

PABLO VINÍCIUS BASSANI

ANÁLISE DE FALHA DE VASO DE PRESSÃO

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.

Orientadores: M. Sc Eng. Mecânico Heraldo José Amorim  
Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre  
2009



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ANÁLISE DE FALHA DE VASO DE PRESSÃO**

**PABLO VINÍCIUS BASSANI**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

***BANCA EXAMINADORA:***

Prof. Dr. JUN SÉRGIO ONO FONSECA  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. WALTER JESUS CASAS  
UFRGS / DEMEC

Prof. Me. VICENTE BERGAMINI PUGLIA  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre  
2009

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família ...

ao meu orientador, *Prof. Heraldo José Amorim* que, apesar de estar extremamente ocupado, sempre achou um tempo para atender às minhas dúvidas ...

à Mega Steam Engenharia LMTA, em particular na pessoa do engenheiro Rodrigo M. Huppés, por todo auxílio prestado, fundamental na escolha do tema deste trabalho e principalmente pela colaboração na solução das dúvidas.

Todas as respostas para nossas questões existem,  
elas são apenas muito simples para podermos acreditar...

**BASSANI, P. V. Avaliação de Integridade de Vasos de Pressão Utilizando a API 579.** 2009. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## **RESUMO**

Vasos de pressão são equipamentos largamente utilizados pela indústria para armazenamento de fluídos pressurizados. Devido à responsabilidade destes equipamentos, seu projeto deve seguir códigos internacionalmente reconhecidos. Estes códigos de projeto não admitem imperfeições. Porém é sabido que, em certas ocasiões, vasos de pressão com descontinuidades podem continuar operando normalmente. O colapso de um vaso de pressão durante o Teste Hidrostático chamou atenção para o estudo da criticidade de descontinuidades. Este trabalho pretende, através do uso das normas da API 579, determinar o tamanho crítico de uma trinca para causar o colapso do vaso. Estabelecendo assim, se uma descontinuidade deste tipo pôde ter sido a causa da falha.

**PALAVRAS-CHAVE:** Vasos de Pressão, API 579, Código ASME, Vazamento Antes da Ruptura, Teste Hidrostático.

**BASSANI, P. V. Avaliação de Integridade de Vasos de Pressão Utilizando a API 579.** 2009. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

### **ABSTRACT**

Pressure vessels are widely used in industry in order to store compressible fluid in compact spaces by raising its pressure. Because the responsibility of these equipments its projects should respect international recognized design codes. However, pressure vessels with discontinuities are not tolerated by these codes, although it is well know that these equipments could continue operating in certain occasions. The collapse of a pressure vessel during a Hydrostatic Test caught the attention to the study of some discontinuities. This work aims to determine by using API 579's procedures what would be the size of a flaw that would bring this pressure vessel to a brittle failure and concluding by that if the cause of the failure could be a crack-like flaw.

**Keywords:** Pressure Vessels, API 579, ASME code, Leak Before Break, Hydrostatic Test

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Objetivos .....  | 1         |
| 1.2. Estrutura do Trabalho.....   | 1         |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                   | <b>1</b>  |
| 2.1. Código ASME .....  | 1         |
| 2.2. Teste Hidrostático (TH) .....  | 2         |
| 2.3. Norma Regulamentadora 13 (NR-13).....  | 3         |
| 2.4. Vazamento Antes da Ruptura (“ <i>Leak Before Break</i> ”) .....                            | 3         |
| 2.5. Mecânica da Fratura.....   | 3         |
| <b>2.5.1. Determinação de KI</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>2.5.2. Determinação de KIC</b> .....   | <b>5</b>  |
| 2.6. Diagrama FAD (“ <i>Failure Assessment Diagram</i> ”).....                                  | 5         |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>  | <b>6</b>  |
| 3.1. Apresentação do Problema .....   | 6         |
| <b>3.1.1. Descrição do vaso de pressão:</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>3.1.2. A inspeção e o colapso</b> .....  | <b>7</b>  |
| 3.2. Modelo Técnico .....   | 8         |
| 3.3. Determinação da PMTA.....  | 8         |
| <b>3.3.1. Corpo cilíndrico sob pressão interna (parágrafo UG-27):</b> .....                     | <b>8</b>  |
| <b>3.3.2. Tampos conformados sob pressão no lado côncavo (parágrafos UG-32 e 1-6):</b><br>..... | <b>9</b>  |
| 3.4. API 579 .....  | 9         |
| <b>3.4.1. API 579, Seção 9, Nível 2:</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>4. RESULTADOS.....</b>   | <b>11</b> |
| 4.1. PMTA, PTH e Espessura Mínima .....   | 11        |
| 4.2. Determinação do tamanho limite para trinca pela API 579 .....                              | 12        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>APÊNDICE A – EXEMPLO DE PROCEDIMENTO NÍVEL 2 DA API 579 PARA<br/>UMA TRINCA .....</b> | <b>15</b> |



## **1. INTRODUÇÃO**

Vasos de pressão são equipamentos muito comuns em diversos processos fabris, sendo sua principal aplicação o armazenamento de fluidos compressíveis em pequenos volumes, através do aumento da pressão do fluido. O fato de trabalhar com fluidos pressurizados torna estes equipamentos perigosos, uma vez que a falha de algum componente pode causar descompressão explosiva, o que implica em grandes perdas materiais e eventualmente humanas.

Para garantir a integridade estrutural de vasos de pressão o projeto deve respeitar normas internacionalmente reconhecidas. Estas fazem exigências quanto a materiais, processos de soldagem, disposição de acessórios de segurança, entre outros. Porém, pouco discorrem sobre defeitos inerentes da fabricação ou gerados durante a operação destes equipamentos. A existência de algum defeito normalmente é reprovável pelo código de projeto.

Por outro lado, a experiência demonstra que equipamentos com defeitos podem continuar operando em certas ocasiões, dependendo do tipo de defeito e condições de trabalho. O colapso de um vaso de pressão durante o Teste Hidrostático exigido pela NR-13 chamou atenção para um estudo destas descontinuidades.

### **1.1. OBJETIVOS**

Os motivos reais que levaram o vaso ao colapso são desconhecidos, sendo que as principais hipóteses são excesso de pressão durante o Teste Hidrostático, corrosão ou algum defeito preexistente no material. O presente trabalho pretende avaliar a última hipótese simulando um defeito do tipo trinca no costado deste vaso e estabelecendo, através da metodologia proposta pela API 579, qual seria o tamanho mínimo da descontinuidade que tornaria o vaso inapto a suportar a pressão de teste. Desta forma, comprovando ou refutando a hipótese da trinca.

### **1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está organizado de tal forma que primeiramente serão apresentadas as teorias e metodologias utilizadas. A Seção 2 traz a fundamentação teórica, sendo uma revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento do trabalho. A Seção 3 traz a descrição do vaso de pressão em estudo, conferindo, através do Código ASME, as pressões de projeto especificadas pelo fabricante. Nesta seção também é apresentada a metodologia para cálculos de avaliação de integridade segundo a API 579.

Finalmente, as Seções 4 e 5 apresentam os resultados obtidos e as conclusões. Determinando-se desta maneira qual seria a dimensão mínima de uma trinca para levar o vaso ao colapso durante o Teste Hidrostático.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. CÓDIGO ASME**

Projetos de vasos de pressão devem ser baseados em códigos de projeto reconhecidos como, por exemplo, o código alemão A.D. Merkblätter, a norma inglesa BS-5500, o Código francês S.N.C.T.T.I. e o código americano ASME. No Brasil, o código ASME é o mais utilizado.

Antes da elaboração do código ASME, acidentes com caldeiras e vasos de pressão eram relativamente comuns, quase sempre envolvendo conseqüências catastróficas. A necessidade de padronizar e orientar projetos de vasos de pressão e caldeiras fez com que fosse criado um código para estabelecer regras de projeto seguro. Foi então criado o código ASME, elaborado pela Associação Americana de Engenheiros Mecânicos. Este código aborda técnicas de soldagem, técnicas de ensaios não destrutíveis, materiais, projeto de caldeiras, projeto de aquecedores (boilers) e projeto de vasos de pressão.

Ele se apresenta dividido em seções, sendo que destas, a oitava trata da construção de vasos de pressão. Esta seção possui três divisões: Na Divisão 1 simplesmente são impostas regras para a construção de vasos, não exigindo nenhuma análise mais detalhada dos esforços atuantes. A integridade dos vasos é garantida por grandes coeficientes de segurança. A Divisão 2 permite uma análise mais refinada para as tensões atuantes e permite a construção de vasos com espessuras menores, visto que esta utiliza fatores de segurança mais apropriados. A Divisão 3 deve ser utilizada para vasos de altíssima pressão.

O presente trabalho utiliza o código ASME, Seção VIII, Divisão 1 para a determinação das condições de projeto do vaso de pressão. Ela fornece as fórmulas básicas para o cálculo da Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) e Espessura Mínima de um vaso de pressão. A PMTA é a pressão máxima que o vaso poderá trabalhar, valor este que nunca deverá ser excedido, exceto quando da execução do Teste Hidrostático (TH), descrito no parágrafo 2.2 deste trabalho. As equações apresentadas por essa divisão são baseadas principalmente na teoria da membrana e de Lamè.

Segundo o parágrafo UG-23 do referido código: “um vaso de pressão, quando projetado pelas regras dessa divisão, será construído de tal forma que as tensões de membrana máximas esperadas na operação não ultrapassem o valor das tensões admissíveis do material”; exceto para elementos como bocais e flanges que são calculados por uma teoria mais apropriada e protegidos por grandes fatores de segurança.

A escolha deste código de projeto se deu principalmente por dois fatores. Pelo fato de ser o código de projeto original do vaso de pressão em estudo e pelo fato do rompimento do vaso ter ocorrido no corpo cilíndrico, longe de descontinuidades, onde a teoria de membrana é perfeitamente aplicável.

Neste trabalho também será utilizada a Seção II do código ASME. Ela fornece algumas as propriedades mecânicas de materiais comumente utilizados. Importante mencionar que esta seção impõe um dos principais fatores de segurança, nela a tensão admissível de um material é o menor valor entre  $\sigma_{rup}/3,5$  e  $2/3*\sigma_{esc}$ , onde  $\sigma_{rup}$  é a tensão de ruptura e  $\sigma_{esc}$  é a tensão de escoamento.

## 2.2. TESTE HIDROSTÁTICO (TH)

O Teste Hidrostático é considerado um ensaio não destrutível e tem a principal finalidade de detectar imperfeições em vasos de pressão, caldeiras ou tubulações. Ele é exigido pelo código ASME após a fabricação do equipamento para detecção de descontinuidades servindo também como prova de que o vaso suportará a pressão de projeto.

A execução do teste hidrostático consiste em encher o vaso de pressão com fluido incompressível, preferencialmente água, e aumentar suavemente a pressão até um determinado valor acima da PMTA. Uma vez atingida a Pressão de Teste Hidrostático (PTH) esta deve ser mantida por aproximadamente trinta minutos. Transcorrido este tempo a pressão é aliviada para 2/3 da PTH e uma inspeção visual é conduzida com o objetivo de localizar vazamentos.

Fluido incompressível deve ser utilizado por motivos de segurança, pois em caso de falha do material o vaso de pressão não tende a explodir como faria se fosse utilizado fluido compressível.

Até 2004 o Código ASME exigia uma PTH 1,5 vezes maior que a PMTA do vaso de pressão. A edição atual requer uma PTH 1,3 vezes maior que a PMTA. Pelo fato do vaso ter sido projetado com uma edição anterior à de 2004, a PTH do vaso em estudo será considerada como  $1,5 \cdot PMTA$ .

### 2.3. NORMA REGULAMENTADORA 13 (NR-13)

No Brasil a norma que regulamenta vasos de pressão é a NR-13. Ela exige uma série de requisitos para a operação segura de vasos de pressão, sendo um destes, a realização periódica de Teste Hidrostático. Segundo a NR-13, o vaso de pressão deve ser submetido a Teste Hidrostático toda vez que for instalado em um novo local de operação. Foi o atendimento a este item que levou o equipamento em estudo à falha.

Existe uma forte discussão sobre a validade da realização periódica de Teste Hidrostático uma vez que um aumento de pressão além do valor de projeto pode fazer com que trincas aumentem significativamente podendo levar o vaso ao colapso. Em contrapartida, o TH visa garantir que o equipamento ainda está apto a operar.

### 2.4. VAZAMENTO ANTES DA RUPTURA (“LEAK BEFORE BREAK”)

O vazamento do fluido através da chapa é um dos resultados esperado de um vaso com defeito passante submetido a Teste Hidrostático. Isto ocorre pois, dependendo do material, temperatura e espessura de chapa, uma trinca pode ter dimensões tal que permitam o vazamento de líquido sem que ocorra colapso frágil do vaso. Segundo Wilkowski (2000) uma trinca estável em condições normais de operação e que permaneça estável durante um evento em que seja imposta uma sobre pressão (por exemplo, o Teste Hidrostático) pode apresentar vazamento.

Este trabalho pretende determinar qual é o tamanho limitante de uma trinca para a observação deste fato sem que ocorra o colapso frágil do material. Esta análise é muito importante uma vez que a ocorrência de vazamento durante o teste teria indicado a presença de defeito e este poderia, então, ser reparado.

### 2.5. MECÂNICA DA FRATURA

A Mecânica dos Sólidos é um campo da engenharia que estuda o comportamento estrutural dos materiais. Através desta metodologia se pode avaliar se uma estrutura construída com materiais conhecidos e isentos de imperfeições suportará as tensões exigidas.

Porém até mesmo os materiais fabricados pelos mais modernos processos e estruturas construídas sob o mais rígido controle de qualidade podem apresentar defeitos. Surge então a necessidade de um campo de estudos que dê suporte ao projeto e aceitação de equipamentos com defeitos. Este campo de estudos é a Mecânica da Fratura.

A Mecânica da Fratura é um campo da engenharia complementar à Resistência dos Materiais e se destina ao estudo de descontinuidades como, por exemplo, trincas. Para um melhor entendimento podemos relacionar estes dois campos como segue na Tabela (1).

Tabela 1 – Comparação entre a Resistência dos Materiais e a Mecânica da Fratura.

| Resistência dos Materiais   | Mecânica da Fratura   |
|---|---|
| Critério básico: Tensão atuante deve ser menor que a tensão de escoamento.                        | Critério Básico: Intensidade de tensões na ponta da trinca deve ser menor que a tenacidade à fratura do material. |
| $\sigma_{\text{máx}} \leq \sigma_{\text{esc}}$  | $K_I \leq K_{IC}$   |
| $\sigma_{\text{máx}}$ é a Tensão Máxima na estrutura.   | $K_I$ é a Intensidade de Tensões na ponta da trinca.  |
| $\sigma_{\text{esc}}$ é a propriedade de resistência mecânica do material (Tensão de Escoamento). | $K_{IC}$ é a Tenacidade à fratura do material, para esforços no sentido de abrir a trinca.                        |
| Falha ocorre quando a tensão alcança a tensão de escoamento.                                      | Falha ocorre quando a intensidade de tensões na ponta do defeito atinge a tenacidade à fratura do material.       |

### 2.5.1. Determinação de $K_I$

Um exemplo clássico para explicar a mecânica da fratura é o da chapa plana infinita com um orifício sendo tracionada em uma direção principal por uma tensão  $\sigma_0$  como mostra a figura (1). Sabe-se que essa descontinuidade gera em torno de si um aumento de tensão localizada.

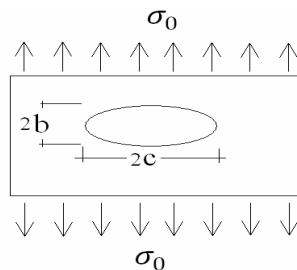


Figura 1 – Placa plana com orifício passante.

Quando este orifício é passante e tem o formato de uma elipse, a tensão máxima ocorre na extremidade do eixo maior e pode ser estimada pela equação (1):

$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_0 * (1 + 2c/b) \quad (1)$$

onde  $\sigma_{\text{máx}}$  é tensão máxima gerada devido ao defeito,  $2c$  é o maior eixo da elipse e  $2b$  é o menor eixo da elipse. O eixo  $b$  da elipse deve ser paralelo à direção da carga aplicada.

Dessa forma temos como determinar um fator de concentração de tensão definido por:

$$K_t = 1 + 2c/b \quad (2)$$

A equação (2) é particular para este problema sendo que uma forma mais geral do problema é apresentada pela equação (3):

$$K_I = Y * \sigma_0 * (\pi * c)^{0,5} \quad (3)$$

onde  $Y$  é um valor estimado em função da geometria e pode ser encontrado em diversas literaturas (por exemplo em TADA, 2003).

### 2.5.2. Determinação de $K_{IC}$

As condições para ocorrência de fratura frágil dependem essencialmente do material, temperatura e espessura da chapa, sendo uma característica do Estado Plano de Deformação (EPD). O parâmetro numérico que define se o material irá sofrer uma fratura frágil é a tenacidade do material,  $K_{IC}$ . A determinação deste parâmetro é feita de acordo com normas padronizadas como a ASTM E399.  $K_{IC}$  também pode ser encontrado em diversas literaturas (por exemplo em TADA, 2003) ou com valores padrões, tabelados na própria API 579.

### 2.6. DIAGRAMA FAD (“FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM”)

O diagrama FAD é um utilizado pela API 579 para estipular se o defeito é aceitável ou não. Segundo Pereira (2004) este diagrama se baseia no comportamento elástico e elastoplástico combinados. Quando  $K_R = K_I/K_{IC}$  superar o valor de 1 haverá propagação frágil, e quando  $L_R = (\sigma_{ref} / \sigma_{esc})$  haverá colapso plástico. Para combinações de  $K_R$  e  $L_R$  haverá a falha quando estas coordenadas superarem os valores obtidos pela curva dada pela equação (4):

$$K_R = (1 - 0,14 * L_R^2) * [0,3 + 0,7 \text{EXP}(-0,65 * L_R^6)] \quad (4)$$

A figura 2 demonstra a curva da equação (4) com comentários sobre o tipo esperado de fratura e os cortes para dois diferentes tipos de aços.

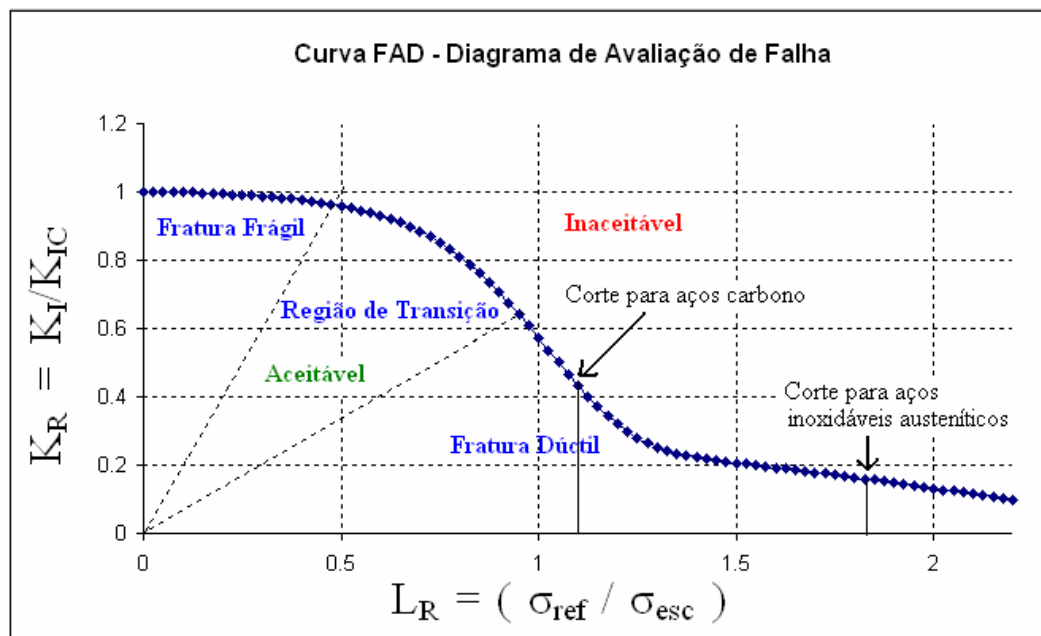


Figura 2 – Diagrama FAD (Fonte: PEREIRA FILHO, 2004)

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

##### 3.1.1. Descrição do vaso de pressão:

Muitas indústrias utilizam ar comprimido proveniente de compressores em seus processos. A fim de manter a pressão em uma faixa ideal, estes equipamentos necessitam armazenar o ar comprimido em um reservatório chamado de pulmão de ar. O vaso em estudo é um reservatório de ar de um compressor, projetado para suportar a pressão e vazão desejada. Suas características construtivas estão listadas na tabela 2.

Tabela 2 – Características Construtivas do Vaso de Pressão

|                               |                      |
|-------------------------------|----------------------|
| Volume interno                | 183 litros           |
| PMTA                          | 12,83 bar (1,28 MPa) |
| Pressão de Teste Hidrostático | 19,14 bar (1,91 MPa) |
| Categoria NR-13               | V                    |

Neste conjunto, compressor e reservatório, a pressão é controlada por um pressostato que aciona o compressor sempre que a pressão cai de um determinado valor pré-determinado. Uma vez atingida a pressão desejada o pressostato desativa o compressor. Isso mantém o reservatório de ar na faixa de pressão desejada.

Este vaso de pressão possui um dreno na parte inferior com a finalidade de retirar a água que pode vir a se acumular no interior. Realizar a drenagem é importante, uma vez que a água contribui com a corrosão. Outro detalhe construtivo é a posição da solda longitudinal do vaso. A solda é o local mais propício para iniciar a falha por ser onde o material sofreu alteração microestrutural e apresenta tensões residuais. Além disso, processos de soldagem estão sujeitos a defeitos como falta de fusão, falta de penetração, inclusão de escória, entre outros. Sendo assim, deve-se evitar que a solda fique no ponto mais baixo do vaso, para que não coincida com a região mais propensa à corrosão, que é também a região de maior sollicitação (capítulo 3.2 deste trabalho). Esse fato foi observado no projeto do vaso, estando a solda longitudinal localizada na meia altura do vaso conforme mostra figura (3). Nesta figura também está demonstrada a região do colapso.

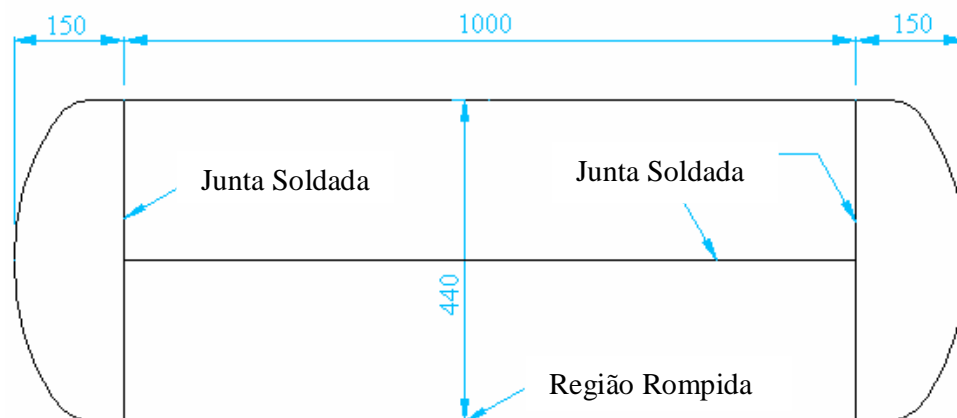


Figura 3 – Esquema com as dimensões básicas do vaso de pressão em milímetros mostrando a região do colapso.



### 3.2. MODELO TÉCNICO

Durante a operação normal de reservatórios de ar comprimido, é comum que parte da água se desprenda do ar e fique aderida à superfície interna do vaso de pressão. Pela ação da gravidade a tendência natural da água é de se acumular na parte mais baixa do reservatório. Uma vez depositada, a água facilita o processo de oxidação, podendo gerar pequenas imperfeições que, com o passar do tempo e os esforços cíclicos de carga, podem evoluir se tornando descontinuidades significativas.

Para prevenir este processo de oxidação, os fabricantes de reservatórios de ar comprimido geralmente projetam um bocal para retirada do condensado no fundo do vaso e recomendam que o equipamento seja drenado uma vez por semana. Embora a maioria destes equipamentos possua dreno, são raros os proprietários que o utilizam.

Aliado à corrosão, deve-se considerar a carga imposta pelo próprio peso do vaso e a pressão da coluna d'água durante o Teste Hidrostático. Estes esforços não são tão significativos em magnitude quanto à pressão de prova aplicada, porém tornam a região inferior e central do vaso a mais solicitada. Importante destacar que foi neste ponto que o vaso rompeu.

O material adotado para este vaso é o SA-414 Gr D, por ser um material comumente utilizado pelo fabricante deste vaso na construção deste tipo de equipamento. Segundo o ASME, Seção II, parte D, a Tensão de Ruptura ( $\sigma_{rup}$ ) para este material é 415 MPa, a Tensão de Escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) é de 240 MPa e a Tensão Admissível (S) é de 118 MPa. Percebe-se disto que durante o Teste Hidrostático a tensão atinge 177 MPa ( $1,5*S$ ), valor este significativamente inferior à Tensão de Escoamento.

### 3.3. DETERMINAÇÃO DA PMTA

Não é intenção refazer o projeto do vaso neste trabalho, portanto serão feitos os cálculos para determinação da PMTA levando em conta apenas o corpo cilíndrico e os tampos conformados, dessa forma não serão consideradas as aberturas. Serão utilizados principalmente os parágrafos UG-27 do código ASME para determinação da PMTA do corpo cilíndrico e os parágrafos UG-32 e 1-6 para determinação da PMTA dos tampos conformados.

#### 3.3.1. Corpo cilíndrico sob pressão interna (parágrafo UG-27):

Este parágrafo trás dois cálculos de PMTA para o corpo cilíndrico, um levando em conta a tensão longitudinal e outro levando em conta a tensão circunferencial. Para eficiências de junta (valor definido através do tipo de solda e nível de inspeção) iguais, a tensão circunferencial tem magnitude duas vezes maior que a tensão longitudinal. Definindo a eficiência de junta igual para todas as soldas, haja vista sua semelhança, a tensão circunferencial é a limitante. Sendo assim, a pressão máxima suportada pelo corpo cilíndrico é dada pela equação (4).

$$P = S * E_{long} * t / (R_i + 0,6) \quad (4)$$



Onde  $P$  é a PMTA,  $S$  é a tensão admissível do material,  $E_{long}$  é a eficiência de junta (definida como 0,7 através do parágrafo UW-12 do ASME),  $t$  é a espessura da chapa e  $R_i$  é o raio interno do vaso.

### 3.3.2. Tampos conformados sob pressão no lado côncavo (parágrafos UG-32 e 1-6):

O ASME aborda cinco tipos principais de tampos: o tampo plano, o tampo cônico, o tampo hemisférico, o tampo elíptico e o tampo toriesférico. Através das medidas realizadas em campo, os tampos se enquadram como elípticos. A PMTA e a Espessura Mínima para este tipo de tampo é calculada pelas fórmulas (5) e (6):

$$P = 2 * S * E * t / ( K * D + 0,2 * t ) \quad (5)$$

$$K = 1/6 [ 2 + ( D / 2 * h )^2 ] \quad (6)$$

onde  $D$  e  $h$  estão demonstrados na figura (6), neste caso a eficiência de junta ( $E$ ) tem o valor de 1 devido a ausência de solda no tampo:

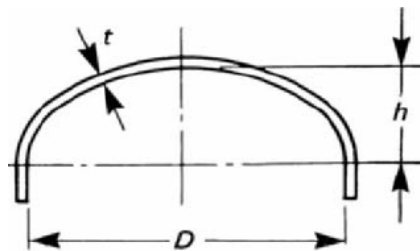


Figura 6 – Dimensões do tampo elíptico

### 3.4. API 579

Equipamentos como tanques de armazenamento, tubulações e vasos de pressão estão sujeitos a danos inerentes à operação e a avaliação dos danos depende de um responsável, que deve se basear em publicações reconhecidas sobre o problema, porém não existem regras e exigências definidas para a aceitabilidade de defeitos.

Os códigos de projeto tradicionais não consideram acúmulo de danos, e a determinação do fim da vida útil de um equipamento se restringe apenas a processos corrosivos uniformes. Trincas ou corrosão localizada não estão cobertas por estes códigos. Porém, não é raro uma inspeção apontar um destes defeitos.

A experiência demonstra que existem equipamentos que operam com defeitos durante muito tempo, alguns monitorados durante toda vida útil sem apresentar crescimento. O que ocorre é que muitas vezes uma trinca não é crítica e o equipamento pode continuar a operar com o dano antes de ser reparado ou descartado. Uma atividade da avaliação de integridade exige mais engenharia, porém, pode proporcionar menor intervenção.

A API 579 tem como objetivo estabelecer estas regras de avaliação de integridade e ser um guia para a avaliação de danos em equipamentos. Ela se apresenta em dividida em seções e cada seção trata de um determinado tipo de dano como mostra o fluxograma da figura (7).

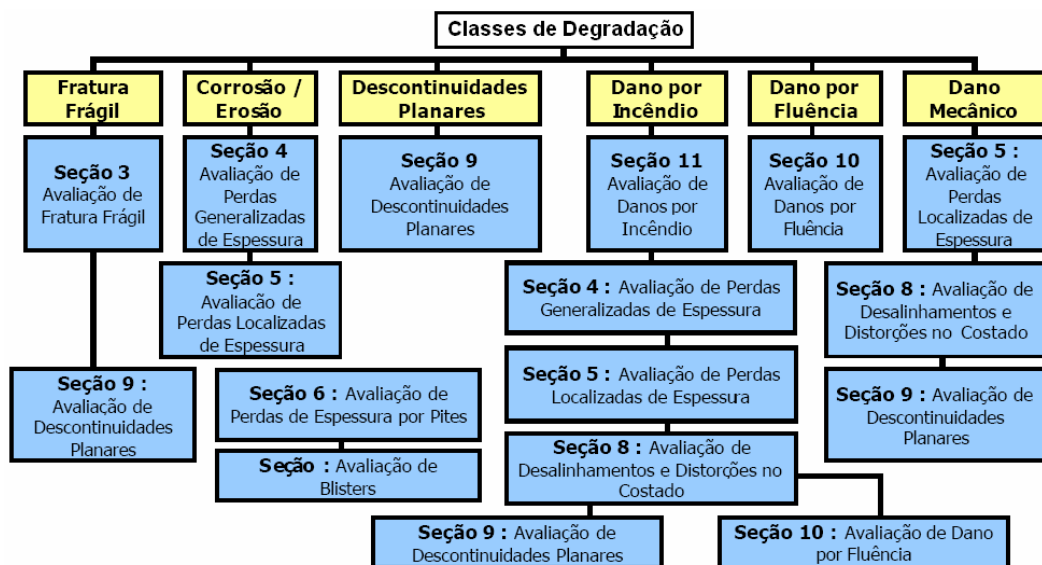


Figura 7 – Fluxograma da organização da API 579

Cada seção apresenta 3 níveis de avaliação. O Nível 1 adota procedimentos conservativos e normalmente pode ser realizado por técnicos, embora seja recomendada a revisão de um engenheiro. O Nível 2 é menos conservativos e exige melhor conhecimento do defeito, este deve ser aplicado por um engenheiro com alguma experiência. O Nível 3 aborda simulação numérica (elementos finitos) e requer um alto detalhamento do equipamento e defeito avaliado.

Este trabalho pretende simular uma trinca no vaso para delimitar qual seria o tamanho mínimo que teria provocado colapso frágil utilizando o Nível 2 da API 579.

### 3.4.1. API 579, Seção 9, Nível 2:

Os procedimentos desta avaliação estão baseados no diagrama FAD (“Failure Assessment Diagram”) que é a metodologia mais aceita para componentes com trincas. Para a realização da avaliação são necessárias algumas características do vaso como diâmetro, pressão, tamanho da trinca, orientação da trinca etc.

A avaliação de integridades requer que sejam feitas considerações com relação à geometria da trinca encontrada, aproximando-a para o modelo matemático que mais convém (trinca passante, semi-elíptica, infinita, longitudinal, entre outros). As dimensões como profundidade e comprimento também devem ser conhecidas. O estudo requer cálculos de intensificação de tensões na ponta da trinca e tenacidade à fratura.

Todos os modelos matemáticos e formulações necessárias podem ser encontrados nos anexos desta API. Os procedimentos estão listados na tabela (3).

Tabela 3 - Procedimento Nível 2 da API 579 para trincas.

| Passo | Descrição  |
|-------|--|
| 1     | Determinar os carregamentos e temperaturas a serem utilizados na avaliação.  |
| 2     | Determinar a distribuição de tensões: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensões Primárias</li> <li>• Tensões Secundárias</li> <li>• Tensões Residuais</li> </ul>  |
| 3     | Determinar as propriedades do material: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensão de Escoamento</li> <li>• Limite de Resistência</li> <li>• Tenacidade à fratura</li> </ul>  |
| 4     | Definir as dimensões das descontinuidades  |
| 5     | Modificar as tensões primárias, tenacidade à fratura e dimensões da descontinuidade utilizando Fatores Parciais de Segurança (PSF).<br>*Esse passo não necessita ser feito, segundo a própria API 579, mantendo-se os valores originais. Ele não será feito, pois a aplicação de coeficientes de segurança não permite descobrir as dimensões reais. |
| 6     | Calcular a tensão de referência para as tensões primárias ( $\sigma_{ref}^P$ ) utilizando o Apêndice D da API 579.   |
| 7     | Calcular a razão de colapso ( $L_R$ ) (Abscissa do diagrama FAD)   |
| 8     | Calcular a intensidade de tensões atribuídas às cargas primárias $K_I^P$ utilizando o Apêndice C da API 579.   |
| 9     | Calcular a tensão de referência para as tensões secundárias ( $\sigma_{ref}^{SR}$ ) utilizando o Apêndice D da API 579.  |
| 10    | Calcular a intensidade de tensões atribuídas às cargas primárias $K_I^{SR}$ utilizando o Apêndice C da API 579.  |
| 11    | Calcular o fator de interação plástica, $\Phi$ .   |
| 12    | Determinar a razão de tenacidade (Ordenada do diagrama FAD)  |
| 13    | Avaliar os resultados no diagrama.   |

## 4. RESULTADOS

### 4.1. PMTA, PTH E ESPESSURA MÍNIMA

A PMTA calculada resultou num valor de 1,46 MPa para o corpo cilíndrico e 1,47 MPa para os tampos. Disto se conclui que o corpo do vaso apresenta uma tensão uniforme entre tampos e costado quanto à pressão aplicada.

Deve-se analisar também a sollicitação da estrutura pelo peso da estrutura e peso da água e para esta sollicitação o ponto de maior pressão se dará no ponto mais baixo central do vaso. A sollicitação devido ao peso é insignificante perto da sollicitação devido à pressão.

Assim sendo a PMTA indicada na placa do vaso condiz com os cálculos realizados e será adotada como 1,28 MPa, conforme o fabricante. Isto estabelecido a PTH será de 1,91 MPa. Resolvendo a equação (4) para t e usando a PTH no valor da pressão tem-se um valor mínimo requerido para que a chapa não escoe de 1,8 mm. Uma espessura de 1,1 mm faria o material atingir sua tensão de ruptura durante o Teste Hidrostático.

#### 4.2. DETERMINAÇÃO DO TAMANHO LIMITE PARA TRINCA PELA API 579

O processo foi realizado para três diferentes tipos de trinca: trinca passante, trinca com comprimento infinito e trinca semi-elíptica. O formato dessas trincas e as principais dimensões estão mostrados na figura (8). Cada tipo de trinca foi avaliado com diferentes tamanhos e os resultados estão apresentados na tabela (4).

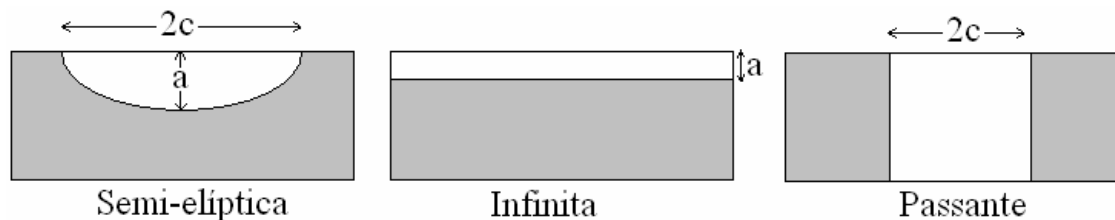


Figura 8 – Tipos de trincas segundo a API 579

Tabela 4 – Resultados de  $K_r$  e  $L_r$  para diferentes tipos e tamanhos de trinca.

|                                 | $2*c$<br>[mm] | $a$<br>[mm] | $\sigma_{ref}$<br>[MPa] | $K_I$<br>[MPa*m <sup>0,5</sup> ] | $L_r$ | $K_r$ |
|---------------------------------|---------------|-------------|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|
| Trinca passante                 | 60            | Passante    | 233                     | 89                               | 1,01  | 0,70  |
| Trincas de comprimento infinito | Infinito      | 0,75        | 186                     | 9                                | 0,81  | 0,07  |
|                                 | Infinito      | 1,2         | 232                     | 18                               | 1,01  | 0,14  |
|                                 | Infinito      | 1,8         | 348                     | 41                               | 1,51  | 0,32  |
|                                 | Infinito      | 2,4         | 696                     | 120                              | 3,03  | 0,94  |
| Trincas semi-elípticas          | 50            | 0,75        | 163                     | 8,9                              | 0,71  | 0,06  |
|                                 | 80            | 1,2         | 188                     | 16                               | 0,82  | 0,12  |
|                                 | 120           | 1,8         | 240                     | 31                               | 1,04  | 0,12  |
|                                 | 120           | 2,4         | 298                     | 53                               | 1,30  | 0,24  |
|                                 | 60            | 2,4         | 216                     | 42                               | 0,94  | 0,33  |

Através dos valores obtidos pode-se perceber que trincas no corpo cilíndrico precisariam ter um tamanho muito elevado para causar fratura frágil e neste caso uma simples inspeção visual durante a fabricação revelaria o defeito. Se a trinca tivesse crescido durante a operação normal do equipamento o resultado esperado seria o crescimento desta descontinuidade até o ponto em que ela pudesse ser revelada no Teste Hidrostático pelo vazamento através da chapa. Assim sendo, a razão do colapso deste vaso não se deu exclusivamente a uma trinca.

Para melhor ilustração dos pontos obtidos, a figura (9) os apresenta plotados no diagrama FAD.

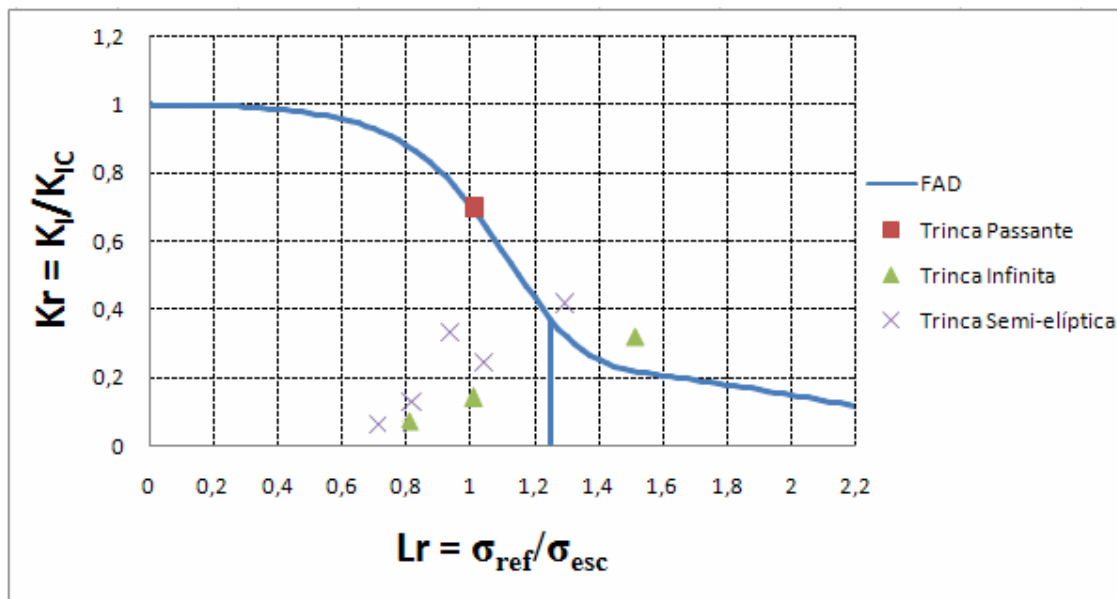


Figura 9 – Plotagem dos resultados obtidos no diagrama FAD.

## 5. CONCLUSÕES

Para as considerações feitas, e os cálculos realizados conclui-se que defeitos do tipo trinca não são críticos para um equipamento com estas características construtivas. Uma trinca necessitaria ser de grande magnitude para causar o colapso do vaso de pressão.

Além disso, a diminuição significativa da espessura em torno da trinca é uma indicação clara que houve conformação plástica do material antes da falha, apontado que outros fatores como corrosão localizada e/ou excesso de pressão ocorreram.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AD-Merkblätter, **Regras Técnicas para vasos de pressão**. 1995.

ASME, Section II, Part D. **Material Properties (Metric)**. 2004.

ASME, Section VIII, Division 1. **Boiler & Pressure Vessel**. 2004.

BS 5500, Specifications for **Unfired fusion welded pressure vessels**, British Standard. 1997.

DONATO, G. V. P. **Avaliação de Integridade Estrutural API 579/ASME FFS-1 Fitness For Service**. Vitória, 2008.

INSTITUTE, A. P. **API Recommended Practice 579 Fitness For Service**. First Edition. Washington, D.C., 2000.

NORMA REGULAMENTADORA. **NR-13**, 1984.

PEREIRA FILHO, J. S. **Análise de Efeitos de Teste Hidrostático em Vaso de Pressão**, Dissertação de Mestrado. 2004.

TADA, H. **The Stress Analysis of Cracks Handbook**, 2003.

WANG, C. H. **Introduction to Fracture Mechanics**, 1996.

WILKOWSKI, G. **Leak-before-break: What does it really mean?** Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 122, Issue 3, pp. 267-272., 2000.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

HUPPES, R. M. **Avaliação Estrutural de Digestores**, 2008.

POPOV, E. P. **Introdução à Mecânica dos Sólidos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1996.

TELLES, P. C. S. **Vasos de Pressão**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

## APÊNDICE A – EXEMPLO DE PROCEDIMENTO NÍVEL 2 DA API 579 PARA UMA TRINCA

| Passo | Resultados  |
|-------|---|
| 1     | Temperatura de realização do Teste Hidrostático:<br><b>T = 30°C</b><br>Pressão aplicada no teste:<br><b>P<sub>TH</sub> = 1,9 MPa</b>  |
| 2     | Por se tratar de uma chapa fina a única tensão que será considerada é a tensão de membrana causada pela pressão de teste hidrostático.<br>Tensões residuais não serão levadas em conta pelo fato defeito estar sendo considerado longe do cordão de solda.<br><br>$P_m^{\max} = \frac{P_{TH} * R_i}{T_n} \quad (A.1)$<br><br><b>P<sub>m</sub><sup>max</sup> = 140 MPa</b><br><b>P<sub>b</sub> = 0 MPa</b> |
| 3     | Do ASME Seção II – Parte D para o material adotado SA-414 Gr D:<br><b>σ<sub>rup</sub> = 415 MPa</b><br><b>σ<sub>YS</sub> = 240 MPa</b><br><br>Do Apêndice F da API 579:<br><br>$K_{IC} = 36,5 + 3,084 \exp[0,036(T - T_{ref} + 56)] \quad (A.2)$<br><br><b>K<sub>IC</sub> = 127 MPa*m<sup>0,5</sup></b>   |
| 4     | As dimensões da trinca foram supostas como:<br><b>a = 0,75 mm</b><br><b>c = 55 mm</b>   |
| 5     | Esse passo trata de estimar fatores de segurança para a convivência com o defeito. Porém como estamos querendo estimar o tamanho real da trinca que causaria fratura frágil este parágrafo não será utilizado.  |
| 6     | A Tabela C.1 da API 579 é um guia para determinar qual será a metodologia a ser utilizada nos cálculos a seguir. Dela se define que será utilizada a metodologia para trinca superficial semi-elíptica e longitudinal de tamanho finito (parágrafos C.5.10 e D.5.10).<br>O parágrafo D.5.10 da API traz a seguinte fórmula para o cálculo de σ <sub>ref</sub> <sup>P</sup> :                              |

$$\sigma_{ref} = \frac{g \cdot P_b + [(g \cdot P_b)^2 + 9 \cdot (M_s \cdot P_m)^2]^{0,5}}{3} \quad (A.3)$$

Onde:

$$g = -20 \left( \frac{a}{2 \cdot c} \right)^{0,75} \cdot \alpha^3 \quad (A.4)$$

$$\alpha = \frac{a/t}{1 + t/c} \quad (A.5)$$

$$M_s^{NS} = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \cdot \left( \frac{1}{M_t(\lambda_a)} \right)} \quad (A.6)$$

$$\lambda_a = \frac{1,818 \cdot c}{\sqrt{R_t \cdot a}} \quad (A.7)$$



|   |  |
|---|--|
|   | $M_t = \left( \frac{1,02 + 0,4411\lambda^2 + 0,006124\lambda^4}{1 + 0,02642\lambda^2 + 1,533 \cdot 10^{-6}\lambda^4} \right)^{0,5}$ <p style="text-align: right;">(A.8)</p>  |
|   | <p><math>\sigma_{ref}^P = 163 \text{ MPa}</math></p>   |
| 7 | $L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{YS}}$ <p style="text-align: right;">(A.9)</p> <p><math>L_r = 0,71</math></p>  |
| 8 | <p>O parágrafo C.5.10 da API traz a seguinte fórmula para determinação de <math>K_I^P</math>:</p> $K_I = \frac{pR_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \left[ 2G_0 - 2G_1 \left( \frac{a}{R_i} \right) + 3G_2 \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left( \frac{a}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left( \frac{a}{R_i} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$ <p style="text-align: right;">(A.10)</p> <p>onde, p é pressão aplicada no vaso (<math>P_{TH}</math>), <math>R_0</math> é o Raio externo, <math>R_i</math> é o Raio interno e <math>G_i</math> são coeficientes de influência obtidos através das fórmulas abaixo<br/>A e <math>\beta</math> são valores encontrados na tabela C.11 da API 579.</p> $G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta^2 + A_{2,0}\beta^3 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 \quad (A.11)$ $G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta^2 + A_{2,1}\beta^3 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6 \quad (A.12)$ $G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \quad (A.13)$ $G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \quad (A.14)$ $G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right) \quad (A.15)$ $M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \quad (A.16)$ $M_2 = 3 \quad (A.17)$ $M_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) - \frac{8}{5} \quad (A.18)$ $Q = 1 + 1,464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,65} \quad (A.19)$ |

|            |  |        |
|------------|--|--------|
|            | $K_I^P = 8,9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$   |        |
| 9, 10 e 11 | Esses passos não serão feitos uma vez que não foram consideradas as tensões residuais.                                   |        |
| 12         | $K_r = \frac{K_I^P + \# K_I^{5n}}{K_{mat}}$  | (A.20) |
|            | $K_r = 0,06$   |        |
| 13         | <p>Figura A.1 – Ponto calculado plotado no Diagrama FAD</p> <p>A trinca proposta é aceitável pelo Nível 2 da API 579</p> |        |