07	6.7274E+06	5.7845E+06
		5.0000E-02	1.3989E+07	7.1297E+06	6.1840E+06
		5.1000E-02	1.4816E+07	7.5282E+06	6.5791E+06
		5.2000E-02	1.5530E+07	7.9242E+06	6.9713E+06
		5.3000E-02	1.6351E+07	8.3162E+06	7.3591E+06
		5.4000E-02	1.7057E+07	8.7057E+06	7.7442E+06
		5.5000E-02	1.7862E+07	9.0913E+06	8.1250E+06
		5.6000E-02	1.8565E+07	9.4746E+06	8.5033E+06
		5.7000E-02	1.9359E+07	9.8544E+06	8.8774E+06
		5.8000E-02	2.0044E+07	1.0232E+07	9.2489E+06
		5.9000E-02	2.0825E+07	1.0606E+07	9.6165E+06
		6.0000E-02	2.1503E+07	1.0979E+07	9.9816E+06

6.1000E-02	2.2272E+07	1.1347E+07	1.0343E+07
6.2000E-02	2.2972E+07	1.1714E+07	1.0702E+07
6.3000E-02	2.3681E+07	1.2077E+07	1.1057E+07
6.4000E-02	2.4372E+07	1.2439E+07	1.1410E+07
6.5000E-02	2.5111E+07	1.2798E+07	1.1759E+07
6.6000E-02	2.5766E+07	1.3155E+07	1.2106E+07
6.7000E-02	2.6504E+07	1.3510E+07	1.2449E+07
6.8000E-02	2.7153E+07	1.3863E+07	1.2791E+07
6.9000E-02	2.7880E+07	1.4213E+07	1.3128E+07
7.0000E-02	2.8523E+07	1.4562E+07	1.3464E+07
7.1000E-02	2.9241E+07	1.4908E+07	1.3797E+07
7.2000E-02	2.9878E+07	1.5253E+07	1.4127E+07
7.3000E-02	3.0579E+07	1.5596E+07	1.4454E+07
7.4000E-02	3.1223E+07	1.5937E+07	1.4779E+07
7.5000E-02	3.1915E+07	1.6277E+07	1.5101E+07
7.6000E-02	3.2545E+07	1.6615E+07	1.5421E+07

0.1

espessura (m) ao longo do tubo p/ TP (8 cm)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura total de 8 cm) - Pa (t=infinity)	espessura ao longo do tubo p/0.1 (m)	pico de tensão (Sigma_P1) do tubo defeituoso - Pa (t=15s)	tensão estabilizada do tubo defeituoso (Sigma_P1) - Pa (t=infinity)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura residual de cada defeito) - Pa (t=infinity)
0.0000E+00	-2.1284E+07	0.0000E+00	-1.1609E+08	-5.2949E+07	-1.8894E+07
5.0000E-03	-1.7840E+07	1.0000E-03	-7.8992E+07	-4.1743E+07	-1.8211E+07
1.0000E-02	-1.4573E+07	2.0000E-03	-6.2681E+07	-3.3786E+07	-1.7535E+07
1.5000E-02	-1.1555E+07	3.0000E-03	-5.2326E+07	-2.8781E+07	-1.6870E+07
2.0000E-02	-8.6785E+06	4.0000E-03	-4.7577E+07	-2.4963E+07	-1.6212E+07
2.5000E-02	-6.0015E+06	5.0000E-03	-3.6074E+07	-2.2141E+07	-1.5565E+07
3.0000E-02	-3.4404E+06	6.0000E-03	-3.7848E+07	-1.9791E+07	-1.4924E+07
3.5000E-02	-1.0465E+06	7.0000E-03	-3.0127E+07	-1.7962E+07	-1.4294E+07
4.0000E-02	1.2533E+06	8.0000E-03	-3.0030E+07	-1.6358E+07	-1.3671E+07
4.5000E-02	3.4153E+06	9.0000E-03	-2.6131E+07	-1.5020E+07	-1.3057E+07
5.0000E-02	5.4976E+06	1.0000E-02	-2.5478E+07	-1.3813E+07	-1.2449E+07
5.5000E-02	7.4642E+06	1.1000E-02	-2.1741E+07	-1.2774E+07	-1.1851E+07
6.0000E-02	9.3634E+06	1.2000E-02	-1.9842E+07	-1.1807E+07	-1.1259E+07
6.5000E-02	1.1164E+07	1.3000E-02	-1.8429E+07	-1.0918E+07	-1.0675E+07
7.0000E-02	1.2907E+07	1.4000E-02	-1.7693E+07	-1.0072E+07	-1.0098E+07
7.5000E-02	1.4566E+07	1.5000E-02	-1.5486E+07	-9.3005E+06	-9.5288E+06
8.0000E-02	1.6175E+07	1.6000E-02	-1.3459E+07	-8.5590E+06	-8.9652E+06
		1.7000E-02	-1.2607E+07	-7.8480E+06	-8.4100E+06

1.8000E-02	-1.1954E+07	-7.1526E+06	-7.8600E+06
1.9000E-02	-1.0907E+07	-6.4838E+06	-7.3179E+06
2.0000E-02	-1.0035E+07	-5.8429E+06	-6.7808E+06
2.1000E-02	-1.0059E+07	-5.2493E+06	-6.2514E+06
2.2000E-02	-8.4395E+06	-4.6529E+06	-5.7267E+06
2.3000E-02	-7.2398E+06	-4.0674E+06	-5.2095E+06
2.4000E-02	-6.3874E+06	-3.4910E+06	-4.6968E+06
2.5000E-02	-5.1692E+06	-2.9291E+06	-4.1912E+06
2.6000E-02	-4.2893E+06	-2.3765E+06	-3.6899E+06
2.7000E-02	-2.9906E+06	-1.8400E+06	-3.1956E+06
2.8000E-02	-1.8876E+06	-1.3100E+06	-2.7054E+06
2.9000E-02	-9.4229E+05	-7.8708E+05	-2.2218E+06
3.0000E-02	-9.3656E+04	-2.6958E+05	-1.7422E+06
3.1000E-02	9.1371E+05	2.3785E+05	-1.2690E+06
3.2000E-02	1.7637E+06	7.3937E+05	-7.9973E+05
3.3000E-02	2.7946E+06	1.2316E+06	-3.3651E+05
3.4000E-02	3.7644E+06	1.7190E+06	1.2293E+05
3.5000E-02	4.7120E+06	2.2006E+06	5.7651E+05
3.6000E-02	5.5357E+06	2.6786E+06	1.0265E+06
3.7000E-02	6.4617E+06	3.1513E+06	1.4708E+06
3.8000E-02	7.3128E+06	3.6185E+06	1.9115E+06
3.9000E-02	8.0435E+06	4.0742E+06	2.3469E+06
4.0000E-02	8.9772E+06	4.5304E+06	2.7788E+06
4.1000E-02	9.9126E+06	4.9825E+06	3.2055E+06
4.2000E-02	1.0710E+07	5.4313E+06	3.6289E+06
4.3000E-02	1.1639E+07	5.8753E+06	4.0473E+06
4.4000E-02	1.2438E+07	6.3164E+06	4.4625E+06
4.5000E-02	1.3337E+07	6.7529E+06	4.8728E+06
4.6000E-02	1.4121E+07	7.1866E+06	5.2800E+06
4.7000E-02	1.5007E+07	7.6153E+06	5.6825E+06
4.8000E-02	1.5836E+07	8.0416E+06	6.0821E+06
4.9000E-02	1.6694E+07	8.4651E+06	6.4771E+06
5.0000E-02	1.7468E+07	8.8865E+06	6.8692E+06
5.1000E-02	1.8323E+07	9.3046E+06	7.2570E+06
5.2000E-02	1.9090E+07	9.7206E+06	7.6419E+06
5.3000E-02	1.9935E+07	1.0134E+07	8.0226E+06
5.4000E-02	2.0696E+07	1.0545E+07	8.4006E+06
5.5000E-02	2.1533E+07	1.0954E+07	8.7745E+06
5.6000E-02	2.2287E+07	1.1361E+07	9.1458E+06
5.7000E-02	2.3113E+07	1.1765E+07	9.5131E+06
5.8000E-02	2.3883E+07	1.2168E+07	9.8779E+06
5.9000E-02	2.4693E+07	1.2569E+07	1.0239E+07
6.0000E-02	2.5442E+07	1.2969E+07	1.0597E+07
6.1000E-02	2.6248E+07	1.3368E+07	1.0952E+07
6.2000E-02	2.7008E+07	1.3765E+07	1.1304E+07
6.3000E-02	2.7807E+07	1.4162E+07	1.1653E+07

6.4000E-02	2.8555E+07	1.4558E+07	1.2000E+07
6.5000E-02	2.9350E+07	1.4952E+07	1.2342E+07
6.6000E-02	3.0103E+07	1.5347E+07	1.2683E+07
6.7000E-02	3.0889E+07	1.5741E+07	1.3020E+07
6.8000E-02	3.1650E+07	1.6134E+07	1.3356E+07
6.9000E-02	3.2432E+07	1.6528E+07	1.3687E+07
7.0000E-02	3.3191E+07	1.6922E+07	1.4017E+07
7.1000E-02	3.3963E+07	1.7316E+07	1.4344E+07
7.2000E-02	3.4730E+07	1.7710E+07	1.4668E+07

0.15

espessura (m) ao longo do tubo p/ TP (8 cm)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura total de 8 cm) - Pa (t=infinito)	espessura ao longo do tubo p/0.15 (m)	pico de tensão (Sigma_P1) do tubo defeituoso - Pa (t=15s)	tensão estabilizada do tubo defeituoso (Sigma_P1) - Pa (t=infinito)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura residual de cada defeito) - Pa (t=infinito)
0.0000E+00	-2.1284E+07	0.0000E+00	-1.2004E+08	-4.9811E+07	-1.7705E+07
5.0000E-03	-1.7840E+07	1.0000E-03	-6.7067E+07	-4.2040E+07	-1.7036E+07
1.0000E-02	-1.4573E+07	2.0000E-03	-8.3378E+07	-3.5837E+07	-1.6374E+07
1.5000E-02	-1.1555E+07	3.0000E-03	-5.4156E+07	-3.1270E+07	-1.5723E+07
2.0000E-02	-8.6785E+06	4.0000E-03	-5.8142E+07	-2.7437E+07	-1.5079E+07
2.5000E-02	-6.0015E+06	5.0000E-03	-4.4781E+07	-2.4473E+07	-1.4445E+07
3.0000E-02	-3.4404E+06	6.0000E-03	-4.2686E+07	-2.1892E+07	-1.3818E+07
3.5000E-02	-1.0465E+06	7.0000E-03	-3.5782E+07	-1.9792E+07	-1.3201E+07
4.0000E-02	1.2533E+06	8.0000E-03	-3.4789E+07	-1.7908E+07	-1.2590E+07
4.5000E-02	3.4153E+06	9.0000E-03	-2.9465E+07	-1.6303E+07	-1.1989E+07
5.0000E-02	5.4976E+06	1.0000E-02	-2.8918E+07	-1.4836E+07	-1.1394E+07
5.5000E-02	7.4642E+06	1.1000E-02	-2.4791E+07	-1.3549E+07	-1.0808E+07
6.0000E-02	9.3634E+06	1.2000E-02	-2.3741E+07	-1.2351E+07	-1.0228E+07
6.5000E-02	1.1164E+07	1.3000E-02	-2.0639E+07	-1.1280E+07	-9.6569E+06
7.0000E-02	1.2907E+07	1.4000E-02	-1.8857E+07	-1.0267E+07	-9.0911E+06
7.5000E-02	1.4566E+07	1.5000E-02	-1.6833E+07	-9.3310E+06	-8.5338E+06
8.0000E-02	1.6175E+07	1.6000E-02	-1.5652E+07	-8.4365E+06	-7.9817E+06
		1.7000E-02	-1.3702E+07	-7.6012E+06	-7.4377E+06
		1.8000E-02	-1.2540E+07	-6.7977E+06	-6.8988E+06
		1.9000E-02	-1.0808E+07	-6.0375E+06	-6.3677E+06
		2.0000E-02	-9.6852E+06	-5.3008E+06	-5.8415E+06
		2.1000E-02	-8.0673E+06	-4.5974E+06	-5.3227E+06
		2.2000E-02	-7.0130E+06	-3.9126E+06	-4.8086E+06
		2.3000E-02	-5.5405E+06	-3.2536E+06	-4.3017E+06
		2.4000E-02	-4.5067E+06	-2.6089E+06	-3.7993E+06



2.5000E-02	-3.2545E+06	-1.9837E+06	-3.3038E+06
2.6000E-02	-2.3162E+06	-1.3699E+06	-2.8125E+06
2.7000E-02	-1.1019E+06	-7.7315E+05	-2.3280E+06
2.8000E-02	8.6515E+04	-1.8951E+05	-1.8475E+06
2.9000E-02	8.5522E+05	3.7254E+05	-1.3735E+06
3.0000E-02	2.0344E+06	9.3440E+05	-9.0343E+05
3.1000E-02	3.2096E+06	1.4872E+06	-4.3954E+05
3.2000E-02	4.1329E+06	2.0332E+06	2.0523E+04
3.3000E-02	5.2669E+06	2.5691E+06	4.7465E+05
3.4000E-02	6.2182E+06	3.0991E+06	9.2509E+05
3.5000E-02	7.3101E+06	3.6200E+06	1.3698E+06
3.6000E-02	8.2540E+06	4.1359E+06	1.8110E+06
3.7000E-02	9.3074E+06	4.6445E+06	2.2466E+06
3.8000E-02	1.0225E+07	5.1489E+06	2.6788E+06
3.9000E-02	1.1264E+07	5.6470E+06	3.1057E+06
4.0000E-02	1.2153E+07	6.1414E+06	3.5293E+06
4.1000E-02	1.3171E+07	6.6304E+06	3.9478E+06
4.2000E-02	1.4050E+07	7.1162E+06	4.3630E+06
4.3000E-02	1.5027E+07	7.5971E+06	4.7733E+06
4.4000E-02	1.5944E+07	8.0754E+06	5.1806E+06
4.5000E-02	1.6903E+07	8.5504E+06	5.5830E+06
4.6000E-02	1.7764E+07	9.0232E+06	5.9825E+06
4.7000E-02	1.8717E+07	9.4924E+06	6.3773E+06
4.8000E-02	1.9616E+07	9.9598E+06	6.7693E+06
4.9000E-02	2.0550E+07	1.0425E+07	7.1567E+06
5.0000E-02	2.1421E+07	1.0889E+07	7.5414E+06
5.1000E-02	2.2351E+07	1.1351E+07	7.9218E+06
5.2000E-02	2.3226E+07	1.1812E+07	8.2995E+06
5.3000E-02	2.4148E+07	1.2271E+07	8.6730E+06
5.4000E-02	2.5026E+07	1.2730E+07	9.0439E+06
5.5000E-02	2.5938E+07	1.3188E+07	9.4108E+06
5.6000E-02	2.6819E+07	1.3646E+07	9.7751E+06
5.7000E-02	2.7723E+07	1.4104E+07	1.0136E+07
5.8000E-02	2.8607E+07	1.4562E+07	1.0494E+07
5.9000E-02	2.9500E+07	1.5020E+07	1.0848E+07
6.0000E-02	3.0421E+07	1.5478E+07	1.1200E+07
6.1000E-02	3.1272E+07	1.5936E+07	1.1548E+07
6.2000E-02	3.2188E+07	1.6397E+07	1.1893E+07
6.3000E-02	3.3094E+07	1.6860E+07	1.2236E+07
6.4000E-02	3.4015E+07	1.7324E+07	1.2576E+07
6.5000E-02	3.4913E+07	1.7791E+07	1.2912E+07
6.6000E-02	3.5853E+07	1.8260E+07	1.3247E+07
6.7000E-02	3.6746E+07	1.8732E+07	1.3578E+07
6.8000E-02	3.7697E+07	1.9206E+07	1.3907E+07

## 0.2

espessura (m) ao longo do tubo p/ TP (8 cm)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura total de 8 cm) - Pa (t=infinito)	espessura ao longo do tubo p/0.2 (m)	pico de tensão (Sigma_P1) do tubo defeituoso - Pa (t=15s)	tensão estabilizada do tubo defeituoso (Sigma_P1) - Pa (t=infinito)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura residual de cada defeito) - Pa (t=infinito)
0.0000E+00	-2.1284E+07	0.0000E+00	-1.1387E+08	-4.7047E+07	-1.6528E+07
5.0000E-03	-1.7840E+07	1.5238E-03	-6.1118E+07	-3.8591E+07	-1.5873E+07
1.0000E-02	-1.4573E+07	3.0476E-03	-7.6145E+07	-3.1897E+07	-1.5225E+07
1.5000E-02	-1.1555E+07	4.5714E-03	-4.4257E+07	-2.7014E+07	-1.4588E+07
2.0000E-02	-8.6785E+06	6.0952E-03	-4.9875E+07	-2.2927E+07	-1.3958E+07
2.5000E-02	-6.0015E+06	7.6191E-03	-3.4713E+07	-1.9752E+07	-1.3338E+07
3.0000E-02	-3.4404E+06	9.1429E-03	-3.4340E+07	-1.6970E+07	-1.2724E+07
3.5000E-02	-1.0465E+06	1.0667E-02	-2.5934E+07	-1.4670E+07	-1.2120E+07
4.0000E-02	1.2533E+06	1.2191E-02	-2.5025E+07	-1.2592E+07	-1.1522E+07
4.5000E-02	3.4153E+06	1.3714E-02	-1.9247E+07	-1.0801E+07	-1.0934E+07
5.0000E-02	5.4976E+06	1.5238E-02	-1.6699E+07	-9.1484E+06	-1.0351E+07
5.5000E-02	7.4642E+06	1.6762E-02	-1.4446E+07	-7.6855E+06	-9.7779E+06
6.0000E-02	9.3634E+06	1.8286E-02	-1.1826E+07	-6.2958E+06	-9.2099E+06
6.5000E-02	1.1164E+07	1.9810E-02	-8.5921E+06	-5.0077E+06	-8.6506E+06
7.0000E-02	1.2907E+07	2.1333E-02	-7.2319E+06	-3.7813E+06	-8.0967E+06
7.5000E-02	1.4566E+07	2.2857E-02	-4.2672E+06	-2.6387E+06	-7.5510E+06
8.0000E-02	1.6175E+07	2.4381E-02	-2.6890E+06	-1.5383E+06	-7.0104E+06
		2.5905E-02	-2.3110E+05	-5.0180E+05	-6.4778E+06
		2.7429E-02	1.8312E+06	5.0643E+05	-5.9501E+06
		2.8952E-02	3.8380E+06	1.4802E+06	-5.4300E+06
		3.0476E-02	5.3802E+06	2.4351E+06	-4.9146E+06
		3.2000E-02	7.2104E+06	3.3628E+06	-4.4066E+06
		3.3524E-02	8.9267E+06	4.2697E+06	-3.9031E+06
		3.5048E-02	1.0202E+07	5.1399E+06	-3.4065E+06
		3.6571E-02	1.1981E+07	6.0102E+06	-2.9144E+06
		3.8095E-02	1.3812E+07	6.8657E+06	-2.4290E+06
		3.9619E-02	1.5293E+07	7.7119E+06	-1.9478E+06
		4.1143E-02	1.7038E+07	8.5460E+06	-1.4731E+06
		4.2667E-02	1.8557E+07	9.3740E+06	-1.0024E+06
		4.4191E-02	2.0209E+07	1.0192E+07	-5.3802E+05
		4.5714E-02	2.1819E+07	1.1006E+07	-7.7479E+04
		4.7238E-02	2.3420E+07	1.1819E+07	3.7705E+05
		4.8762E-02	2.4926E+07	1.2629E+07	8.2784E+05
		5.0286E-02	2.6512E+07	1.3438E+07	1.2728E+06
		5.1810E-02	2.8130E+07	1.4247E+07	1.7142E+06
		5.3333E-02	2.9689E+07	1.5060E+07	2.1500E+06

5.4857E-02	3.1327E+07	1.5875E+07	2.5824E+06
5.6381E-02	3.2874E+07	1.6697E+07	3.0093E+06
5.7905E-02	3.4532E+07	1.7525E+07	3.4330E+06
5.9429E-02	3.6078E+07	1.8361E+07	3.8514E+06
6.0952E-02	3.7839E+07	1.9205E+07	4.2666E+06
6.2476E-02	3.9356E+07	2.0062E+07	4.6767E+06
6.4000E-02	4.1165E+07	2.0930E+07	5.0838E+06
			5.4860E+06
			5.8852E+06
			6.2798E+06
			6.6714E+06
			7.0585E+06
			7.4428E+06
			7.8228E+06
			8.2000E+06
			8.5730E+06
			8.9434E+06
			9.3097E+06
			9.6734E+06
			1.0033E+07
			1.0391E+07
			1.0744E+07
			1.1095E+07
			1.1443E+07
			1.1788E+07
			1.2129E+07
			1.2468E+07
			1.2804E+07
			1.3138E+07

0.25

espessura (m) ao longo do tubo p/ TP (8 cm)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura total de 8 cm) - Pa (t=infinito)	espessura ao longo do tubo p/0.25 (m)	pico de tensão (Sigma_P1) do tubo defeituoso - Pa (t=15s)	tensão estabilizada do tubo defeituoso (Sigma_P1) - Pa (t=infinito)	tensão estabilizada do tubo perfeito (Sigma_P1) (espessura residual de cada defeito) - Pa (t=infinito)
0.0000E+00	-2.1284E+07	0.0000E+00	-1.0143E+08	-4.4940E+07	-1.5363E+07
5.0000E-03	-1.7840E+07	1.5000E-03	-6.5653E+07	-3.8034E+07	-1.4722E+07
1.0000E-02	-1.4573E+07	3.0000E-03	-7.2667E+07	-3.2253E+07	-1.4089E+07
1.5000E-02	-1.1555E+07	4.5000E-03	-4.7997E+07	-2.7736E+07	-1.3466E+07
2.0000E-02	-8.6785E+06	6.0000E-03	-5.1357E+07	-2.3823E+07	-1.2849E+07

2.5000E-02	-6.0015E+06	7.5000E-03	-3.6955E+07	-2.0618E+07	-1.2243E+07
3.0000E-02	-3.4404E+06	9.0000E-03	-3.6837E+07	-1.7758E+07	-1.1642E+07
3.5000E-02	-1.0465E+06	1.0500E-02	-2.7957E+07	-1.5329E+07	-1.1052E+07
4.0000E-02	1.2533E+06	1.2000E-02	-2.4687E+07	-1.3115E+07	-1.0467E+07
4.5000E-02	3.4153E+06	1.3500E-02	-2.1314E+07	-1.1190E+07	-9.8913E+06
5.0000E-02	5.4976E+06	1.5000E-02	-1.8268E+07	-9.3921E+06	-9.3214E+06
5.5000E-02	7.4642E+06	1.6500E-02	-1.3603E+07	-7.7586E+06	-8.7602E+06
6.0000E-02	9.3634E+06	1.8000E-02	-1.2197E+07	-6.2183E+06	-8.2045E+06
6.5000E-02	1.1164E+07	1.9500E-02	-8.1990E+06	-4.7995E+06	-7.6573E+06
7.0000E-02	1.2907E+07	2.1000E-02	-6.5609E+06	-3.4444E+06	-7.1152E+06
7.5000E-02	1.4566E+07	2.2500E-02	-3.4046E+06	-2.1758E+06	-6.5812E+06
8.0000E-02	1.6175E+07	2.4000E-02	-1.6383E+06	-9.5259E+05	-6.0522E+06
		2.5500E-02	1.1122E+06	2.0109E+05	-5.5309E+06
		2.7000E-02	3.3180E+06	1.3233E+06	-5.0144E+06
		2.8500E-02	5.6151E+06	2.4063E+06	-4.5054E+06
		3.0000E-02	7.3280E+06	3.4682E+06	-4.0009E+06
		3.1500E-02	9.4022E+06	4.5012E+06	-3.5036E+06
		3.3000E-02	1.1412E+07	5.5123E+06	-3.0107E+06
		3.4500E-02	1.2839E+07	6.4846E+06	-2.5247E+06
		3.6000E-02	1.4808E+07	7.4587E+06	-2.0429E+06
		3.7500E-02	1.6838E+07	8.4178E+06	-1.5677E+06
		3.9000E-02	1.8541E+07	9.3686E+06	-1.0965E+06
		4.0500E-02	2.0479E+07	1.0307E+07	-6.3173E+05
		4.2000E-02	2.2331E+07	1.1240E+07	-1.7086E+05
		4.3500E-02	2.4157E+07	1.2172E+07	2.8391E+05
		4.5000E-02	2.5905E+07	1.3102E+07	7.3490E+05
		4.6500E-02	2.7718E+07	1.4030E+07	1.1800E+06
		4.8000E-02	2.9598E+07	1.4961E+07	1.6215E+06
		4.9500E-02	3.1376E+07	1.5896E+07	2.0573E+06
		5.1000E-02	3.3296E+07	1.6836E+07	2.4897E+06
		5.2500E-02	3.5056E+07	1.7787E+07	2.9165E+06
		5.4000E-02	3.7011E+07	1.8746E+07	3.3400E+06
		5.5500E-02	3.8774E+07	1.9718E+07	3.7582E+06
		5.7000E-02	4.0864E+07	2.0701E+07	4.1732E+06
		5.8500E-02	4.2595E+07	2.1704E+07	4.5831E+06
		6.0000E-02	4.4751E+07	2.2720E+07	4.9899E+06
					5.3917E+06
					5.7905E+06
					6.1846E+06
					6.5758E+06
					6.9624E+06
					7.3462E+06
					7.7255E+06
					8.1022E+06
					8.4745E+06
					8.8442E+06

9.2098E+06  
 9.5728E+06  
 9.9319E+06  
 1.0288E+07  
 1.0641E+07  
 1.0991E+07  
 1.1338E+07  
 1.1682E+07  
 1.2023E+07  
 1.2361E+07

**OBSERVAÇÕES:**

1 - raio externo = 0.235 m / raio interno = 0.155 m
2 - $T_i=550^{\circ}\text{C}$ / $T_o=30^{\circ}\text{C}$ / $\Delta T=T_i-T_o=520^{\circ}\text{C}=520\text{K}$ / $h_e=15$ (W/m <sup>2</sup> K) / $h_i=30000$ (W/m <sup>2</sup> K)
3 - cálculo ao longo da espessura do tubo

## APÊNDICE VII

**Tubo com Descontinuidade:** Avaliação do Concentrador de Tensão na Tubulação Devido ao Gradiente de Temperatura ( $a/w = 0,05, 0,1, 0,15, 0,2$  e  $0,25$ ) - Figura 4.12.

$(a/w)=x$	$K_{TT}(\text{MEF})$	$K_{TT}$ (Equação do gráfico de $K_{TT}$ )	ERRO% ( $K_{TT}$ )
0.05	2.1102	2.1058	0.2100
0.10	2.3674	2.3631	0.1830
0.15	2.7103	2.7061	0.1560
0.20	3.1332	3.1291	0.1313
0.25	3.6206	3.6166	0.1103

**OBSERVAÇÃO:**

1 - O concentrador de tensão para cada caso corresponde a razão do pico de tensão sigma P1 calculado via MEF pela tensão sigma P1 do tubo perfeito, ou seja, isento de descontinuidade. Vide valores máximos de tensão na tabela do Apêndice VI.

## APÊNDICE VIII

Avaliação do Concentrador Total de Tensão devido as Tensões Mecânicas e Térmicas presentes na Tubulação ( $a/w = 0,05, 0,1, 0,15, 0,2$  e  $0,25$ ) - Figura 4.13.

$(a/w)=x$	$K_T$ (Mecânico)	$K_{TT}$ (Térmico)	$K_{T\_TOTAL}$	$K_{T\_TOTAL}$ (Equação do gráfico de $K_{T\_TOTAL}$ )	ERRO% ( $K_{T\_TOTAL}$ )
0.05	3.9285	2.1102	8.2899	8.289914	0.0001
0.10	4.0323	2.3674	9.5461	9.546060	0.0001
0.15	4.2431	2.7103	11.5001	11.500064	0.0001
0.20	4.5336	3.1332	14.2047	14.204660	0.0001
0.25	4.8782	3.6206	17.6620	17.661984	0.0002

### OBSERVAÇÃO:

1 - O concentrador total de tensão para cada caso corresponde à multiplicação dos concentradores de tensão mecânico e térmico.