

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE INTEGRIDADE DE UM EQUIPAMENTO PRESSURIZADO COM DEFEITOS
PLANARES EMPREGANDO NORMAS DE ADEQUAÇÃO AO USO

por

Igor Selhane Maciel

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, janeiro de 2025

CIP - Catalogação na Publicação

Maciel, Igor Selhane
ANÁLISE DE INTEGRIDADE DE UM EQUIPAMENTO
PRESSURIZADO COM DEFEITOS PLANARES EMPREGANDO NORMAS
DE ADEQUAÇÃO AO USO / Igor Selhane Maciel. -- 2025.
15 f.
Orientador: Ignácio Iturioz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2025.

1. análise de integridade. 2. Método R6. 3. Norma
API 579. I. Iturioz, Ignácio, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Igor Selhane Maciel

ANALISE DE INTEGRIDADE DE UM EQUIPAMENTO PRESSURIZADO COM DEFEITOS
PLANARES EMPREGANDO NORMAS DE ADEQUAÇÃO AO USO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof Ignácio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Liu Yesukai de Barros

Prof. Bardo Ernst Josef Bodmann

Prof. Carlos Eduardo de Souza

Porto Alegre, Janeiro de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que junto comigo se alegram pelo seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ricardo Medeiros Maciel e Derby Vânia Selhane Maciel, in memoriam, cuja influência permanece viva em mim.

À minha família e amigos, pela solidariedade e apoio durante toda esta trajetória,

Ao professor Ignácio, que possui o dom extraordinário de ensinar e inspirar. Sua orientação, sabedoria e dedicação foram essências para o desenvolvimento deste trabalho.

.

“Don’t trust, verify”

Satoshi Nakamoto

Selhane, Igor. ANÁLISE DE INTEGRIDADE DE UM EQUIPAMENTO PRESSURIZADO COM DEFEITOS PLANARES EMPREGANDO NORMAS DE ADEQUAÇÃO AO USO, 2025. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

RESUMO

A avaliação da integridade em estruturas pressurizadas relacionadas a presença de defeitos planares é de importância estratégica em países industrializados. Metodologias de análise consolidadas permitem tomar decisões de engenharia para determinar se um equipamento pode continuar operando com segurança e ainda podem definir a frequência de inspeções e/ou ações mitigadoras que permitam facilitar a gestão da operação destes tipos de equipamentos. Estas metodologias tentam de forma simplificada avaliar a interação entre a propagação instável de fissuras e o colapso seguindo três metodologias: O método R6, na sua forma clássica e duas utilizando a norma API579. No presente trabalho é analisado um vaso de pressão típico, de corpo cilíndrico e com uma fissura longitudinal. Um estudo paramétrico também foi realizado, a fim de investigar como o aumento da pressão ou o crescimento das dimensões do defeito interagem com a evolução da criticidade do defeito. Aspectos mais específicos, como a maneira que o defeito cresce e a influência da tensão residual, de importância crucial quando o defeito está situado próximo a uma solda, também são estudados. Os resultados obtidos e a discussão a partir do problema estudado, bem como do estudo paramétrico, ilustram as possibilidades de utilizar estas metodologias.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica da fratura, colapso plástico, estruturas pressurizadas.

Selhane, Igor. INTEGRITY ANALYSIS OF A PRESSURIZED EQUIPMENT WITH PLANAR DEFECTS USING SUITABILITY FOR USE STANDARDS 2025. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

ABSTRACT

The assessment of integrity in pressurized structures related to the presence of planar defects is of strategic importance in industrialized countries. Consolidated analysis methodologies allow engineering decisions to be made to determine whether equipment can continue to operate safely and can also define the frequency of inspections and/or mitigating actions that facilitate the management of the operation of these types of equipment. These methodologies attempt in a simplified way to evaluate the interaction between unstable crack propagation and collapse. The present work analyzes a typical pressure vessel, with a cylindrical body and a longitudinal fissure. The criticality of the defect is assessed by analyzes of different levels of complexity presented in API Standard 579. A parametric study was also carried out in order to investigate how the increase in pressure or the growth in the dimensions of the planar defect interact with the evolution of the possible failure. More specific aspects, such as the way the defect evolves and the influence of residual stress, which is of crucial importance when the defect is located close to a weld, are also studied. The results obtained and the discussion based on the problem studied, as well as the parametric study, illustrate the possibilities of using these methodologies

KEYWORDS: fracture mechanics, plastic collapse, pressurized structures.

Símbolos

$\sigma_{\text{circ}}, \sigma$	Tensão circunferencial	[MPa]
t	Espessura	[mm]
D	Diâmetro do vaso de pressão	[mm]
σ_y	Tensão de escoamento	[Mpa]
Tref	Temperatura de referência	[°C]
Kc, K	Tenacidade, fator de intensidade de tensões	[MPamm ^{0,5}]
Sp, Sps	Tensões primarias e secundarias	[Mpa]
Tref	Temperatura de referencia	[°C]
Q	Parâmetro para determinar K	[adimensional]
a	Profundidade da trinca	[mm]
2c	Comprimento da trinca	[mm]
pi	Pressão interna	[Mpa]
Lr, Sr, Kr	Parametros utilizados para definir a criticidade no método R6 e nos metodos API579	[adimensionais]
CS	Coefficiente de segurança	[adimensional]
$\phi, \phi_0, X, \zeta, a_{\text{eff}}$	Parâmetros utilizados no calculo da tensão residual	[adimensional]
σ_r	Tensão residual	[Mpa]
β	Fator de forma	[adimensional]
r	Raio do vaso	[adimensional]
API	America Petroleum Institute	[adimensional]

SUMÁRIO

1, INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 TEMPERATURA DE REFERÊNCIA.....	2
2.2 CATEGORIZAÇÃO DAS TENSÕES.....	2
2.3 COLAPSO PLÁSTICO.....	3
2.4 MECÂNICA DA FRATURA.....	4
3. METODOLOGIA	5
3,1 MÉTODO R6	5
3.2 NORMA FITNESS FOR SERVICE (API 579)	7
4, ESTUDO DE CASO.....	9
5. RESULTADOS.....	10
5.1 AVALIAÇÃO NÍVEL 1 API579.....	10
5.1 AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA MÉTODO R6.....	11
5.2 AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA NÍVEL 2 NORMA API 579.....	12
6. CONCLUSÕES.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
ANEXO 1	17
ANEXO 2	18
APÊNDICE 1.....	19

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A integridade estrutural de vasos de pressão é fundamental para a segurança operacional das mais diversas indústrias, tais como: de petróleo, gás, petroquímica, nuclear, farmacêutica, etc. Tais equipamentos são comumente submetidos a condições extremas de temperatura e pressão e ambientes muitas vezes agressivos. A ocorrência de trincas aqui denominados defeitos planares, pode comprometer não apenas a eficiência do equipamento, por não poder trabalhar na sua condição plena, mas também a segurança dos trabalhadores e a proteção do meio ambiente. Sendo assim, metodologias que auxiliam a tomada de decisão em engenharia e que permitam realizar uma melhor gestão da manutenção e da segurança de equipamentos pressurizados são de importância estratégica para a indústria.

Nesse contexto, metodologias que visam inspeções de segurança são de grande utilidade. O método R6(1980) proposto originalmente nos anos 70 para avaliar instalações nucleares é um destes enfoques. A citada metodologia foi aprimorada e atualmente faz parte de várias normas denominadas FFS (fitness for service), que em uma tradução livre seriam normas de equipamentos que estão em “serviço”, ou adequadas ao uso como faz referencia o titulo deste trabalho. Dentre elas se destaca a Norma Americana API579(2016), que surge como ferramenta eficaz para a análise e gestão de riscos de vasos de pressão.

Segundo Machado(2011), durante as inspeções de segurança, é comum serem encontradas descontinuidades advindas da fabricação ou geradas durante a operação. O resultado dessas inspeções pode condenar o uso do equipamento ou fazendo com que seja necessário uma parada para realizar as manutenções devidas. Medina(2014), acrescenta que o resultado de uma avaliação “Fitness for Service” é uma decisão de como reavaliar as condições de operação, executar uma reparação, alterar ou retirar o equipamento. O autor salienta que esta metodologia pode proporcionar um bom equilíbrio entre economia e segurança, evitando reparos desnecessários durante a vida em serviço do equipamento.

1.2 Objetivos

A seguir serão apresentados os objetivos do presente trabalho.

Objetivo geral: Explorar as possibilidades das normas de adequação ao uso na gestão de risco.

Objetivos específicos:

(i) Verificar a criticidade de um defeito planar (fissura) utilizando as três metodologias indicadas:

(a) Método R6

(b) Análise pelo Nível 1 da Seção 9 da norma API579.

(c) Análise pelo Nível 2A da seção 9 da norma API579.

(ii) Realizar um estudo paramétrico onde pressão interna, e dimensões da trinca são avaliadas.

Empregando as metodologias (a) e (c) anteriormente indicadas.

(iii) Determinar a influência da forma em que o defeito cresce e da influência das tensões residuais no do fator K_r considerando o defeito dentro da região afetada pela solda.

1.3 Estrutura do Trabalho

Após a seguinte introdução, na Seção 2 a fundamentação teórica será apresentada onde tópicos como definição de temperatura de referência, categorização das tensões primárias e secundárias, características do colapso plástico e da mecânica da fratura serão sumariamente descritos. Na Seção 3 serão apresentados os aspectos básicos das metodologias utilizadas. Na Seção 4 se apresenta o estudo

de caso. A Seção 5 são apresentados e discutidos os resultados e a Seção 6 contém as conclusões e considerações finais do trabalho realizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão explicados os tópicos teóricos necessários que dão embasamento ao trabalho desenvolvido.

2.1 TEMPERATURA DE REFERÊNCIA

Uma característica em aços de baixa e média liga, adequados para ser unidos por solda, é que uma sensível mudança de tenacidade acontece em determinada temperatura. A Fig. 2.1 ilustra esta característica mostrando como a tenacidade do material muda com a temperatura. A temperatura na qual acontece esta mudança é considerada uma propriedade do material e existem procedimentos normalizados para determiná-la, como por exemplo o ensaio Charpy. Conforme Gere e Goodno(2018), a temperatura de referência para aços de baixa e média liga é a temperatura abaixo da qual o material apresenta uma baixa tenacidade. Esta temperatura de referência está na faixa de -20°C e 100°C , dependendo da composição química e tratamento térmico ao que o material foi submetido.

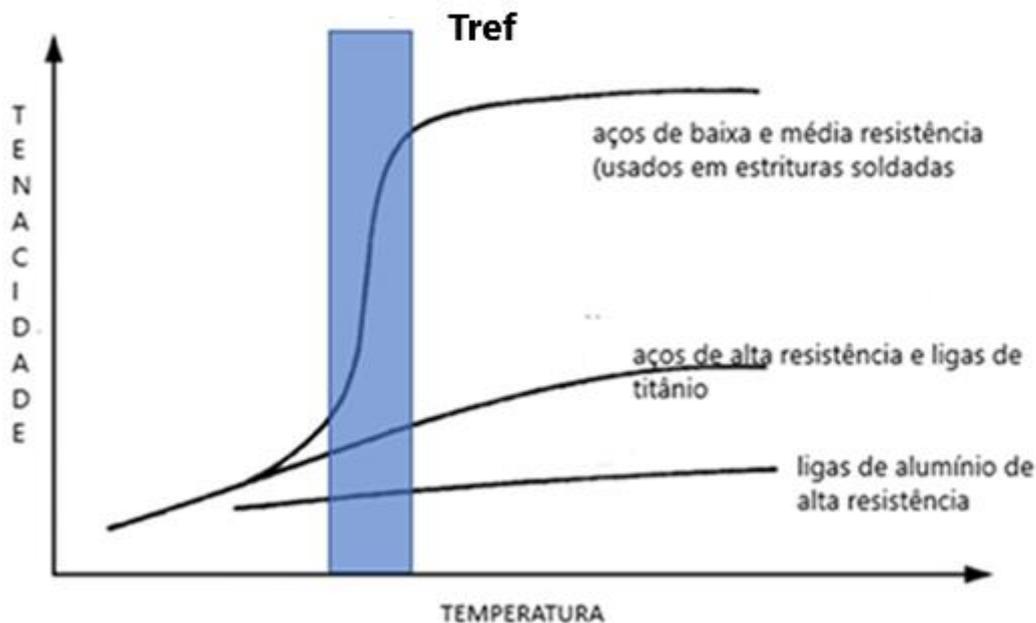


Figure 2.1 - Variação da tenacidade com a temperatura

2.2 CATEGORIZAÇÃO DAS TENSÕES

Resulta instrutivo separar as tensões em duas categorias principais: tensões primárias e secundárias

Tensões Primárias (S_p): Conforme Ashby Jones(2013), tensões primárias são as tensões que ocorrem em um material devido as forças externas aplicadas. Como por exemplo pressões, ação do vento e cargas permanentes. As solicitações que estas forças produzem não diminuem ou desaparecem quando se atinge a plastificação. Pode-se considerar então que colaboram para o colapso plástico.

Tensões Secundárias (Ss): De acordo com Callister Jr. Rethwisch(2013) são aquelas que ocorrem em uma estrutura devido às restrições impostas ao seu movimento ou deformação. Estas tensões estão associadas a solicitações auto equilibradas e são liberadas quando se atinge a plastificação. Então, se pode dizer que não colaboram para o colapso plástico. Estas tensões são geradas por desalinhamentos na fabricação, gradientes térmicos ou por tensões residuais advindas da soldagem.

2.3 COLAPSO PLASTICO

O colapso plástico de acordo com Timoshenko(2018), ocorre quando a tensão aplicada atinge o limite de resistência do material, resultando em deformação plástica irreversível. Para um estado de tensões uniaxial este fenômeno ocorre após o material atingir a sua tensão de escoamento σ_y , como se mostra na Figura 2.3.1. Para um caso multiaxial definir o estado de tensões no qual ocorre a plastificação é mais complexo, sendo necessário recorrer a uma superfície de Von Mises, que será função de σ_y , considerada propriedade do material, e da geometria. Como definiu Callister Jr; Rethwisch(2013), a superfície de von Mises é uma superfície que separa as condições de tensão que causam deformação elástica daquelas que causam deformação plástica. É uma maneira de combinar as três tensões principais em uma tensão equivalente na qual o material atinge o escoamento, se mostrando adequada para metais que se deformam antes de romper. Sendo assim, é possível considerar que a plastificação é independente da intensidade do primeiro invariante das tensões principais.

Outro fenômeno relevante para a plasticidade é o encruamento do material, segundo Timoshenko(2018), pode ser definido como o processo de endurecimento de um aço devido a deformação plástica, resultando em aumento da resistência à tração e diminuição da ductilidade, devido a formação de defeitos na estrutura cristalina. Este fenômeno está relacionado as características intrínsecas do material e independe do nível de triaxialidade de tensões a que o sistema esteja sujeito.

O fato da tensão de plastificação não ser uma propriedade do material para um estado triaxial de tensões torna a interação entre o colapso plástico e a propagação instável de fissuras complexa, pois o colapso plástico depende das propriedades do material e também da geometria e condições de contorno que determinam o nível de triaxialidade existente. Deste modo, ocorre plastificação na tensão de escoamento para um estado uniaxial de tensões, como mostra a Figura 2.2, já para um estado triaxial esta afirmação não é verdadeira. A teoria que fundamenta o comportamento plástico pode ser encontrada em diversas referências entre elas Han(2010).

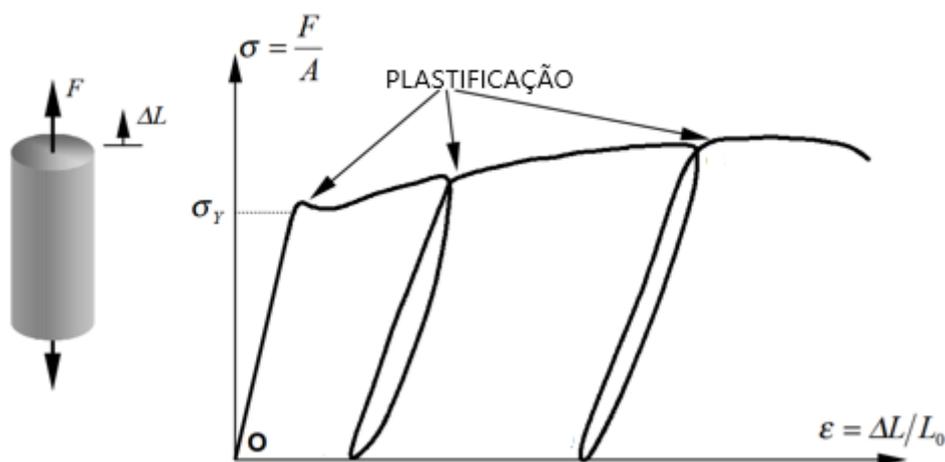


Figura 2.3.1 – Tensão x deformação, material metálico e estado uniaxial de tensão

2.4 MECÂNICA DA FRATURA

De acordo com Andersom(2010) dentro do estudo da mecânica dos sólidos, o dimensionamento de estruturas pode seguir duas abordagens distintas. A abordagem tradicional da resistência dos materiais que tem como objetivo comparar o máximo esforço de tensão em uma estrutura, que será função da geometria e das condições de contorno, com a resistência de um corpo de prova simples, que depende do material, da temperatura e da velocidade de carregamento do ensaio. Sendo o estado tensional em um volume elementar da estrutura caracterizado por um tensor simétrico, se necessita de uma teoria de resistência que permita definir quando o tensor de tensões que antecede algum volume elementar levará a estrutura a plastificação. Para metais existem duas teorias que permitem definir esta situação, são as Teorias de Von Misses e a de Tresca. Essas teorias permitem definir um valor escalar de comparação, denominado tensão equivalente.

Desta forma, se define a tensão equivalente crítica, σ_r , sendo obtida num corpo de prova de geometria simples submetido a um estado de tensões igualmente simples, quando se atinge a plastificação, e compara-se com a tensão equivalente, σ_{eq} , do ponto da região mais solicitada da estrutura. Essa comparação é feita através da equação 2.1,

$$\sigma_{eq}(F, \text{Geometria}) \leq \sigma_r(\text{Material}, T^{temp}, F.) \quad (2.1)$$

Onde, σ_{eq} representa a tensão equivalente calculada e σ_r é a tensão equivalente requerida. A abordagem tradicional é largamente utilizada para o cálculo de estruturas, no entanto, houve grandes evidências de suas limitações, como, por exemplo, no colapso de navios que navegavam em águas frias durante a Segunda Guerra Mundial. Considerando que nestas estruturas podiam haver defeitos planares (fissuras) esta equação não contempla a solução do problema, portanto não era possível explicar estes colapsos com a abordagem tradicional.

Inglis tentou solucionar o problema, em 1913, admitindo que uma trinca pode ser considerada como uma geometria que se aproxima de uma elipse, onde o eixo menor tende a zero. Ele calculou a tensão que levaria ao colapso da estrutura, considerando a extremidade da fissura como um concentrador de tensão, como o raio da extremidade tendia a zero, a tensão tendia ao infinito, indicando o limite do uso da abordagem tradicional para o tratamento de estruturas contendo descontinuidades do tipo trinca.

A abordagem da mecânica da fratura solucionou o paradoxo de Inglis quando Griffith, em 1920, analisou o problema de estruturas contendo descontinuidades que, inicialmente, ficou restrita a materiais frágeis como, por exemplo, o vidro, e posteriormente foi adequado a materiais metálicos por Irwin e colaboradores, que levaram em conta a plastificação na extremidade da trinca. Iniciou-se, assim, o estudo da mecânica da fratura linear elástica que se apresenta como uma nova abordagem que pode ser utilizada em materiais que contenham trincas, as quais obedecem ao comportamento elástico com pequenas plastificações nas suas extremidades. Tal problema pode ser resolvido introduzindo um novo parâmetro genérico, X , com o qual seja possível definir quando a fissura se propaga de forma instável. A expressão 2.2 representa, segundo Kaninen e Popelar (1985), a verificação de projeto utilizando a abordagem da mecânica da fratura.

$$X_{calc}(F, \text{Geometria}, a) < X_{mat}(B, T^{temp}, F,) \quad (2.2)$$

O valor de X_{calc} é função da geometria do corpo de prova, incluindo a forma e o comprimento da fissura, e das condições de contorno, enquanto que X_{mat} depende do material, da temperatura, da taxa de aplicação de carga (F) e da espessura do corpo de prova que, indiretamente, mede a triaxialidade do nível das tensões atuantes.

Existem diversas alternativas como parâmetro X_i , chamados parâmetros fractomecânicos, sendo os mais conhecidos a energia específica da fratura (G), proposto por Griffith em 1928 e o fator de intensidade de tensões (K), proposto por Irwin em 1957. Estes dois parâmetros podem ser utilizados na mecânica da fratura linear elástica na expressão 2. 2 como parâmetro X_i . Esta teoria pode ser aplicada quando a região com comportamento não linear fica restrita a uma região muito pequena na ponta da fissura, na ordem de $a/50$, como demonstrado em Anderson(2010). Quando se deseja considerar a interação entre a mecânica da fratura e o colapso devido à plastificação do material, existem outros dois parâmetros, COD (crack opening displacement), proposto por Wells, em 1969, e a integral J, proposta por Rice. Estes dois parâmetros permitem determinar se uma trinca vai propagar em forma instável quando o nível de plastificação nas proximidades da ponta da trinca está desenvolvido. Existem diversos procedimentos para levar em conta a interação entre fratura e o colapso plástico, neste trabalho se usará as curvas de avaliação da falha FAD (Failure Assesment Diagram), propostas originalmente no método R6(1980). Diversas estratégias desenvolvidas a partir deste método serão apresentadas neste trabalho.

3 METODOLOGIA

A seguir se apresenta a descrição das três estratégias que serão utilizadas:

3.1 Método R6

De acordo com Anderson(2010), um critério muito utilizado para avaliar estruturas considerando a interação entre as formas de colapso associadas a fratura e a plasticidade é o denominado método R6, proposto originalmente por Downling e Towley(1975). Foi implementado pela CEGB (Central Electricity Cenerating Board, Inglaterra) para avaliar equipamentos relacionados a geração de energia nuclear. Esta metodologia com modificações significativas tem sido implementada em várias normas de adequação ao uso (FFS), como, por exemplo, BS7910(2019), API 579(2016), dentre outras.

O procedimento R6 foi desenvolvido baseando-se no modelo de Burdekin & Stone(1966), que define o fator de intensidade de tensões, considerando a interação entre fratura e plasticidade. Este modelo possui hipóteses de trabalho similares ao do modelo desenvolvido por Dugdale(1960), válido para uma placa de material elastoplástico perfeito, com uma fissura central, onde as dimensões da placa são muito maiores que a dimensão da fissura.

Para o caso de fratura linear elástica, pode-se considerar a equação:

$$K_I = \sigma\beta\sqrt{\pi a} \quad (3.1)$$

Onde K_I é o parâmetro fractomecânicos, a é a dimensão do defeito, β é o fator de forma (que leva em conta a forma do defeito, a forma do corpo de prova e a distribuição das condições de contorno) e σ é a tensão trativa atuante na direção perpendicular a fissura.

Uma aproximação possível para o parâmetro fractomecânicos K_I , levando em conta a interação entre fratura frágil e o colapso plástico, é apresentada na equação 3. 2. Esta aproximação considera três hipóteses: (a) O material é elastoplástico perfeito, o que implica que não ser considera o encruamento, (b) A geometria consiste em uma placa com trinca central de dimensões conhecidas, (c) e existência de estado plano de tensões.

$$K_{eff} = \sigma_e \beta \sqrt{\pi a} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left(\sec \left(\frac{\pi \sigma}{2 \sigma_y} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Onde K_{eff} é a aproximação do parâmetro fractomecânico que leva em conta a interação com a plasticidade, β é o fator de forma que para a geometria considerada, terá valor unitário e σ_y é a tensão

de escoamento do material. Devido a estrutura ser um modelo de estado plano de tensões, esta tensão será igual à tensão de plastificação do material, mas para um estado de tensões triaxiais a tensão de plastificação vai depender da tensão de escoamento (σ_y) e do nível de triaxialidade das tensões. Ao fazer o quociente K/K_{eff} , é possível escrever:

$$\frac{K}{K_{eff}} = \frac{\sigma\beta\sqrt{\pi a}}{\sigma_y\beta\sqrt{\pi a}} \left(\frac{8}{\pi^2} \ln \left(\sec \frac{\pi\sigma}{2\sigma_y} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Na equação 3.1.3 o fator de forma β , que leva em conta a geometria é eliminado. Desta forma, a expressão se torna válida para qualquer geometria e condição de contorno. Por outro lado, ao substituir a tensão de escoamento, σ_y , pela tensão de colapso plástico σ_{yc} , que dependerá de cada geometria e nível de triaxialidade das tensões atuantes, se observa que a relação não é válida somente para o estado plano de tensões, mas também para qualquer outro estado tensional. Substituindo, na equação anterior o parâmetro adimensional K_r pelo quociente K/K_{eff} e o parâmetro S_r pelo quociente σ/σ_c , se obtém a equação:

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left(\sec \left(\frac{\pi S_r}{2} \right) \right) \right]^{-1/2} \quad (3.4)$$

Ao plotar o gráfico desta equação, se obtém a curva limite de segurança, conforme a Figura 3.1. O método consiste em identificar no domínio do defeito, para isso se calcula o parâmetro K_r , definido como a razão entre o fator de intensidade de tensões correspondente ao defeito avaliado, levando em conta o estado de tensões atuantes, pela tenacidade do material, K_{Ic} . Segundo a mecânica da fratura linear este fator orienta quanto a criticidade do colapso pela propagação instável da fissura. Para a completa identificação do ponto se estabeleceu o parâmetro S_r , como o quociente entre a tensão trativa aplicada ao defeito e a tensão de colapso. Este fator indica o quão próximo se encontra o defeito do colapso plástico. Para um ponto avaliado localizado dentro da área gerada pela curva limite, o defeito planar não é crítico, caso contrário é crítico.

A distância, sob uma reta da origem, entre o ponto que define o estado de criticidade, e a curva limite de segurança estabelece o coeficiente de segurança (OA'/AO). A região aonde o ponto se localiza no diagrama FAD indica o comportamento que governa o colapso: propagação instável do defeito, se o ponto estiver mais próximo do eixo K_r e colapso dúctil se mais próximo de S_r .

Posteriores ajustes do método R6 tem permitido refinar as análises. Atualmente as normas de adequação ao uso empregam curvas que incluem, na Figura 3.1, o encruamento do material.

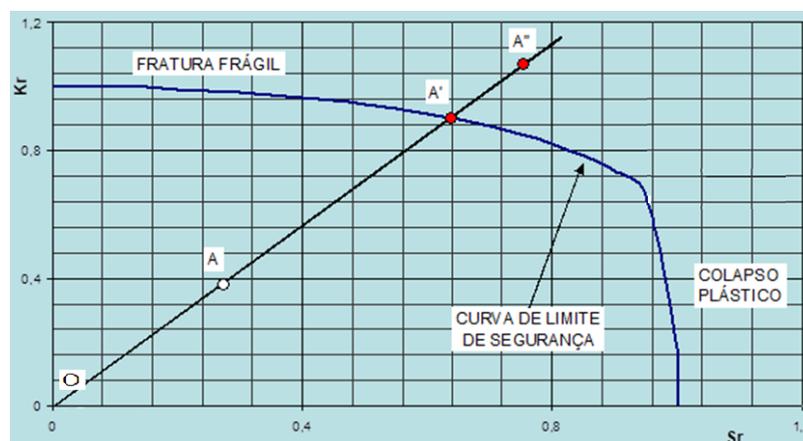


Figura 3.1 - Diagrama do método R6, regiões do gráfico e coeficiente de segurança.

De acordo com Anderson(2010), o fator de intensidade de tensões K pode ser calculado tanto por expressões analíticas quanto por métodos numéricos. O gráfico mostrado na Figura 3.2 fornece as premissas para calcular o fator K . Devido a orientação da trinca do caso investigado no problema apresentado na seção 4, a equação a ser aplicada para determinar o K é o caso A (fissura semielíptica). Sendo σ a tensão atuante na ponta da fissura caso não houvesse defeito, a é a profundidade da fissura, e $2c$ o comprimento.

Este diagrama permite realizar ajustes para diversas condições de avaliação, levando em conta a razão entre tensão aplicada e a tensão de escoamento do material, bem como a razão das dimensões da trinca ($a/2c$).

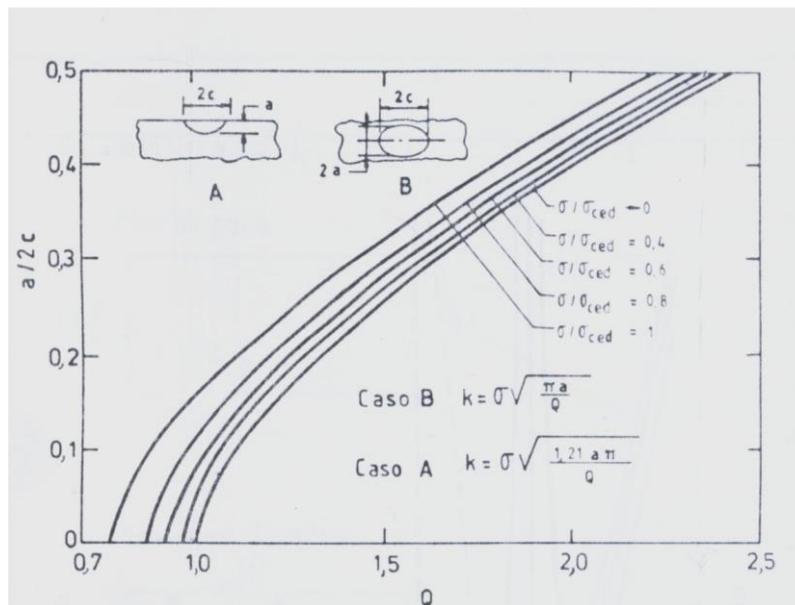


Figura 3.2: Diagrama que permite calcular o fator de intensidade de tensões no caso de fissuras elípticas e semielípticas. Fonte Anderson (2010)

3.2 Norma Fitness for Service (API 579)

Em 2001, a ASME e a API formaram um comitê para desenvolver e manter uma norma de FFS (Fitness For Service) para equipamentos largamente utilizados na indústria, nascendo assim, em 2007 o API 579-1/ASME FFS-1 2007. Este documento fornece uma metodologia de avaliação para integridade estrutural de vasos de pressão, tubulações e tanques de serviço, podendo estes equipamentos apresentar discontinuidades ou danos. Esta metodologia busca desenvolver uma avaliação de “adequação ao uso” para determinar se o equipamento, mesmo com discontinuidades, poderá operar com segurança durante um período determinado.

A norma API579(2016) foi desenvolvida em compatibilidade com equipamentos projetados e fabricados conforme diversos códigos de projeto, entre eles, o ASME VIII Boiler and Pressure Vessel. Ela apresenta três níveis de avaliação para cada tipo de degradação de equipamentos, exigindo em cada um deles diferentes graus de informação e de conservadorismo. E possui onze seções para avaliação, organizados por tipo de dano. O anexo 1 deste trabalho contém um organograma que apresenta os possíveis defeitos e a seção onde o mesmo é tratado pela norma. O capítulo deste trabalho se encontra na Seção 9 da norma API579(2016) e trata sobre defeitos planares.

O Nível 1 proporciona o critério mais conservativo, podendo ser realizado com a mínima quantidade de inspeção e informação sobre o equipamento. Este nível de análise se calcula, de acordo com o

procedimento, o tamanho máximo do defeito admissível e compara-se o resultado com o tamanho do defeito existente. Se este defeito for menor que o calculado este equipamento tem condições de continuar operando em segurança. Caso o ponto avaliado não esteja atendendo os requisitos deste nível, pode se fazer uma análise utilizando níveis superiores de avaliação.

O nível 2 possui três sub níveis , o abordado neste estudo será o 2a, que proporciona uma análise mais precisa que o nível 1 e mais conservativa que os demais subníveis. Este sub nível utiliza uma curva limite padrão que ajusta a maioria dos materiais empregados, apresentada na figura 5.3. A diferença para curva do R6 é que neste caso o encruamento do material esta sendo considerado permitindo ampliar o domínio da região segura em que o colapso e governado pela plasticidade. O Nível 2b é caracterizado pela curva limite de segurança ser construída utilizando os dados obtidos por um ensaio uniaxial da curva tensão deformação do material utilizado. Assim, personalizando a curva limite para o material específico. Para o Nível 2c é possível empregar as curvas limite do 2a ou 2b, mas a principal característica é o fato da tenacidade do material não ser um valor escalar e sim uma curva que considera o aumento da tenacidade com o aumento subcrítico da fissura. O último nível de análise da seção 9, e o Nível 3, modelos de elementos finitos não lineares são utilizados para determinar tanto a curva limite como o estado tensional do problema em estudo, informações com maior riqueza de detalhes podem ser encontradas nos anexos da API579(2016).

A Seção 9 da API579(2016) fornece orientações para examinar a influência das tensões residuais, na determinação do K_r . Este efeito é relevante caso a trinca esteja próxima a zona afetada pela solda, e esta condição se faz presente no estudo paramétrico da seção 5.3. Para levar em conta este efeito a norma propõe o calculo do fator ϕ que permite calcular o fator K_r corrigido como apresenta a equação 3.5.

$$K_r = \left(\frac{K + \phi K_{ISr}}{K_c} \right) \quad (3.5)$$

Onde K representa o fator de intensidade de tensões que contabiliza apenas as tensões primárias, K_{ISr} é o fator de intensidade de tensões considerando somente tensões residuais, K_c e a tenacidade do material, e ϕ e o fator de interação. A Figura 3.3 ilustra a influência das tensões residuais que crescerá para valores baixos de L_r , quando se atinge o escoamento ($L_r > 1$) o fator de interação, ϕ , decresce pois as tensões residuais são aliviadas.

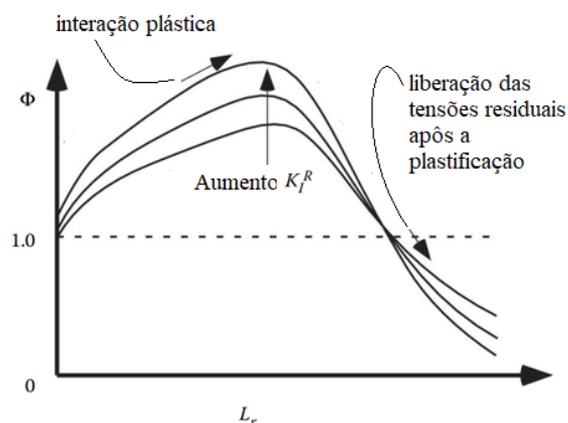


Figura 3.3 - Interação dos fatores de intensidade de tensões com as tensões primárias e residuais

Para calcular ϕ se procede como se indica a seguir:

- (i) Calcula-se a tensão residual na região do defeito, para isso a norma API579 fornece subsídios de como fazê-lo, empregando o ANEXO 9B, no caso apresentado na seção 4 do presente

trabalho, considerando que a solda foi submetida a um procedimento de alívio de tensões, e que o defeito é paralelo ao cordão de solda a tensão residual ficará definida por $\sigma_r = 0,3\sigma_y$.

- (ii) Com o valor de σ_r definido deve-se calcular o fator de intensidade de tensões utilizando as tensões residuais K_{ISR} , utilizando neste caso também a Figura 3.2 utilizando como σ a tensão residual.
- (iii) Calcular o tamanho da fissura efetiva considerando a influência da plasticidade utilizando a expressão $a_{eff} = a + \left(\frac{1}{6n}\right) \left(\frac{K_{ISR}}{\sigma_y}\right)^2$, esta expressão assume que o estado tensional está mais próximo de um estado plano de deformações.
- (iv) Calcular o fator $\phi_o = \left(\frac{a_{eff}}{a}\right)^{0.5}$
- (v) Se calcula um fator de intensidade de tensões devido as tensões residuais modificado K_{JISR} utilizando a expressão $K_{Jsr} = \phi_o K_{ISR}$
- (vi) Se calcula um L_r modificado, que chamamos de $X = K_{jSr}(L_r/K)$
- (vii) Com o parâmetro X e o parâmetro L_r , na tabela 9.3 da norma API579 e se calcula o fator ζ . Esta tabela foi incluída no anexo 2 do presente trabalho.
- (viii) Finalmente se calcula o $\phi = \zeta\phi_o$

4. ESTUDO DE CASO

Se considera um vaso cilíndrico com propriedades indicadas na Tabela 4.1, considerando uma fissura longitudinal semi-elíptica no corpo cilíndrico do vaso próximo a uma solda longitudinal. Se considera que a solda foi submetida a um tratamento térmico para o alívio das tensões. O exemplo foi criado para ilustrar as potencialidades do método e não representa nenhum caso real específico. A Figura 4.1 ilustra a orientação da trinca e a Figura 4.2 apresenta um desenho com as dimensões do vaso de pressão e do defeito considerado.

Tabela 4.1 - Principais características do problema, * depende do material e da temperatura

Parâmetros utilizados	
Diâmetro interno [mm]	3048
Espessura nominal [mm]	24,4
Pressão interna [MPa]	0,17
Temperatura de operação [°C]	0
Material	ASTO 516GR70
Tref [°C]	-1,1
K_{ISr} [MPa \sqrt{mm}]	1856
σ_e [MPa]	262
σ_u [MPa]	482
a [mm]	5
$2c$ [mm]	81,28

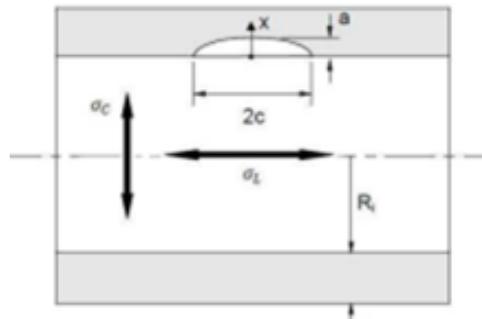


Figura 4.1 – Orientação da trinca no vaso de pressão.

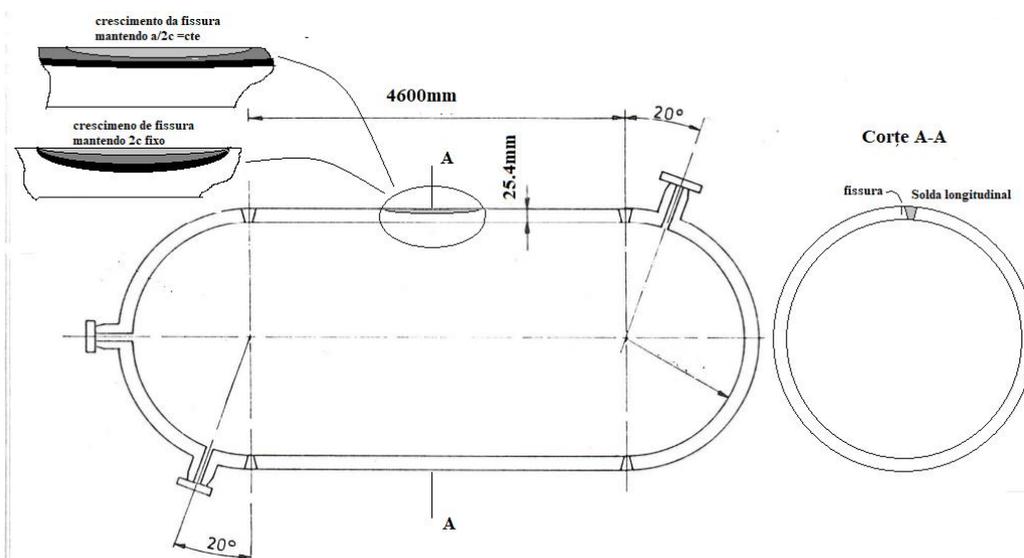


Figura 4.2- Esquema da geometria do vaso analisado e da posição do defeito considerado , no detalhe superior se ilustra como o defeito poderia crescer mantendo a relação $a/2c$ constante, ou mantendo o valor $2c$ constante.

5. RESULTADOS

Serão realizadas análises dos seguintes casos:

- Verificação do problema descrito na Tabela 4.1 utilizando o Nível 1 da API579, o método R6 e o Nível 2a da API579
- Estudo paramétrico considerando aumento da pressão interna do vaso (p_i) mantendo as dimensões da trinca ($a=5\text{mm}$, $2c=81\text{mm}$), mantendo a pressão original constante e aumentando o tamanho do defeito com a relação $a/2c$ constante. Este estudo foi feito utilizando o método R6 e o proposto pela API579 na Secção 9 no Nível 2a,
- Utilizando API579 na Secção 9 no Nível 2a foi também avaliado o defeito crescendo mantendo $2c=cte$, e aumentando a pressão interna mantendo a configuração do defeito original e considerando a influência das tensões residuais.

5.1 AVALIAÇÃO NÍVEL 1 API579(2016)

A Figura 5.1 foi retirada da norma API579(2016) para geometrias cilíndricas com fissuras semielípticas longitudinais e no eixo das ordenadas esta o comprimento crítico ($2c$). Na figura há curvas com linhas contínuas e tracejadas, tendo critério de escolha que a profundidade da trinca tem que ser menor que um quarto da espessura da parede para linhas contínuas sendo este o caso do equipamento em questão, para linhas tracejadas a relação tem que ser maior. A curva A é indicada para trincas localizadas longe da região afetada pela solda, a curva B quando o defeito esta na região afetada pela solda e com alívio de tensões e a curva C para regiões afetadas pela solda sem alívio de tensões. O defeito planar foi considerado dentro da zona afetada pela solda e com tensões residuais aliviadas, definida pela curva B. O valor da abscissa, determinado pela expressão mostrada na figura, determina a coordenada que vai encontrar a curva B, conforme a Figura 5.1 . O comprimento do defeito avaliado (81,28mm) ficou muito aquém do comprimento crítico obtido no nível 1 (165mm). Logo, o defeito passa pelo nível 1, sendo necessário testar o Nível 2 de avaliação. De qualquer forma será realizada a análise utilizando as outras metodologias.

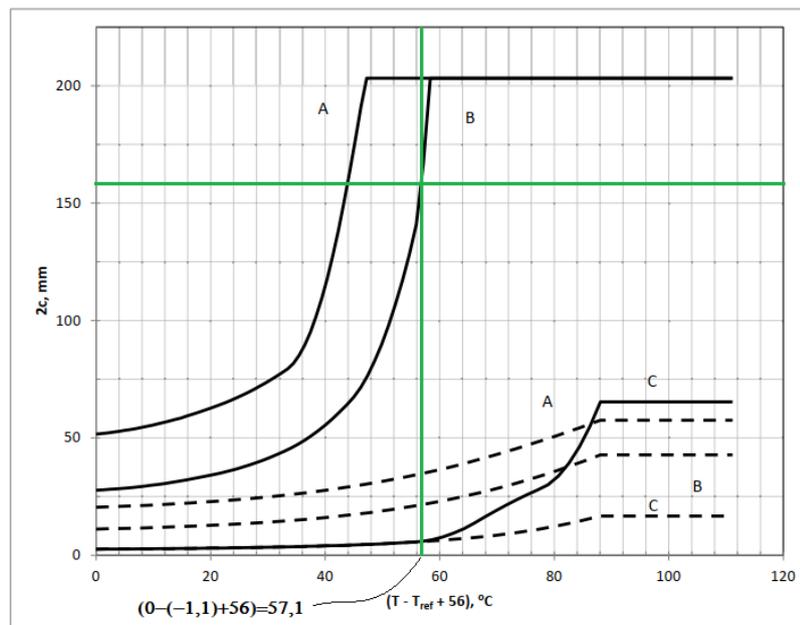


Figura 5.1 – Avaliação nível 1 do defeito apresentado na seção 4

5.2 AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA MÉTODO R6

Na avaliação pelo método R6 o caso de estudo é representado pelo ponto vermelho da Fig.5.2. Para determinar as coordenadas deste ponto o valor de K_r é determinado como na seção 3, fazendo o quociente entre o valor $K = 44,40 \text{ MPamm}^{0.5}$ obtido da Figura 3.2, caso b e o valor da tenacidade $K_c = 1850 \text{ MPamm}^{0.5}$, resultando $K_r = 0,023$. O cálculo do S_r é definido como a média da tensão que atua na ponta da fissura e a tensão de colapso, calculada pela expressão $\sigma_c = \left(\frac{\sigma_y + \sigma_u}{2}\right) \left(1 - \frac{a}{t}\right)$, o segundo termo multiplicando indica a fração da parede não afetada. A tensão aplicada é a tensão circunferencial do vaso em questão, obtida através da teoria membranal, $\sigma = 10,2 \text{ Mpa}$. A tensão de colapso é $\sigma_c = 298,77 \text{ MPa}$. Como consequência a coordenada no eixo das abscissas é $S_r = \frac{\sigma}{\sigma_c} = 0.033$.

Utilizando o método R6 na tabela 5.1 se obtém as coordenadas S_r , K_r e coeficientes de segurança para a situação em que as dimensões da fissura permanecem constantes e se eleva a pressão interna e a condição que varia a profundidade da trinca mantendo $a/2c=cte$.

Na Figura 5.2 os pontos das tabelas 5.1 e 5.2 são gráficos, cinza representa os pontos de criticidade quando a pressão foi variada mantendo as dimensões da fissura constantes e em azul a profundidade do defeito planar é incrementada, considerando a relação $a/2c=cte$.

Como se observa na figura abaixo a influência do pressão interna no desenvolvimento da falha, gera colapso por propagação instável da trinca. Já para o caso mantendo o nível de pressão constante é aumentando o tamanho do defeito mantendo $a/2c=cte$, se nota a evolução em direção de um colapso governado pela plasticidade.

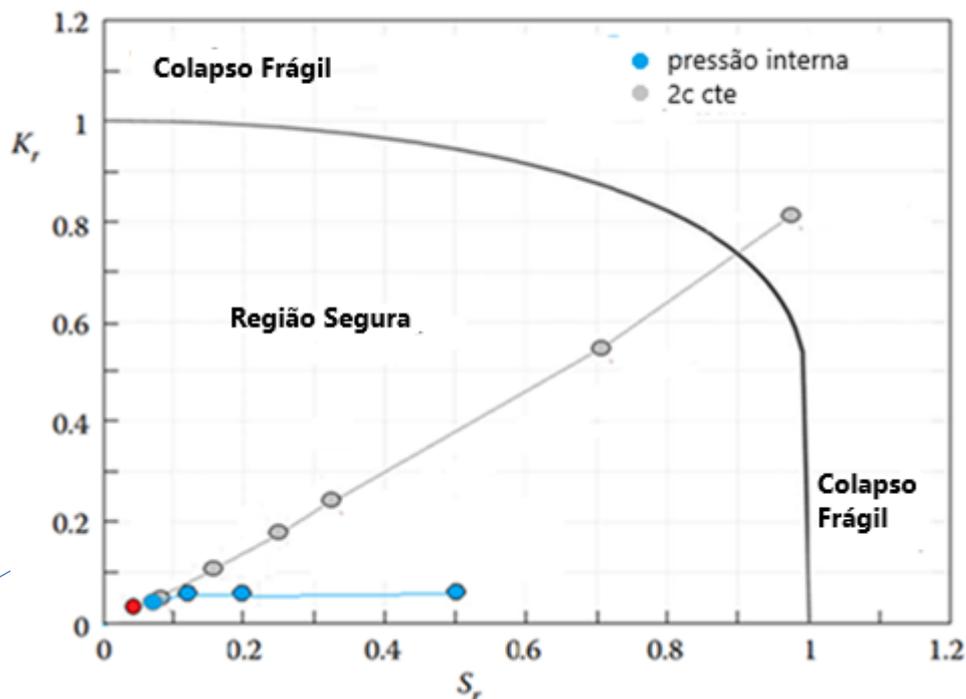


Figura 5.2 – Método R6 para o caso estudado e o estudo paramétrico.

Tabela 5. 1 pontos $S_{r,t}$ no Método R6, e coeficientes de segurança para a situação de $a=5\text{mm}$, $2c=81\text{mm}$ são considerados.

p_i [Mpa]	σ_{circ} [Mpa]	σ/σ_y	Q	K [Mpa $\text{mm}^{0.5}$]	$K_r=K/K_c$	$S_r=\sigma_{\text{circ}}/[(1-a/t)*(\sigma_y+\sigma_u)/2]$	CS
0,17	10,20	0,04	1,00	44,40	0,02	0,03	19,13
0,41	24,60	0,09	1,00	107,22	0,06	0,08	12,91
0,83	49,80	0,19	1,00	217,06	0,12	0,17	6,42
1,25	75,00	0,29	1,00	326,89	0,18	0,25	3,52
1,66	99,60	0,38	0,90	457,59	0,25	0,33	2,90
3,33	199,80	0,76	0,82	998,92	0,52	0,67	1,31
5,00	199,80	1,15	0,75	1509,85	0,81	1,00	0,94

Tabela 5.2– Pontos S_r, K_r no Método R6, e coeficientes de segurança para $p_i=0,17\text{Mpa}$, considerando o crescimento da fissura mantendo $a/2c=cte$

a	2c	$S_r=\sigma_{circ}/[(1-a/t)*(\sigma_y+\sigma_u)/2]$	$K_I[\text{Mpamm}^{0.5}]$	$K_r=K_i/K_c$	CS
5	81	0,03	44,40	0,02	19,13
15	246	0,067	77	0,04	12,29
20	328	0,13	88,91	0,05	7,75
22	360	0,20	93,25	0,05	5,22
24	377	0,50	97,40	0,05	2

5.3 AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA NÍVEL 2 NORMA API 579

Utilizando esta metodologia foi também realizada a avaliação do defeito original ($p_i=0.17\text{Mpa}$, $a=5\text{mm}, 2c=81\text{mm}$), identificado por um ponto vermelho na figura 5.3.

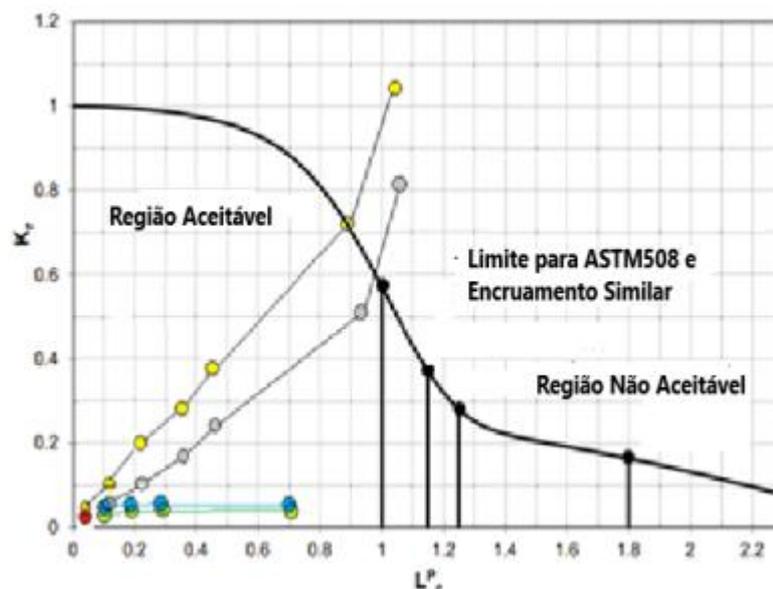


Figura 5.3- Diagrama FAD para API 579 seção 9 Nível 2 A, em vermelho indicado a situação original ($p_i=0.17, a=5, 2c=81\text{mm}$, em celeste variação do defeito com $p_i=cte$, mantendo $a/2c$ cte, em verde mantendo $2c=cte$. Mantendo o defeito cte ($a=5\text{mm}, 2c=81\text{mm}$) e variando a pressão interna, em cinza sem considerar a correção do K_r devido as tensões residuais, e em amarelo considerando a correção do K_r devido as tensões residuais.

Foram avaliadas as diversas situações descritas:

Considerando a pressão interna original ($p_i=0.17$) e variando o tamanho da fissura. Mantendo a relação $a/2c$ constante na tabela 5.3, e considerando que $2c=cte$ na tabela 5.4.

Se apresentam os valores de L_r, K_r , e os coeficientes de segurança avaliados considerando o tamanho do defeito constante ($a=5\text{mm}, 2c=81\text{mm}$) e modificada a pressão interna. Na tabela 5.5 sem considerar a contribuição das tensões residuais e na tabela 5.6 considerando as tensões residuais no cálculo do K_r .

Na Figura 5.3 se ilustra a evolução dos 4 casos considerados. Mostrando de forma clara qual é o mecanismo de colapso esperado em cada caso. É importante notar que na figura 5.3, ao considerar as

tensões residuais no cálculo do K_r , a criticidade evolui por um caminho mais próximo a um colapso frágil, o que evidencia a importância de considerar este tipo de correção.

A Figura A3.1 e A3.2 apresentadas no Apêndice 1 deste trabalho mostram os resultados em termos da variação dos coeficientes de segurança. Na figura A3.1 se compara a performance do método R6 e do API579 nível 2a., observando a evolução dos coeficientes de segurança quando a pressão é variada, deixando fixo o tamanho do defeito e o caso quando a pressão é deixada constante variando o tamanho do defeito, mantendo a relação $a/2c=cte$. Se pode observar que o método R6 é mais conservativo que o método da API579 para valores intermédios de valores de abcissas. Para valores altos, o coeficiente de segurança fica muito sensível a pequenos erros de cálculo problema que terá que ser avaliado na continuação deste trabalho.

Na figura A3.2 é usada a metodologia proposta na API579 nível 2a considerando a pressão constante e variando o defeito, mantendo $a/2c=cte$, e também $2c=cte$. Nesse caso é avaliada a influência do K_r devido a presença das tensões residuais. No caso de diferentes formas de evolução dos defeitos o avanço da fissura mantendo $a/2c=cte$ resultou ser mais crítico que mantendo a dimensão $2c$ fixa. Como era previsto, as tensões residuais na avaliação do valor de K_r influenciou na evolução do coeficiente de segurança, mostrando que a consideração da tensão residual é importante na determinação do K_r . Mas, valores muito altos de coeficiente de segurança se mostraram muito sensíveis a pequenas mudança na determinação das coordenadas L_r , K_r . Na avaliação dos coeficientes de segurança também foi interessante ver como a mudança de pressão produz uma variação hiperbólica do coeficiente de segurança em função da pressão interna e no caso da variação do defeito esta variação se apresenta praticamente linear sobre tudo utilizando a Metodologia Proposta pela API579 Nível 2 A.

Tabela 5.3 – Pontos L_r, K_r e coeficientes de segurança para a situação $p_i=0,17\text{Mpa}$, considerando o crescimento da fissura mantendo a relação $a/2c=cte$

a	2c	$L_r = \sigma_{circ} / [(1-a/t) * S_y]$	$K [MPamm^{0.5}]$	$K_r = K_i / K_c$	CS
5	81	0,048	44,40	0,024	27,86
15	246	0,095	77,00	0,041	10,58
20	328	0,183	88,91	0,048	6,19
22	360	0,291	93,25	0,050	4,47
24	377	0,706	97,40	0,052	1,63

Tabela 5.4 – Pontos L_r, K_r coeficientes de segurança para a situação $p_i=0,17\text{Mpa}$, considerando o crescimento da fissura mantendo $2c=cte$;

a[mm]	a/2c	Q	K [MPamm ^{0.5}]	$L_r = \sigma_{circ} / [(1-a/t) * \sigma_y]$	$K_r = K / K_c$	CS
5	0,062	1,00	44,40	0,048	0,02	27,86
15	0,185	1,30	67,54	0,095	0,04	12,50
20	0,247	1,40	75,15	0,183	0,04	6,22
22	0,272	1,60	73,72	0,291	0,04	4,07
24	0,296	1,75	73,63	0,706	0,04	1,36

Tabela 5.5 – Pontos L_r, K_r no API579 Seção 9 Nível 2 A, e coeficientes de segurança para a situação $a=5\text{mm}, 2c=81\text{mm}$ mudando a pressão interna

p_i	σ_{circ}	K [MPamm ^{0.5}]	K_r	$L_r = \sigma_{circ} / [(1-a/t) * S_y]$	CS
0,17	10,2	44,44	0,024	0,048	27,86
0,41	24,6	107,22	0,058	0,117	8,88

0,83	49,8	217,06	0,117	0,238	4,59
1,25	75	326,89	0,176	0,356	3,00
1,66	99,6	457,59	0,246	0,473	2,22
3,33	199,8	961,68	0,518	0,95	1,18
5	300	1509,84	0,813	1,00	0,85

Tabela 5.6 – Pontos L_r, K_r no API579 Seção 9 Nível 2 A, e coeficientes de segurança para a situação $a=5\text{mm}, 2c=81\text{mm}$ mudando a pressão interna, e considerando a influencia da tensão residual no calculo do K_r ,

σ_{circ}	p_i	σ/σ_y	K [Mpa mm ^{0,5}]	K_{rp}	K_{ISR} [Mpa mm ^{0,5}]	a_{eff} [mm]	ϕ_o	K_{JSR} [Mpa mm ^{0,5}]	χ	ζ	ϕ	K_r	CS
10,2	0,17	0,04	44,46	0,02	72,46	5,00	1,00	72,49	0,08	1,00	1,00	0,06	1,25
24,6	0,41	0,09	107,22	0,06	112,53	5,01	1,00	112,64	0,12	1,01	1,01	0,12	6,96
49,8	0,83	0,19	217,06	0,12	160,11	5,02	1,00	160,42	0,17	1,02	1,02	0,21	3,93
75	1,25	0,29	326,89	0,18	196,48	5,03	1,00	197,07	0,21	1,06	1,06	0,29	2,62
99,6	1,66	0,38	457,59	0,25	226,43	5,04	1,00	227,32	0,24	1,09	1,09	0,38	1,97
199,8	3,33	0,76	961,68	0,52	320,70	5,08	1,01	323,23	0,32	1,18	1,19	0,72	1,00
300	5,00	1,15	1509,85	0,81	392,97	5,12	1,01	397,63	0,26	1,11	1,12	1,05	0,77

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo para diversas estratégias propostas a fim de avaliar a criticidade de defeitos planares. O método R6 e duas estratégias da seção 9 apresentadas na norma API 579. Além do caso de estudo ser avaliado pelas três estratégias, se realizaram análises paramétricas para avaliar a influência do crescimento do defeito e do aumento da pressão na evolução da criticidade do defeito. Utilizando a norma API579 nível 2a foi avaliada também a influência de considerar a forma como o defeito cresce e a influência das tensões residuais na avaliação do fator K_r .

Ficou ilustrado que a utilização deste tipo de análise tem grande potencial na gestão da criticidade de defeitos em estruturas pressurizadas. Métodos mais sofisticados empregando elementos finitos podem ser complementados com este tipo de avaliação para entregar soluções consistentes e seguras.

A utilização de soluções numéricas que se integrem as metodologias utilizadas pela norma é um caminho que permitirá ter resultados mais robustos. Nesse sentido, a API(579) seção 9, nível 3 permite a utilização de soluções numéricas dentro do contexto da Norma.

A utilização deste tipo de métodos pode ser uma ferramenta a ser combinada com metodologias de avaliação econômica de equipamentos industriais, Esta alternativa será explorada na continuação da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, T. L.; “Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications”, Taylor & Francis Group, 3rd edition, 2010.

API 579-1/ASME FFS-1, “Fitness-For-Service”, 3rd Edition, 2016.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. Materiais de Engenharia. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. ISBN 978-85-221-0812-8

Assessment of integrity of structures containing defects. CEGB Report R/H6. 1976; Revision 1, 1977; Revision 2, 1980; Revision 3, 1980.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Introdução à Metalurgia. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN 978-85-216-1804-1

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Introdução à Metalurgia. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN 978-85-216-1804-1

Dugdale, D. S. (1960). "Yielding of steel sheets containing slits." Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 8(2), 100-104

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. Mecânica dos Materiais. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2018. 832 p. ISBN 978-85-221-1055-8.

HAN W., REDDY D., PLASTICITY MATHEMATICAL THEORY AND NUMERICAL ANALYSIS, Vol9, interdisciplinary Applied Mathematics, (1999), Springer, 373pp, ISBN: 0387987045, 9780387987040.

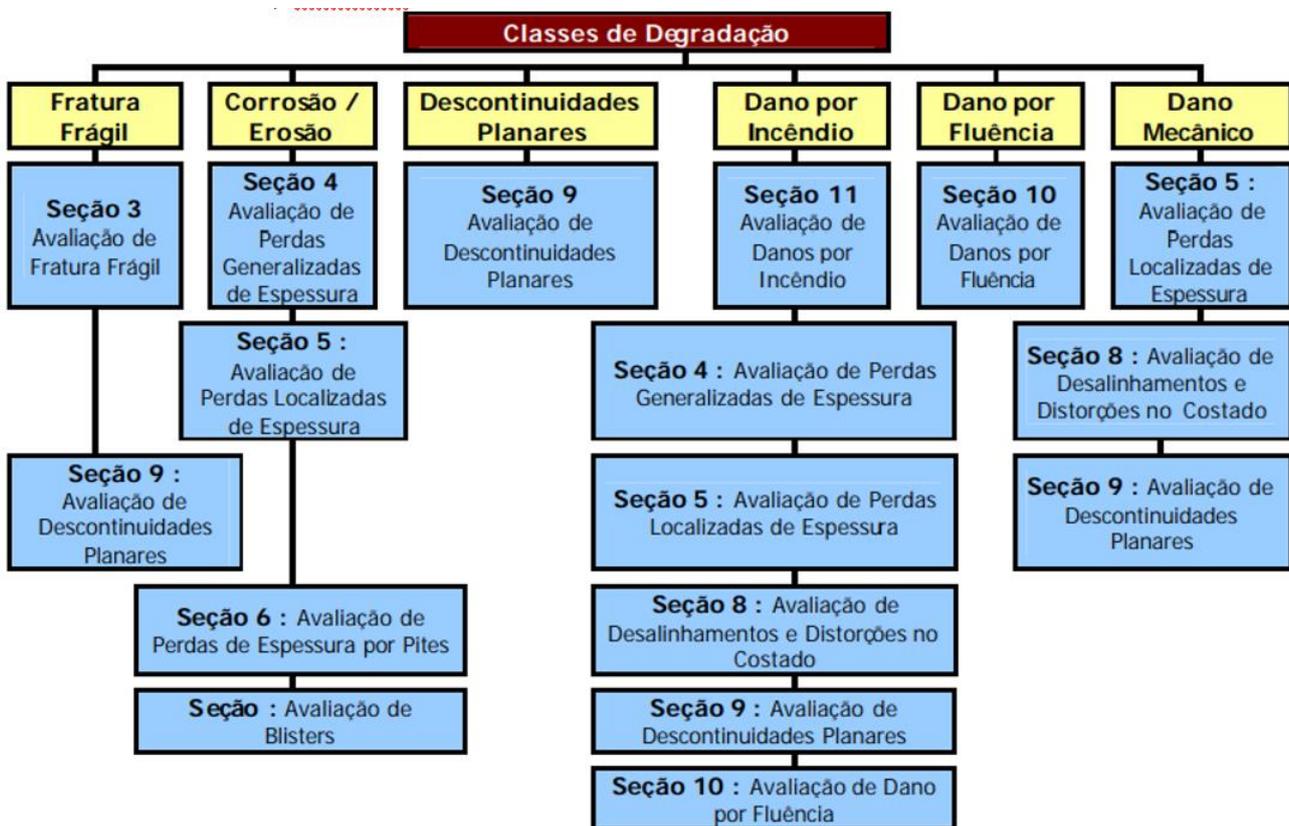
Kaninen M. F. & Popelar C. F. “Advanced Fracture Mechanics”, Oxford University Press, 1985.

MEDINA, J. A. H., DE CASTRO, J. T. P. “Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica”. 2014.

Machado, R. O.; “Análise de criticidade de descontinuidade em um bocal de um vaso de pressão”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. Teoria da Elasticidade. 4. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2018. ISBN 978-85-314-1533-5.
BS 7910, 2019 Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, BSi, 2019

ANEXO1: Organograma que ilustra a vinculação entre o tipo do defeito e como ele é tratado pela norma. API 579(2016)



ANEXO 2: Tabela 9.3 da norma API579(2016) para calcular a influência das tensões residuais no cálculo do fator K_r .

Table 9.3 – Plasticity Interaction Factor – Parameter ξ as a Function of L_r^p and X

L_r^p	X																		
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.01	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.002	1.003	1.011	1.019	1.023	1.026	1.028	1.029	1.030	1.031	1.032
0.02	1	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	1.006	1.019	1.031	1.038	1.042	1.044	1.046	1.048	1.051	1.047
0.03	1	1.001	1.001	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	1.006	1.008	1.026	1.040	1.048	1.053	1.056	1.059	1.060	1.061	1.062
0.04	1	1.001	1.001	1.001	1.002	1.002	1.004	1.006	1.008	1.011	1.031	1.047	1.056	1.061	1.065	1.068	1.071	1.076	1.081
0.06	1	1.002	1.002	1.003	1.003	1.004	1.006	1.009	1.012	1.016	1.039	1.058	1.068	1.074	1.078	1.083	1.087	1.092	1.099
0.08	1	1.002	1.003	1.004	1.004	1.005	1.008	1.012	1.016	1.020	1.045	1.066	1.077	1.084	1.088	1.093	1.098	1.103	1.112
0.1	1	1.004	1.004	1.005	1.006	1.007	1.011	1.015	1.020	1.024	1.050	1.072	1.084	1.092	1.097	1.102	1.108	1.114	1.122
0.12	1	1.005	1.006	1.007	1.008	1.009	1.013	1.018	1.023	1.028	1.054	1.077	1.090	1.099	1.104	1.110	1.116	1.122	1.132
0.14	1	1.007	1.008	1.009	1.010	1.011	1.016	1.022	1.027	1.032	1.057	1.082	1.096	1.105	1.111	1.117	1.123	1.131	1.142
0.16	1	1.008	1.010	1.011	1.012	1.013	1.019	1.025	1.031	1.035	1.060	1.086	1.101	1.111	1.117	1.123	1.130	1.138	1.149
0.18	1	1.010	1.012	1.013	1.014	1.016	1.022	1.029	1.034	1.038	1.063	1.090	1.106	1.116	1.124	1.129	1.137	1.145	1.158
0.2	1	1.012	1.014	1.015	1.017	1.018	1.026	1.033	1.038	1.041	1.066	1.094	1.110	1.121	1.128	1.136	1.144	1.153	1.166
0.3	1	1.027	1.029	1.031	1.033	1.035	1.045	1.051	1.054	1.055	1.080	1.113	1.133	1.146	1.155	1.165	1.175	1.187	1.205
0.4	1	1.049	1.052	1.054	1.057	1.059	1.068	1.071	1.071	1.071	1.099	1.135	1.157	1.173	1.184	1.196	1.209	1.225	1.248
0.5	1	1.082	1.085	1.087	1.089	1.091	1.096	1.096	1.095	1.095	1.126	1.164	1.187	1.203	1.215	1.229	1.246	1.266	1.292
0.6	1	1.126	1.128	1.129	1.130	1.131	1.131	1.129	1.128	1.129	1.161	1.196	1.218	1.234	1.248	1.262	1.284	1.311	1.337
0.7	1	1.176	1.175	1.175	1.175	1.174	1.171	1.169	1.168	1.169	1.195	1.224	1.242	1.256	1.269	1.288	1.314	1.343	1.365
0.8	1	1.215	1.214	1.212	1.211	1.210	1.204	1.200	1.198	1.196	1.210	1.228	1.241	1.252	1.267	1.291	1.316	1.341	1.365
0.9	1	1.215	1.212	1.210	1.208	1.206	1.198	1.191	1.185	1.180	1.178	1.184	1.190	1.199	1.218	1.240	1.259	1.271	1.272
1	1	1.133	1.130	1.128	1.125	1.123	1.112	1.102	1.094	1.087	1.070	1.067	1.069	1.080	1.098	1.105	1.104	1.094	1.073
1.1	1	0.951	0.948	0.946	0.943	0.941	0.930	0.921	0.912	0.905	0.884	0.877	0.882	0.887	0.879	0.861	0.842	0.820	0.801
1.2	1	0.710	0.708	0.707	0.705	0.703	0.695	0.688	0.682	0.677	0.661	0.658	0.649	0.633	0.613	0.597	0.583	0.571	0.561
1.3	1	0.498	0.497	0.496	0.495	0.494	0.490	0.486	0.483	0.480	0.471	0.461	0.449	0.439	0.426	0.427	0.420	0.415	0.413
1.4	1	0.376	0.375	0.375	0.375	0.374	0.373	0.371	0.370	0.368	0.363	0.361	0.359	0.358	0.357	0.355	0.354	0.351	0.351
1.5	1	0.334	0.334	0.333	0.333	0.333	0.332	0.331	0.331	0.330	0.330	0.331	0.332	0.333	0.332	0.333	0.331	0.333	0.331
1.6	1	0.320	0.319	0.319	0.319	0.319	0.318	0.318	0.317	0.317	0.317	0.319	0.320	0.321	0.320	0.320	0.322	0.319	0.319
1.7	1	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308	0.307	0.307	0.306	0.306	0.306	0.307	0.308	0.309	0.309	0.308	0.309	0.308	0.308
1.8	1	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296	0.295	0.295	0.294	0.294	0.294	0.295	0.296	0.296	0.295	0.297	0.295	0.297	0.292
1.9	1	0.283	0.283	0.283	0.283	0.282	0.282	0.282	0.281	0.281	0.281	0.281	0.282	0.282	0.284	0.283	0.281	0.280	0.280
2	1	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.267	0.267	0.267	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.262	0.261	0.256	0.263	0.266

Apêndice 1: Curvas Que mostram a variação do coeficiente de segurança nos estudos paramétricos realizados.

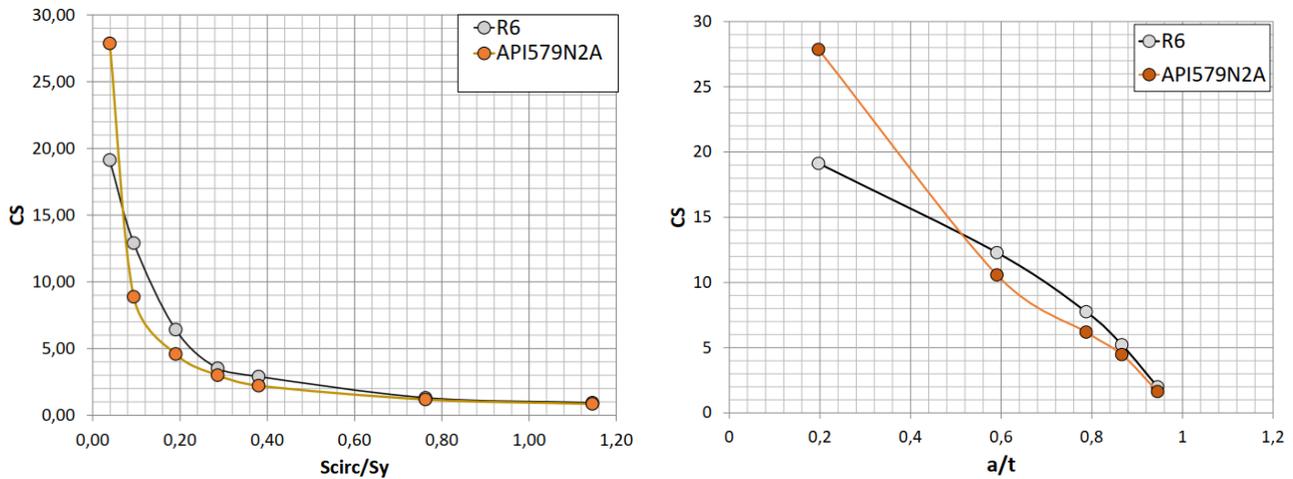


Figura A3.1– Variação dos Coeficientes de Segurança, nos métodos R6 e API579Seção9, Nivel2A. (a) variando a pressão interna mantendo fixo o tamanho do defeito, (b) mantendo a pressão constante variando o tamanho do defeito com $a/2c = \text{cte}$.

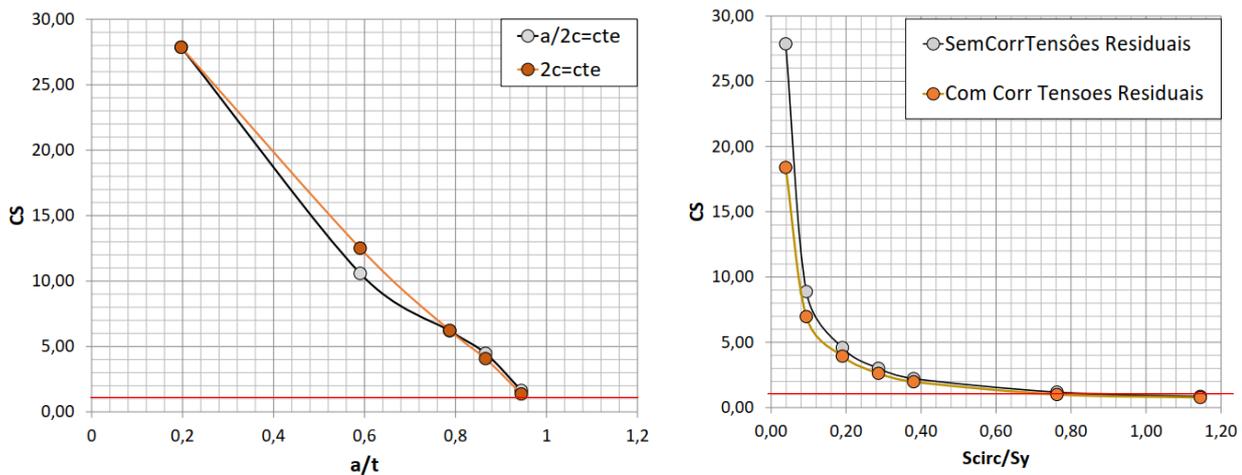


Figura A3.2– Variação dos Coeficientes de Segurança, nos métodos API579Seção9, Nivel2A. (a) variando a forma como cresce o defeito, (b) considerando e sem considerar a correção devido as tensões residuais. A linha vermelha indica $CS=1$