

FRANCO DUFLOTH MENEGATTI

AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM UM VASO DE PRESSÃO UTILIZANDO A API-579

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.

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre
2010



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

AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM UM VASO DE PRESSÃO UTILIZANDO A API 579

FRANCO DUFLOTH MENEGATTI

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS 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. JUAN PABLO RAGGIO QUINTAS
UFRGS / DEMEC

Prof^ª. Dr^ª. LETICIA FLECK FADEL MIGUEL
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. ÉDSON HIKARO ASEKA
UFRGS / DEMEC

Dedico esta monografia aos meus pais, Francisco e Carla.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família, meu pai Francisco, minha mãe Carla, meu irmão Guilherme e minha irmã Isabella, a quem lhes devo todo meu amor e respeito.

ao meu orientador Prof. Ignacio, a quem nas horas de desespero sempre soube tranquilizar a situação.

ao meu primo Gean e minha amiga Flávia, praticamente meus irmãos.

à Megasteam, que me trouxe à uma realidade de uma vida até então desconhecida, e à todos meus colegas de trabalho, pessoas especiais, e em particular o Engenheiro Mauro cuja experiência na inspeção se mostrou muito válida para este trabalho.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades. Lembrai-vos que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

MENEGATTI, F. D. **Avaliação de Defeitos em um Vaso de Pressão utilizando a API-579**. 2010. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Equipamentos de processo, como vasos de pressão, podem apresentar defeitos em suas estruturas, sendo elas originadas durante o processo de fabricação, ou devido ao uso do equipamento. A possibilidade de ocorrerem falhas em equipamentos de responsabilidade faz das trincas o tipo de descontinuidade mais preocupante. Em condomínios residenciais, tem sido utilizado com frequência vasos de pressão para o armazenamento de GLP – Gás Liquefeito de Petróleo - para cocção de alimentos e no aquecimento da água para o banho. Devido ao fato de ser um gás altamente inflamável e operar em um sistema fechado com uma pressão relativamente alta, há uma grande preocupação com a manutenção e segurança dos vasos de pressão que o armazenam, afinal, se algum vazamento ocorrer, o risco de explosão e, conseqüentemente, acidentes, é alto. Diante desta situação, há a necessidade de se conhecer e adotar metodologias adequadas que possam avaliar a segurança e, sem conservadorismo excessivo, a criticidade de defeitos na integridade estrutural dos vasos de pressão. Desta forma, neste trabalho será avaliada a criticidade de um trinca paralela a um cordão de solda longitudinal do corpo cilíndrico, com diferentes parâmetros de operação, baseando-se o estudo em um conjunto de critérios estabelecidos pelo documento API-579/ASME FFS-1 – Fitness For Service. Ao final do trabalho, foram feitas comparações dos diferentes parâmetros adotados para avaliação e do comportamento das descontinuidades perante as alterações das condições de operação.

PALAVRAS-CHAVE: Gás liquefeito de petróleo (GLP), Vasos de pressão, Trincas, Fitness For Service.

MENEGATTI, F. D. **Evaluation of Defects in a Pressure Vessel using the API-579**. 2010. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

Process equipments like pressure vessels, may have defects in their structures, which were originated during the manufacturing process, or due to use of equipment. The possibility of experiencing equipment failures at high risk of cracking is the most worrisome type of discontinuity. In residential buildings, have been widely used pressure vessels for storing LPG - Liquefied Petroleum Gas - for cooking food and heating water for bath. Due to being a highly flammable gas and operate in a closed system with a relatively high pressure, there is great concern with the maintenance and safety of pressure vessels that store the gas, after all, if a leak occurs, the risk of explosion and accidents is high. Given this situation, there is a need to understand and adopt appropriate methodologies that can assess the safety and without excessive conservatism, the criticality of these defects in the structural integrity of the equipment. Thus, this study will assess the criticality of a crack parallel to the longitudinal weld with different operating parameters, based on the study of a set of criteria established by the document API-579/ASME FFS-1 – Fitness For Service. By the end of this work, comparisons were made of the various parameters chosen for the assessment and the behavior of the flaws front the changes of operation conditions.

KEYWORDS: Liquefied petroleum gas, Pressure vessels, Cracks, Fitness For Service.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Objetivos	01
1.2. Estrutura do Trabalho	01
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	01
2.1. Tensões Atuantes em Vasos de Pressão	01
2.2. Mecânica da Fratura	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
4. METODOLOGIA	05
4.1. ASME VIII - Boiler & Pressure Vessel	05
4.2. API-579 / ASME FFS-1	05
5. CONSIDERAÇÕES SOBRE O EQUIPAMENTO AVALIADO	09
5.1. Descrição Física	09
5.2. Levantamento de Dados	09
6. RESULTADOS E ANÁLISES	10
7. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICES	17
ANEXOS	18

1. INTRODUÇÃO

O gás liquefeito de petróleo (GLP), mais conhecido como ‘gás de cozinha’, é amplamente utilizado no país, tanto em residências como no comércio e na indústria. Suas principais aplicações são: cocção de alimentos, aquecimento de água e nos fornos industriais, entre outras que ajudam a movimentar a economia do Brasil. Sendo, portanto, uma fonte de energia muito importante para todos.

O processo para obtenção do GLP começa com a extração do petróleo e do gás natural, matéria-prima para a sua produção, continua com o refino do petróleo através de torres de destilação que possuem diversas saídas em alturas diferenciadas, onde cada uma delas gera um produto diferente. No caso do GLP, as saídas utilizadas são as localizadas no topo. Após este processo, o gás é direcionado por dutos a terminais de estocagem, e é nesta hora que o gás é envasado em recipientes para que possa ser feita a distribuição. À temperatura ambiente, mas submetido a uma pressão de 3 a 17,5 Kgf/cm² (0,29 a 1,71 MPa), o GLP se apresenta na forma líquida, de onde resulta sua grande aplicabilidade como combustível, devido a facilidade de armazenamento e transporte do gás para vasos de pressão.

Porém, além da questão prática e econômica, em todos os vasos de pressão onde existirem gases, em temperatura ambiente ou mais alta, e em qualquer ponto onde houver trincas, um escapamento de gás pode ocorrer para o exterior. Por isso, existe uma grande preocupação quanto à integridade estrutural dos vasos de pressão que armazenam o GLP, uma vez que, sob pressão pode desenvolver alguma descontinuidade na estrutura do vaso de pressão podendo ocorrer o vazamento, e conseqüentemente provocar acidentes graves visto que o GLP é inflamável e normalmente estão localizados próximos a circulação de pessoas.

1.1. Objetivo

O **objetivo** deste trabalho consiste em avaliar os critérios da API 579 aplicada à aceitabilidade de descontinuidades em vasos de pressão para estocagem de GLP.

1.2. Estrutura do trabalho

A organização deste trabalho é a seguinte: após a introdução apresentada nesta seção, na seção 2 é exposta os conceitos necessários para desenvolver este trabalho. A seguir, na seção 3, é apresentada uma revisão bibliográfica contendo a descrição de material e artigos consultados relativos ao assunto em questão. A seção 4 descreve a metodologia utilizada, ou seja, dos procedimentos de cálculo e avaliação empregados no decorrer dos estudos de caso. Posteriormente, nas seções 5 e 6, o equipamento avaliado é descrito em termos físicos, assim como suas principais características operacionais e os resultados das análises e cálculos realizados são expostos de forma clara e concisa através de tabelas e gráficos. A seção 7 finaliza o trabalho, trazendo uma discussão a respeito dos resultados obtidos e sugestões para futuros trabalhos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Tensões Atuantes em Vasos de Pressão

Segundo TELLES (2007), as tensões que atuam na parede de um vaso de pressão podem ser classificadas em três categorias gerais, que serão explicadas a seguir.

Tensões Primárias: tensões decorrentes de diversas cargas (pressão interna ou externa, peso, etc.) e necessárias para satisfazer o equilíbrio estático em relação aos diversos carregamentos atuantes, podendo ser normais (tração ou compressão) ou de cisalhamento. As tensões primárias normais podem ainda ser de membrana ou de flexão, onde a de membrana é supostamente constante ao longo da espessura do vaso, o contrário da de flexão que variam linearmente. A tensão de membrana devido à pressão interna é em geral de tração devido ao fato de que o elemento da parede do vaso tende a aumentar de dimensão. A tensão de flexão é nula no centróide da parede, máxima de tração na superfície interna e máxima de compressão na superfície externa. Sendo assim, a tensão resultante na superfície interna é a tensão de membrana mais a tensão de flexão, e na parede externa, é a tensão de membrana menos a tensão de flexão, como pode ser visto na indicação esquemática da figura 01.

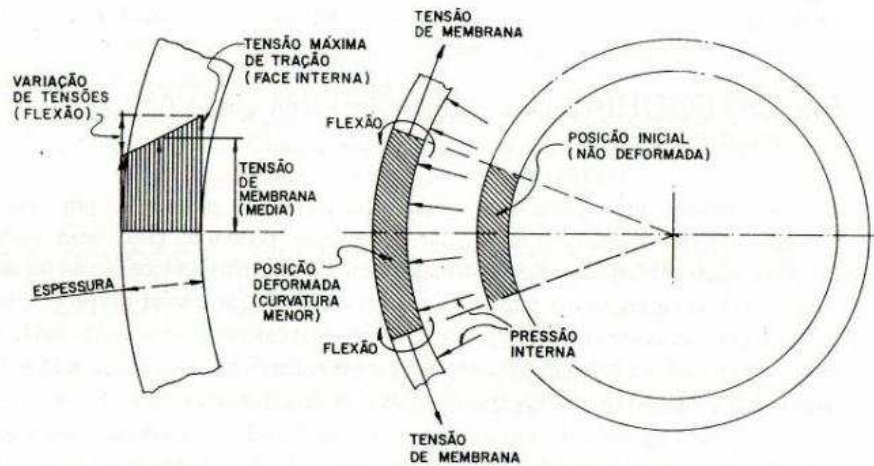


Figura 01: Tensões de membrana e de flexão em um cilindro submetido à pressão interna. (Fonte: Telles, 2007)

As tensões primárias são sempre proporcionais às cargas das quais se originam. Supondo que as cargas aumentem indefinidamente, as tensões aumentarão também, podendo levar à falha do equipamento. Sua principal característica é não ser autolimitante, ou seja, enquanto o carregamento estiver sendo aplicado, a tensão continua atuando, não sendo aliviada por deformação. Caso estas tensões excedam o limite de escoamento do material, poderão ocorrer deformações excessivas ou colapso plástico. (TELLES, 2007)

No cálculo de espessura de corpos cilíndricos são consideradas, basicamente, as tensões primárias de membrana circunferenciais e longitudinais causadas pela pressão interna. As tensões circunferenciais são aquelas que tendem a romper o vaso segundo a sua geratriz, quando ele estiver sob pressão interna. São mais críticas por terem o dobro do valor das tensões longitudinais que tendem a romper na direção axial.

Tensões Secundárias: tensões que resultam de restrições geométricas no próprio vaso ou em estruturas solidárias a ele, não sendo, portanto, resultado de carregamentos atuantes sobre o material (cargas externas). Surgem em regiões de transição de formato ou de espessura, assim como em toda parte do vaso que não estiver livre para sofrer deformação ou dilatação. Sua característica básica é o fato de serem autolimitantes, ou seja, pequenas deformações plásticas locais reduzem estas tensões, de tal modo que o valor máximo que podem atingir é o limite de elasticidade do material. Caso haja um carregamento mais elevado, haverá maior deformação e a tensão secundária máxima permanecerá com o mesmo valor. Por isso, as tensões secundárias são incapazes de causar colapso plástico do equipamento (TELLES, 2007).

As normas de projeto fazem uma série de exigências quanto a detalhes construtivos dos vasos de pressão no sentido de atenuar transições de forma e de espessura, com o objetivo de minimizar o valor destas tensões. Descontinuidades planares localizadas em regiões de ten-

sões secundárias estão sujeitas a um nível de tensões diferenciado podendo, inclusive, evoluir durante a pressurização. (DONATO, 2008)

Tensões Localizadas Máximas (Tensões de Pico): representam os valores máximos das tensões atuantes em regiões limitadas do equipamento devido à concentração de tensões causada por descontinuidades geométricas, tais como defeitos de soldagem e regiões de transição de formato. Usualmente, não são nocivas, embora possam alcançar valores elevados por atuarem em regiões pequenas do equipamento. Devem-se evitar valores muito elevados, pois podem dar origem a trincas por fadiga ou por corrosão sob tensão, assim como propagar uma trinca frágil no vaso de pressão.

2.2. Mecânica da Fratura

Os projetos convencionais baseiam-se na resistência dos materiais e consideram o carregamento aplicado e a resistência mecânica para determinar se um material está adequado para a aplicação requisitada. A resistência dos materiais considera o corpo avaliado como um meio contínuo e isento de defeitos, ignorando a presença de heterogeneidades que podem causar a concentração de tensões e levar à fratura com carregamentos inferiores à sua resistência mecânica. Por isso, a mecânica da fratura apresenta-se como uma abordagem mais adequada para o estudo de engenharia reais, que contém em sua estrutura diversas descontinuidades.

Em analogia à abordagem tradicional da resistência dos materiais, pode-se dizer que a tenacidade é a variável que substitui a resistência como propriedade mais importante do material, sendo ela uma medida da resistência à propagação de trincas. O carregamento é definido de diversas formas, consideradas as forças geradoras para a fratura, e a variável adicional, não presente na abordagem tradicional, é o tamanho do defeito (ANDERSON, 1995).

Por definição, a mecânica da fratura é a ciência que estuda as estruturas que contém descontinuidades do tipo trincas, fornecendo conceitos e equações para determinar se um defeito pode ou não, levar a estrutura à falha catastrófica, e em quais condições de carregamento a falha ocorreria (STROHAECKER, 1999). São essencialmente duas as aplicações da mecânica da fratura em situações práticas:

- Avaliação da importância e significado de defeitos;
- Comparação da tenacidade de diferentes materiais.

A avaliação do significado e importância de defeitos pode estar relacionada com decidir se um defeito detectado durante fabricação ou em serviço necessita ou não de reparação, e ainda com o estabelecimento de critérios quantificados de aceitação de defeitos em estruturas. Defeitos inofensivos em determinadas situações poderão ser fatais em outros contextos, e a mecânica da fratura contribui para a definição do nível de aceitação desses defeitos, em cada caso.

Diagrama FAD (Failure Analysis Diagram)

Downling & Townley (1999) introduziram o conceito do diagrama de análise de falha FAD (do inglês Failure Analysis Diagram), que descreve a interação entre a fratura frágil e o colapso plástico. Este critério é utilizado para a avaliação de componentes com defeitos planares, estabelecendo o ponto de trabalho da descontinuidade e considerando parcelas de colapso e fratura com o objetivo de definir a aceitabilidade de um componente trincado.

Os principais parâmetros para estabelecimento do diagrama FAD são as razões $K_r = K_t/K_{mat}$ e $L_r = \sigma_{ref}/\sigma$, que relacionam os fatores de intensidade de tensões e as tensões aplicadas, com os seus respectivos valores críticos para o material analisado, sendo graficada então, uma curva que define as regiões segura e insegura do diagrama. Se a tenacidade do material for muito grande, poderá ocorrer colapso plástico quando L_r for maior que 1. Um material frá-

gil vai falhar quando $K_r = 1$. Em casos intermediários, colapso e fratura interagem, ocorrendo a fratura dúctil, com K_r e L_r menores que 1. Todos os pontos dentro do diagrama são considerados seguros e pontos fora do diagrama são considerados inseguros (ANDERSON, 1995), como mostra a figura 02.

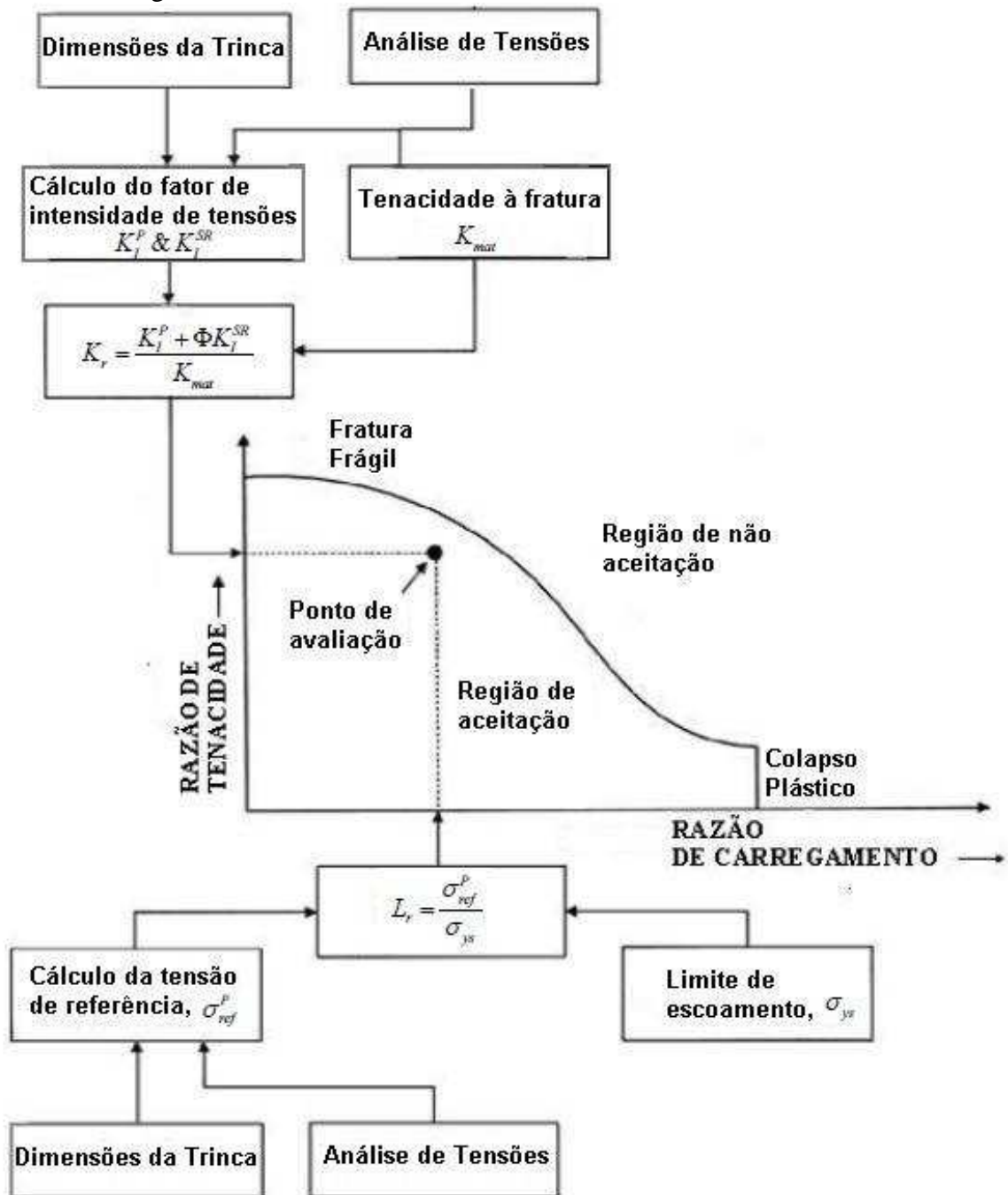


Figura 02: Diagrama FAD (Failure Analysis Diagram)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dois trabalhos de grande importância no desenvolvimento desta monografia são a dissertação elaborada por Kleber Antônio Machado Ramos (2009) sob o título de “*Estudo Comparativo entre os Resultados obtidos pelos Documentos API-579 e BS-7910 na Avaliação de Trincas em Vasos de Pressão*” e a apostila com o título de “*Avaliação de Integridade Segundo a API-579*” elaborada por Guilherme Victor P. Donato (2008). Os dois trabalhos contribuí-

ram trazendo para este estudo, diversas questões relacionadas à revisão de conceitos sobre a mecânica da fratura, cálculos de fatores de intensidade de tensões, curvas FAD e procedimentos conforme API-579.

O trabalho de Kleber A. M. Ramos (2009) visou determinar qual é o mais conservador entre os dois principais documentos de avaliação de descontinuidades de equipamentos e operação, a API-579 e a BS-7910. O autor faz uma análise de uma trinca longitudinal, com e sem tratamento térmico e chega a conclusão, considerando soluções de K_I e σ_{ref} no nível 2, que o documento BS-7910 é o mais conservativo. Durante o trabalho, foram apresentados procedimentos para o uso de ambos os documentos, o que se mostrou válido para a realização deste trabalho.

A apostila de Guilherme V P. Donato (2008) aborda a API-579 de forma clara e objetiva, demonstrando até mesmo com exemplos o uso devido do documento.

Outro artigo de considerável importância é o elaborado por Rodrigo Muller Huppes, “*Avaliação Estrutural de Digestores*”, que baseado na API-579, avaliou descontinuidades reais apresentadas em um digestor como perda de espessura e trinca. O autor concluiu que ambos os defeitos foram significativos para a falha do digestor, conclusão obtida após uma metodologia criteriosa para avaliação a qual se mostrou útil a este trabalho.

4. METODOLOGIA

Abaixo descrevem-se as normas utilizadas neste trabalho.

4.1. ASME VIII - Boiler & Pressure Vessel – Divisão 1

O código ASME VIII é um texto normativo, dividido em diversos parágrafos, contendo critérios de projeto, fórmulas de cálculo, exigências de projeto, fabricação, montagem e inspeção de vasos de pressão.

Com o objetivo de verificar se o vaso de pressão obedece aos requisitos mínimos estabelecidos, utilizou-se o código ASME VIII para prever a sua resistência e determinar a menor espessura de chapa permitida para as condições de operação. Como o equipamento está sujeito a pressão interna no casco e nos tampos, utilizou-se os parágrafos UG-27 e UG-32 do código ASME VIII Divisão 1 que prevê formulações para vasos sujeitos à pressão interna. Estas formulações levam em conta a influência do material, eficiência de solda e dimensões do vaso de pressão.

4.2. API-579 / ASME FFS-1

Em 2001, ASME e API formaram um comitê de FFS (Fitness For Service – “Adequação ao uso”) para desenvolver e manter uma norma de FFS para equipamentos largamente operados/utilizados nas indústrias de geração de energia, processo e fabricação. Nasceu assim, em 2007, o API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service. (API 579, 2007). Este documento fornece metodologias para avaliação da integridade estrutural de vasos de pressão, tubulações e tanques de serviço, podendo estes equipamentos apresentar descontinuidades ou danos. Esta metodologia busca desenvolver uma avaliação de “adequação ao uso” do equipamento para determinar se, mesmo apresentando descontinuidades, ele poderá operar com segurança durante certo período de tempo.

A Prática Recomendada API-579 foi definida para utilização em equipamentos projetados e fabricados conforme diversos códigos de projeto, entre eles, o ASME VIII Boiler & Pressure Vessel. Esta norma apresenta 3 níveis de avaliação para cada tipo de degradação de equipamentos, exigindo em cada um, diferente grau de informação e conservadorismo nos limites de aceitabilidade indicados. A figura 03 apresenta um fluxograma com um resumo dos

diversos critérios definidos pelo documento API-579 e as ligações com as seções de avaliação existentes.

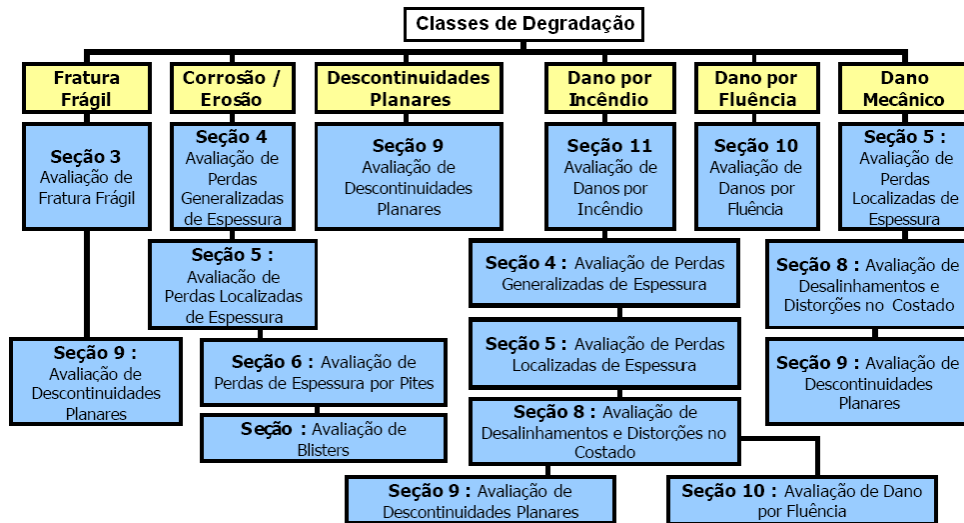


Figura 03: Seções de avaliação do API 579 / ASME FFS-1.

O nível 1 proporciona o critério mais conservativo, podendo ser utilizado com a mínima quantidade de inspeção e informação sobre o equipamento. Nesse nível de análise, calcula-se de acordo com o procedimento, o tamanho máximo de defeito admissível e compara-se o resultado com o tamanho do defeito existente, neste caso, simulado. Se este defeito for menor que o calculado, o componente está em condição aceitável para continuar operando. Caso o componente não esteja adequado pelos requisitos da análise nível 1, podem ser realizadas análises de nível 2. Neste trabalho não serão efetuadas avaliações de nível 1, visto que são muito conservativas divergindo do objetivo do trabalho, que propõe a avaliação da criticidade de um trinca sobre diversas condições de operação, condições que não são suficientemente relevantes na avaliação de nível 1.

O nível 2 proporciona uma análise mais detalhada, produzindo resultados menos conservadores que o nível 1. Cálculos mais detalhados são utilizados e a metodologia do diagrama de análise de falha (FAD) é a base da avaliação de defeitos. São plotados num diagrama a razão de tenacidade K_r e a razão de carregamento L_r . A curva FAD representa os pontos de falha previstos. Se o ponto de avaliação da trinca estiver dentro da curva, o defeito é considerado aceitável. Nesta avaliação será utilizado o nível 2 de avaliação, conforme aplicável. O procedimento utilizado é descrito a seguir.

A análise consiste na obtenção do ponto (Razão de Colapso L_r^p , Razão de Tenacidade K_r) e sua localização no diagrama FAD para assim medir o nível de criticidade dos pontos que serão analisados. É considerada uma trinca com orientação longitudinal (figura 04), paralela ao cordão de solda longitudinal, pelo fato da tensão circunferencial ter o dobro do valor da longitudinal, levando ao fato de que tanto a probabilidade como a periculosidade de uma trinca com essa disposição é muito maior. A metodologia descrita a seguir tem o objetivo de determinar se a trinca considerada apresenta dimensões aceitáveis e, baseia-se nas exigências do nível 2 de avaliação, descrito no parágrafo 9.4.3 do API-579.

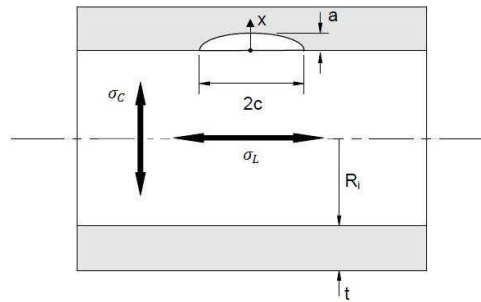


Figura 04: Cilindro, junta longitudinal, trinca superficial interna paralela ao cordão de solda (Fonte: API 579 – Figure C.15).

A primeira parte da análise consiste no cálculo da razão de colapso (L_r^p - abscissa do diagrama FAD), equação (1), através da determinação da tensão de escoamento, σ_{ys} , e da tensão de referência do material, σ_{ref} . A tensão de referência para o caso estudado é obtida através da solução RCSCLE1 que leva em conta a geometria assumida para a trinca, equação (A1.1) – Apêndice A, apresentada na seção 9 do API-579. Esta solução considera parcelas devidas às tensões primárias e secundárias/residuais e, prevê a distribuição de tensões em uma trinca superficial interna ao longo de um cordão de solda longitudinal com esforços axiais.

$$L_r^p = \frac{\sigma_{ref}^p}{\sigma_{ys}} \quad (1)$$

Estando a trinca disposta como mostra a figura 07, a tensão que provocaria a sua abertura, é a tensão circunferencial (σ_c). Através de uma expressão simplificada para a tensão circunferencial em cilindros de parede fina submetidos à pressão, equação (2), onde: p - pressão; r - raio do cilindro; t - espessura de parede, fica evidente que em uma situação de operação (pressão interna), as tensões presentes na região da trinca são trativas, contribuindo largamente para a propagação da trinca.

$$\sigma_c = (p.r)/t \quad (2)$$

Como não existem gradientes térmicos na região da trinca e a mesma está afastada de descontinuidades geométricas, as tensões secundárias também podem ser desprezadas. Desta forma, na região da trinca serão avaliadas apenas as tensões residuais trativas.

O parágrafo E.3 do API-579, propõe uma solução para a distribuição de tensões residuais perpendiculares a um cordão de solda V-duplo longitudinal conforme ilustra a figura 05. Considera-se que o vaso de pressão avaliado não tenha passado por um tratamento de alívio de tensões. O valor da tensão residual para este caso é obtido com a equação (3).

$$\sigma_{ys}^{Sr} = (\sigma_{ys} + 69MPa) \quad (3)$$

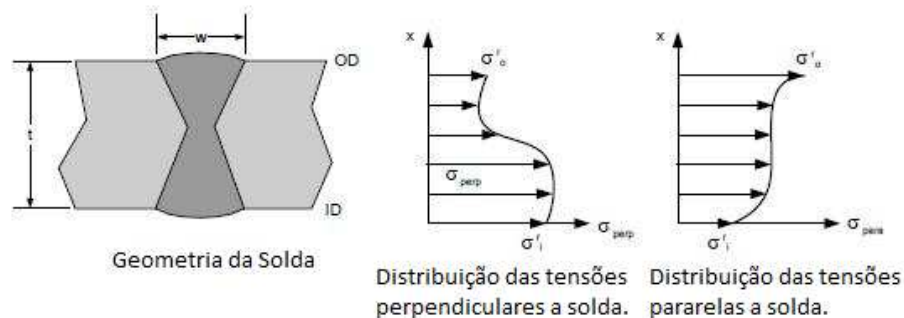


Figura 05: Distribuição das tensões residuais em solda longitudinal V-duplo (Fonte: API 579 - Figure E.7).

Estabelecida a razão de colapso L_r^p , deve-se determinar outro parâmetro fundamental para esta análise, a tenacidade à fratura média do material, K_{mat}^{mean} . Este parâmetro mede a capacidade do material resistir à propagação de alguma descontinuidade e pode ser determinado segundo um método conservativo, porém, relativamente simples, denominado *Metodologia Lower Bound*. Esta metodologia é apresentada na Seção XI do código ASME e reproduzida pelo API-579 – Apêndice F. Através da equação 4, utilizada para carregamentos estáticos, é possível determinar a tenacidade à fratura, K_{IC} , baseada apenas em uma temperatura de referência, T_{ref} , e na temperatura do material, T . A temperatura de referência é determinada a partir das tabelas A.1 e A.2 no Anexo A, e baseia-se na temperatura a partir da qual determinado material está sujeito à fratura frágil.

$$K_{IC} = 36,5 + 3,084 \exp[0,036(T - T_{ref} + 56)] \quad (4)$$

Seguindo a metodologia, define-se a razão entre a tenacidade à fratura média do material e sua tenacidade à fratura através da equação (A2.2) - Apêndice A com os respectivos coeficientes da tabela A.3 do Anexo A.

Definidos, razão de colapso e tenacidade à fratura média do material, resta determinar a razão de tenacidade (K_r – ordenada do diagrama FAD), equação (5), através do fator de concentração de tensões, K_t , do fator de interação plástica, Φ , e da tenacidade à fratura média do material. O fator de concentração de tensões para o caso estudado é obtido através da solução KCSCLE1, equação (A3.1) – Apêndice A, apresentada na seção 9 do API-579. Esta solução considera parcelas de intensidade de tensões atribuídas às tensões primárias (K_I^p) e secundárias/residuais (K_I^{Sr}) e, prevê a concentração de tensões em uma trinca superficial interna ao longo de um cordão de solda longitudinal.

$$K_r = \frac{K_I^p + \Phi K_I^{Sr}}{K_{mat}^{mean}} \quad (5)$$

O fator de interação plástica Φ é definido pela equação (A3.5) - Apêndice A. Para $0 < L_r^{Sr} < 4,0$, $\Phi_0 = 1,0$. Os fatores ψ e ϕ são parâmetros para calcular o fator de interação plástica Φ e são determinados respectivamente pela tabela A.5 e A.6 - Anexo A. Para o caso aqui estudado, conforme nota C.5.10.2 do API-579 – Apêndice C, para que seja aplicada a solução, a trinca possui as seguintes limitações dimensionais:

- $0,0 \leq a/t \leq 0,8$;
- $0,0325 \leq a/c \leq 2,0$;
- $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$;
- $0,0 \leq t/R_i \leq 1,0$.

Interessa identificar o estado de tensão e o comportamento da razão de tenacidade em duas regiões distintas. Uma corresponde à região próxima da ponta da trinca, $\theta = 0^\circ$; a outra identifica a base da trinca, $\theta = 90^\circ$, conforme mostra a figura 06.

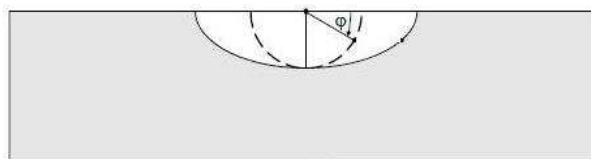


Figura 06: Representação do ângulo elíptico de trinca superficial (Fonte: API 579, 2007).

A curva FAD a ser utilizada pela norma é apresentada na figura 03, e sobre a mesma é localizado o ponto (L_r^p e K_r) que representa o defeito em análise. Desta forma é avaliada a criticidade do defeito.

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE O EQUIPAMENTO AVALIADO

Nesta seção, o vaso de pressão em estudo é detalhado fisicamente bem como suas condições de operação e dados de projeto do equipamento.

5.1. Descrição Física

Vasos de pressão são equipamentos constituídos, em sua maioria, por um corpo cilíndrico e dois tampos. O corpo cilíndrico é uma chapa calandrada e soldada longitudinalmente, enquanto os tampos são chapas conformadas e soldadas circunferencialmente ao corpo cilíndrico.

A figura 07 mostra uma fotografia e uma visão geral do vaso de pressão vertical avaliado neste trabalho, contendo seus principais componentes e soldas identificados como segue: 1 – tampo superior; 2 – solda longitudinal; 3 – soldas circunferenciais; 4 – tampo inferior. A figura 07 também indica o posicionamento e a orientação da trinca avaliada neste trabalho.

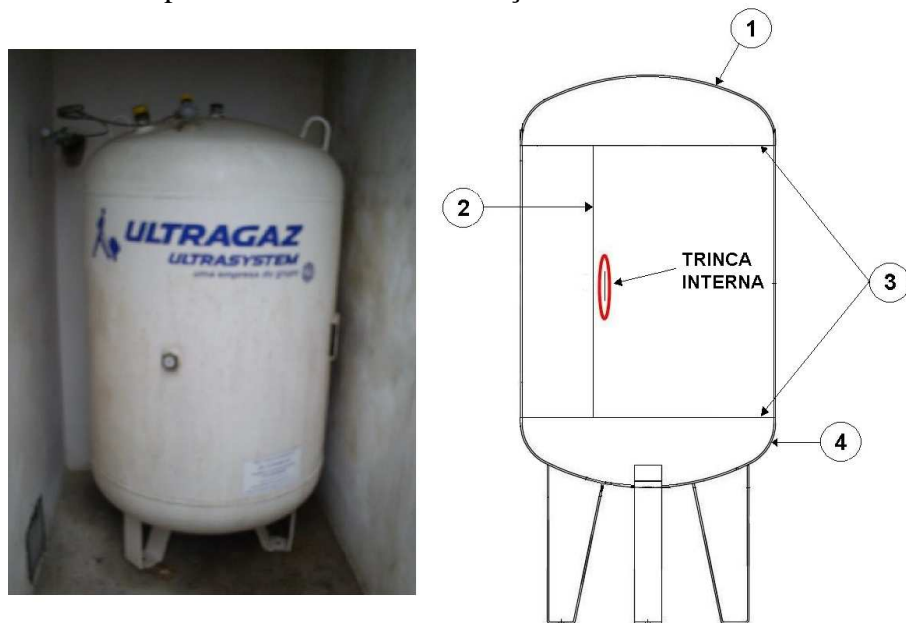


Figura 07: Fotografia e visão geral do vaso de pressão com indicação da localização e orientação da trinca.

5.2. Levantamento de Dados

Foi realizado um levantamento das condições de operação, dados dimensionais e de projeto do vaso de pressão em estudo. Estes dados estão dispostos na tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Características dimensionais, de projeto e de operação do vaso de pressão avaliado.

Fluido	Gás Liquefeito de Petróleo
Pressão Máxima de Operação	0,98 MPa (10 Kgf/cm ²)
Pressão Máxima de Trabalho Admissível	1,72 MPa (17,6 Kgf/cm ²)
Temperatura de operação	Ambiente (25°C)

Material	ASTM SA-516 Gr 70
Tensão de Escoamento	260 MPa
Módulo de Elasticidade do material	2,02 GPa
Espessura nominal (corpo)	7,94 mm
Diâmetro interno	924,12 mm
Diâmetro externo	940,00 mm
Comprimento do corpo cilíndrico	1000,00 mm
Comprimento total do recipiente	1518,00 mm
Volume interno	1 m ³

6. RESULTADOS E ANÁLISES

O tipo de descontinuidade escolhido para avaliação foram trincas superficiais (semi-elípticas), com orientação paralela ao cordão de solda longitudinal, na superfície interna de um casco cilíndrico, como mostrado na figura 07.

Para o cálculo das tensões primárias, em virtude da espessura baixa em relação ao diâmetro do vaso de pressão, foram consideradas apenas as tensões primárias de membrana, visto que as tensões primárias de flexão são muito pequenas tornando-se desprezíveis [TELLES, 2007].

Na localização da trinca, não há descontinuidades geométricas próximas nem gradientes térmicos, logo não existem tensões secundárias [DONATO, 2007].

Primeiramente, foram analisadas quatro (04) trincas de diferentes dimensões definidas como Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3 e Ponto 4, sendo que o Ponto 4 foi calculado com o objetivo de posicioná-lo no diagrama FAD sob o limite da aceitabilidade para obtenção da trinca máxima permitida para condições de pressão de 10 Kgf/cm² (0,98 MPa) e temperatura de 25°C.

Logo após, foram realizados cálculos para determinar o novo posicionamento destes quatro pontos iniciais no diagrama FAD com a alteração das temperaturas para 0°C, 50°C e 75°C, correspondendo aos Pontos 1.1, 1.2 e 1.3 para o Ponto inicial 1; Pontos 2.1, 2.2 e 2.3 para o Ponto inicial 2; Pontos 3.1, 3.2 e 3.3 para o Ponto inicial 3 e Pontos 4.1, 4.2 e 4.3 para o Ponto inicial 4.

Em seguida, um novo posicionamento dos Pontos iniciais 1, 2, 3 e 4 com alteração das pressões para 14,0 Kgf/cm² e 17,5 Kgf/cm², correspondendo aos Pontos 1.4 e 1.5 para o Ponto inicial 1; Pontos 2.4 e 2.5 para o Ponto inicial 2; Pontos 3.4 e 3.5 para o Ponto inicial 3 e Pontos 4.4 e 4.5 para o Ponto inicial 4.

Todas as trincas analisadas têm a relação comprimento (2c) por profundidade (a) igual a 16, fixada para todos os cálculos com o objetivo de analisar e comparar com mais clareza o comportamento das trincas sob diferentes parâmetros de operação.

As tabelas 2 e 3 abaixo resumem os parâmetros, medidas e resultados obtidos para a determinação da razão de colapso e razão de tenacidade dos Pontos iniciais 1, 2, 3 e 4.

Tabela 2: Determinação da razão de colapso a pressão de 0,98 MPa e temperatura de 25°C – Pontos 1, 2, 3 e 4.

Determinação da Razão de Colapso [Lr]						
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
			a = 1,5 mm	a = 3,0 mm	a = 4,5 mm	a = 4,8 mm
			2c = 24,0 mm	2c = 48,0 mm	2c = 72,0 mm	2c = 76,8 mm
Distribuição de tensões primárias	P_m	[Mpa]	123,55	123,55	123,55	123,55
Parâmetro para determinação da distribuição de tensões primárias	α	-	0,1137	0,2839	0,4643	0,5010
Parâmetro do casco para determinar fator de correção de superfície	λ_a	-	0,8286	1,1719	1,4352	1,4823
Fator de correção de superfície para uma trinca superficial	M_s	-	1,0458	1,1610	1,3532	1,4039
Tensão de referência primária	σ_{ref}^P	[Mpa]	129,21	143,44	167,19	173,45
Razão de Colapso	L_r^p	-	0,50	0,55	0,64	0,67 (Crítico)

Tabela 3: Determinação da razão de tenacidade a pressão de 0,98 MPa e temperatura de 25°C – Pontos 1, 2, 3 e 4.

Determinação da Razão de Tenacidade [Kr]						
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
			a = 1,5 mm	a = 3,0 mm	a = 4,5 mm	a = 4,8 mm
			2c = 24,0 mm	2c = 48,0 mm	2c = 72,0 mm	2c = 76,8 mm
Temperatura do material	T	[°C]	25	25	25	25
Temperatura de referência	T_{ref} [°C]	[°C]	6	6	6	6
Diferencial de temperatura	ΔT [°C]	[°C]	19	19	19	19
Tenacidade do material	K_{IC}	[Mpa.m ^{3/2}]	82,39	82,39	82,39	82,39
Tenacidade à fratura média do material	K_{mat}^{mean}	[Mpa.m ^{3/2}]	131,56	131,56	131,56	131,56
Coefficiente de influência - ponta da trinca - $\varphi = 0^\circ$	G_0	-	0,4136	0,4909	0,6250	0,6250
Coefficiente de influência - base da trinca - $\varphi = 90^\circ$	G_0	-	1,1664	1,4501	1,9089	1,9089
Parâmetro Q	Q	-	1,0473	1,0473	1,0473	1,0473
Intensidade de tensões - cargas primárias - $\varphi = 0^\circ$	K_I^P	[Mpa.m ^{3/2}]	3,43	5,75	8,97	9,27
Intensidade de tensões - cargas primárias - $\varphi = 90^\circ$	K_I^P	[Mpa.m ^{3/2}]	9,67	17,00	27,40	28,30
Tensões de referência secundárias / residuais	σ_{ref}^{SR}	[Mpa]	344,08	381,98	445,21	461,88
Intensidade de tensões - cargas secundárias / residuais - $\varphi = 0^\circ$	K_I^{SR}	[Mpa.m ^{3/2}]	9,13	15,32	23,88	24,67
Intensidade de tensões - cargas secundárias / residuais - $\varphi = 90^\circ$	K_I^{SR}	[Mpa.m ^{3/2}]	25,74	45,25	72,96	75,35
Fator ψ	ψ	-	0,0895	0,0945	0,10175	0,10175
Fator ϕ	ϕ	-	0,6145	0,5847	0,5245	0,5245
Fator de interação plástica	Φ	-	1,145	1,162	1,194	1,194
Razão de Tenacidade - $\varphi = 0^\circ$	K_r	-	0,11	0,18	0,28	0,29
Razão de Tenacidade - $\varphi = 90^\circ$	K_r	-	0,30	0,53	0,87	0,90 (Crítico)

O Ponto 4 (0,67;0,90) das tabelas 2 e 3, marcado como crítico, é o ponto onde a trinca estaria no limite da aceitabilidade no diagrama FAD, como mostrado na figura 08 abaixo. Sendo então, a trinca com dimensões de profundidade 4,8 mm e comprimento 76,8 mm, o limite para uma trinca superficial interna, paralela ao cordão de solda longitudinal, neste equipamento a pressão de 0,98 MPa e 25°C. Foram plotados nos gráficos apenas os valores da razão de tenacidade na base da trinca ($\varphi = 90^\circ$), ângulo de máxima criticidade.

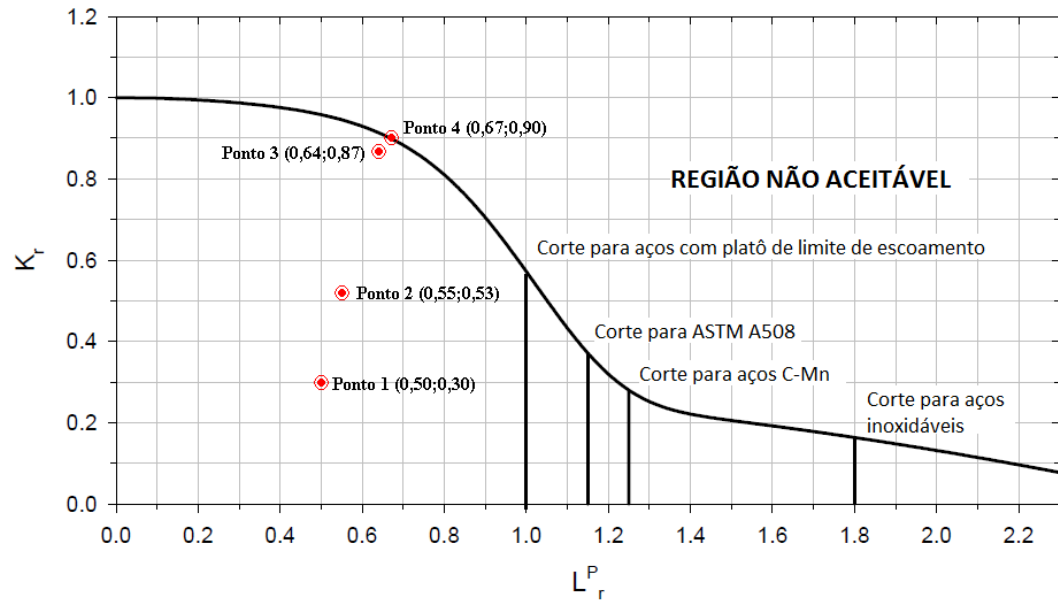


Figura 08: Diagrama FAD para as trincas analisadas das tabelas 2 e 3 – Pontos 1, 2, 3 e 4.

Seguem na tabela 4 abaixo os resultados diretamente dos pontos no diagrama FAD de acordo com a variação da temperatura de operação.

Tabela 4: Determinação da razão de tenacidade e colapso variando a temperatura de operação.

Variação da razão de colapso e razão de tenacidade em função da temperatura de operação					
Dimensão da trinca	Razão de Colapso - L_r	Razão de Tenacidade (Base da Trinca) - K_r			
		Temperatura de operação			
		0°C	25°C (Inicial)	50°C	75°C
a = 1,5 mm e 2c = 24,0 mm	0,50	0,44	0,30	0,18	0,09
a = 3,0 mm e 2c = 48,0 mm	0,55	0,77	0,53	0,31	0,17
a = 4,5 mm e 2c = 72,0 mm	0,64	1,27	0,87	0,51	0,27
a = 4,8 mm e 2c = 76,8 mm	0,67	1,32	0,90	0,53	0,28
Determinação dos pontos					
Ponto 1 (0,50;0,30)	Ponto 2 (0,55;0,53)	Ponto 3 (0,64;0,87)	Ponto 4 (0,67;0,90)		
Ponto 1.1 (0,50;0,44)	Ponto 2.1 (0,55;0,77)	Ponto 3.1 (0,64;1,27)	Ponto 4.1 (0,67;1,32)		
Ponto 1.2 (0,50;0,18)	Ponto 2.2 (0,55;0,31)	Ponto 3.2 (0,64;0,51)	Ponto 4.2 (0,67;0,53)		
Ponto 1.3 (0,50;0,09)	Ponto 2.3 (0,55;0,17)	Ponto 3.3 (0,64;0,27)	Ponto 4.3 (0,67;0,28)		

Os pontos marcados em vermelho correspondem a pontos que estão, ou no limite, ou na região não aceitável do diagrama FAD, como mostrado na figura 09 abaixo.

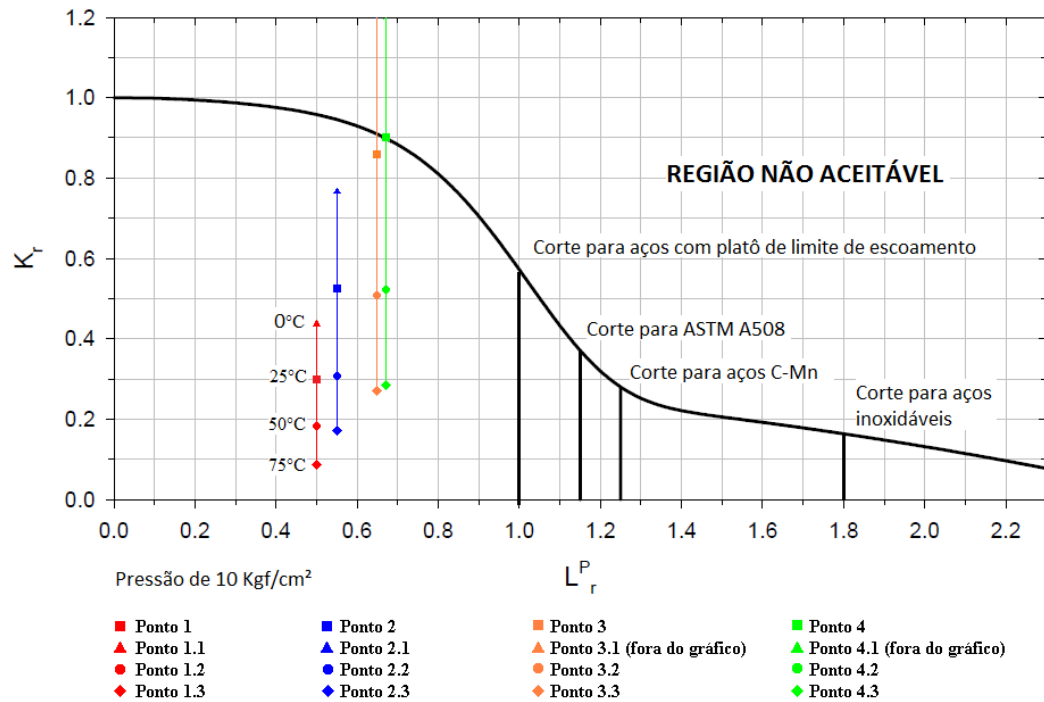


Figura 09: Diagrama FAD correspondente a Tabela 4.

Analisando a figura 09 se observa que ao diminuir a temperatura, os pontos no diagrama FAD se deslocam na direção vertical para cima em relação aos seus pontos iniciais (Ponto 1.1 em relação ao Ponto 1, por exemplo), situando-se numa condição mais crítica, concluindo-se que o risco de uma fratura frágil aumenta. Também fica observado para a situação oposta, onde com o aumento da temperatura, os pontos se deslocam na direção vertical para baixo (Pontos 1.2 e 1.3, por exemplo), afastando da linha limite do diagrama. Esse comportamento se deve ao fato de que variações de temperatura causam variações nas propriedades mecânicas, especificamente na tenacidade do material, tornando-o mais frágil para temperaturas baixas e mais dúctil para temperaturas altas.

Seguem na tabela 5 e figura 10 abaixo os resultados diretamente dos pontos no diagrama FAD de acordo com a variação da pressão de operação.

Tabela 5: Determinação da razão de tenacidade e colapso variando a pressão de operação.

Variação da razão de colapso e razão de tenacidade em função da pressão de operação			
Dimensão da trinca	Razão de Colapso - L_r		
	Pressão interna		
	10 Kgf/cm ² (Inicial)	14 Kgf/cm ²	17,5 Kgf/cm ²
a = 1,5 mm e 2c = 24,0 mm	0,50	0,69	0,87
a = 3,0 mm e 2c = 48,0 mm	0,55	0,77	0,96
a = 4,5 mm e 2c = 72,0 mm	0,64	0,90	1,12
a = 4,8 mm e 2c = 76,8 mm	0,67	0,93	1,17

Dimensão da trinca	Razão de Tenacidade (Base da Trinca) - K_r		
	Pressão interna		
	10 Kgf/cm ² (Inicial)	14 Kgf/cm ²	17,5 Kgf/cm ²
a = 1,5 mm e 2c = 24,0 mm	0,30	0,33	0,35
a = 3,0 mm e 2c = 48,0 mm	0,53	0,58	0,63
a = 4,5 mm e 2c = 72,0 mm	0,87	0,95	1,03
a = 4,8 mm e 2c = 76,8 mm	0,90	0,99	1,06
Determinação dos pontos			
Ponto 1 (0,50;0,30)	Ponto 2 (0,55;0,53)	Ponto 3 (0,64;0,87)	Ponto 4 (0,67;0,90)
Ponto 1.4 (0,69;0,33)	Ponto 2.4 (0,77;0,58)	Ponto 3.4 (0,90;0,95)	Ponto 4.4 (0,93;0,99)
Ponto 1.5 (0,87;0,35)	Ponto 2.5 (0,96;0,63)	Ponto 3.5 (1,12;1,03)	Ponto 4.5 (1,17;1,06)

Os pontos marcados em vermelho correspondem a pontos que estão, ou no limite, ou na região não aceitável do diagrama FAD, como mostrado na figura 10 abaixo.

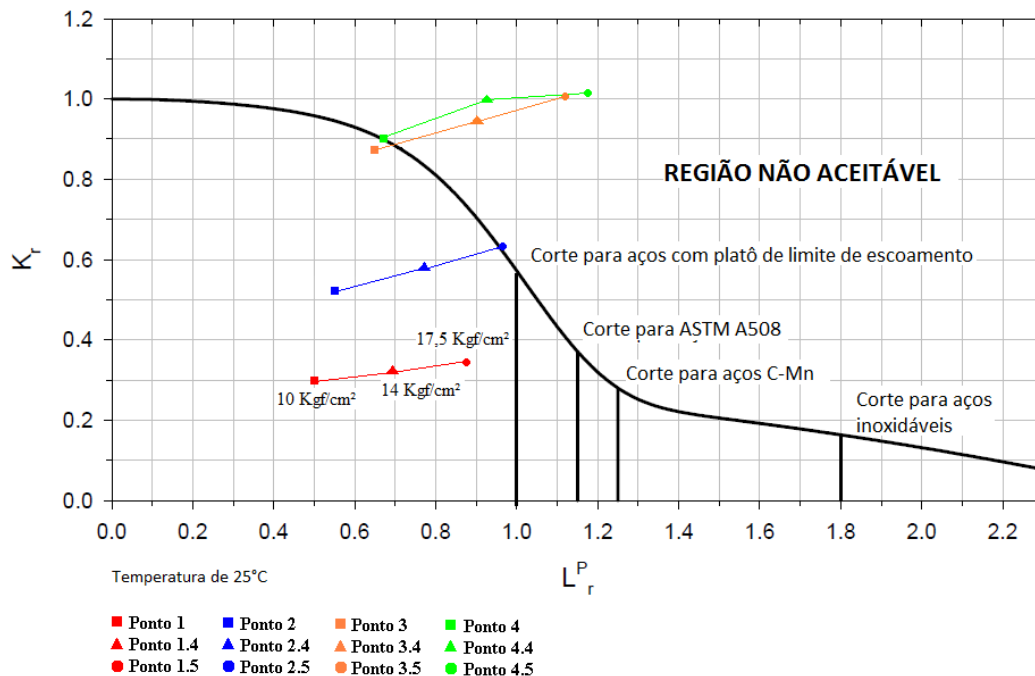


Figura 10: Diagrama FAD correspondente a Tabela 5.

Na figura 10 se ilustra a modificação na curva FAD da pressão de operação. Neste caso se observa que o movimento do ponto (K_r ; L_r^P) dentro da curva FAD se desloca mais horizontalmente quando a pressão aumenta, sendo que neste caso a ruptura é mais dúctil. Esse comportamento acontece pelo fato de com o aumento da pressão, as tensões na parede do vaso de pressão aumentam consideravelmente.

7. CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento do trabalho, buscou-se avaliar o comportamento da aceitabilidade de uma trinca baseado nos principais parâmetros de operação do equipamento, pressão e temperatura. Através do estudo foi possível concluir que:

- A metodologia utilizada de Fitness For Service baseada na API-579 mostrou-se uma ferramenta excelente para avaliar a criticidade dos defeitos analisados sob diferentes parâmetros operacionais, pois todos os resultados obtidos corresponderam com o que já era esperado conforme os conceitos da mecânica da fratura.

- Na avaliação de nível 2 da API 579, além dos diversos cálculos a serem realizados, a maior dificuldade se apresenta no quão criterioso se deve ser devido às dezenas de coeficientes que são utilizados nos cálculos, visto que pequenas variações destes coeficientes podem levar a resultados incoerentes e irreais.

- A temperatura de operação tem influência direta e significativa apenas sob a razão de tenacidade. O resultado se mostrou satisfatório, pois já se imaginava que o comportamento da trinca com a diminuição da temperatura tendesse a aumentar seu risco de um colapso frágil.

- A pressão de operação tem mais influência na razão de colapso do que na razão de tenacidade do material, ou seja, quanto maior a pressão maior o risco de um colapso plástico.

Trabalhos futuros

Sugere-se realizar uma análise no nível 3 da API 579 com o auxílio de simulações numéricas. Também seria interessante acrescentar a este trabalho, a análise do comportamento de trincas no diagrama FAD sob variações do comprimento da trinca com sua profundidade fixa e também o oposto. Outras variações também podem ser aplicadas, tais como o material e as próprias dimensões do vaso de pressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ANDERSON, T. L., **Fracture Mechanics Fundamentals and Applications**, Second Edition, CRC Press, USA, 1995.

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

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**, Second Edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1999.

HUPPES, R. M. **Avaliação Estrutural de Digestores**, Trabalho de Conclusão de Curso, Ufrgs, 2009.

INSTITUTE, A. P. **API Recommended Practice 579 Fitness For Service**. Second Edition. Washington, D. C., 2007.

RAMOS, K. A. M. **Estudo Comparativo entre os Resultados Obtidos pelos Documentos API-579 e BS-7910 na Avaliação de Trincas em Vasos de Pressão**, Dissertação de Mestrado. 2009.

STROHAECKER, T. R., **Mecânica da Fratura**, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 1999.

TELLES, P. C. S. **Vasos de Pressão**, Segunda edição, Rio de Janeiro: LTC, 2007.

APÊNDICE A – TABELAS

Tabela A1: Formulário para determinação da Razão de Colapso conforme parágrafo D.5.10 do API-579.

Tensão de Referência	$\sigma_{ref} = \frac{\sqrt{9(M_s P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$	(A1.1)
Distribuição de tensões primárias	$P_m = \frac{PR_i^2}{(R_o^2 - R_i^2)}$	(A1.2)
Fator α	$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}}$	(A1.3)
Fator de correção de superfície para um trinca superficial	$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \left(\frac{1}{M_t(\lambda_a)} \right)}$	(A1.4)
Fator de correção de superfície baseado em um parâmetro do casco	$M_t(\lambda_a) = \left(\frac{1,02 + 0,4411\lambda_a^2 + 0,006124\lambda_a^4}{1 + 0,02642\lambda_a^2 + 1,533(10^{-6})\lambda_a^4} \right)^{0,5}$	(A1.5)
Parâmetro do casco para determinar fator de correção de superfície	$\lambda_a = \frac{1,818c}{R_i a}$	(A1.6)

Tabela A2: Formulário para determinação da Tenacidade à Fratura Média do Material – Metodologia “Lower Bound”.

Diferencial de temperatura	$\Delta T = T - T_{ref}$	(A2.1)
Tenacidade à fratura média do material	$\frac{K_{mat}^{mean}}{K_{IC}} \Big _{\sigma=1} = \left[\frac{1,0}{B_0 + B_1 \Delta T + B_2 \Delta T^2 + B_3 \Delta T^3 + B_4 \Delta T^4 + B_5 \Delta T^5} \right]$	(A2.2)

Tabela A3: Formulário para determinação da Razão de Tenacidade conforme parágrafo C.5.10 do API-579.

Fator Intensidade de Tensões	$K_I = 2G_o \left[\frac{pR_o}{R_o^2 - R_i^2} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$	(A3.1)
Coefficiente de influência	$G_i = A_o; \varphi = 0^\circ$	(A3.2)
Coefficiente de influência	$G_i = \sum_{n=0}^6 A_n; \varphi = 90^\circ$	(A3.3)
Parâmetro Q	$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}$	(A3.4)
Fator de Interação Plástica	$\Phi = \Phi_o \left(1 + \frac{\psi}{\phi} \right); \text{ se: } 0 < L_r^{Sr} \leq 4,0, \text{ então } \Phi_o = 1,0$	(A3.5)

ANEXO A – Tabelas

Tabela A1: Materiais para determinação da temperatura de referência (Fonte: API-579 - Table 3.2).

Curve	Material (1), (2), (6)
A	<ol style="list-style-type: none"> All carbon and all low alloy steel plates, structural shapes and bars not listed in Curves B, C, and D below. SA-216 Grades WCB and WCC if normalized and tempered or water-quenched and tempered; SA -217 Grade WC6 if normalized and tempered or water-quenched and tempered The following specifications for obsolete materials: A7, A10, A30, A70, A113, A149, A150 (3). The following specifications for obsolete materials from the 1934 edition of the ASME Code, Section VIII: S1, S2, S25, S26, and S27 (4). A201 and A212 unless it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice (5)
B	<ol style="list-style-type: none"> SA-216 Grades WCA if normalized and tempered or water-quenched and tempered SA-216 Grades WCB and WCC for thicknesses not exceeding 2 inches if produced to a fine grain practice and water-quenched and tempered SA -217 Grade WC9 if normalized and tempered SA-285 Grades A and B SA-414 Grade A SA-442 Grade 55 > 1 in. if not to fine grain practice and normalized SA-442 Grade 60 if not to fine grain practice and normalized SA-515 Grades 55 and 60 SA-516 Grades 65 and 70 if not normalized SA-612 if not normalized SA-662 Grade B if not normalized Except for cast steels, all materials of Curve A if produced to fine grain practice and normalized which are not listed for Curve C and D below; All pipe, fittings, forgings, and tubing not listed for Curves C and D below; Parts permitted from paragraph UG-11 of the ASME Code, Section VIII, Division 1, shall be included in Curve B even when fabricated from plate that otherwise would be assigned to a different curve. A201 and A212 if it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice.
C	<ol style="list-style-type: none"> SA-182 Grades 21 and 22 if normalized and tempered. SA-302 Grades C and D SA-336 Grades F21 and F22 if normalized and tempered SA-387 Grades 21 and 22 if normalized and tempered SA-442 Grades 55 < 1 in. if not to fine grain practice and normalized SA-516 Grades 55 and 60 if not normalized SA-533 Grades B and C SA-662 Grade A All material of Curve B if produced to fine grain practice and normalized and not listed for Curve D below
D	SA-203 SA-442 if to fine grain practice and normalized SA-508 Class 1 SA-516 if normalized SA-524 Classes 1 and 2 SA-537 Classes 1 and 2 SA-612 if normalized SA-662 if normalized SA-738 Grade A

Tabela A2: Temperaturas de referência (Fonte: API-579 - Table 9.2).

MYS (MPa)	ASME Exemption Curve			
	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)
200	42	21	0	-15
210	38	17	-4	-18
220	36	15	-7	-21
230	33	12	-9	-23
240	31	10	-11	-26
260	27	6	-15	-29
280	24	3	-18	-32
300	22	1	-21	-35
320	19	-2	-23	-37
340	17	-4	-25	-39
360	15	-6	-27	-41

Tabela A3: Correlações para determinação da razão entre tenacidade à fratura média e tenacidade à fratura do material, para carregamento estático (Fonte: API-579 - Table F.11).

Correlation	Sigma (1)	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
K_{mat}^{mean} / K_{IC}	0	0.49920	-1.2103E-4	1.7924E-5	3.8591E-8	4.6627E-11	2.9800E-13
	1	0.61401	2.2142E-4	2.1050E-5	5.9334E-8	8.3068E-11	2.9452E-13
	2	0.74203	7.6452E-4	2.4899E-5	8.5761E-8	1.3869E-10	2.8014E-13
	3	0.87961	1.5415E-4	2.9888E-5	1.1822E-7	2.1613E-10	2.7970E-13

Tabela A4: Coeficientes A_n para determinação do fator G_i em uma trinca superficial interna semi-elíptica em um cilindro (Fonte: API-579 Table C.12).

t/R_i	a/c	a/t	G_i	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.0	1	0	G_0	1.1977992	-0.5244870	0.1498299	2.3284866	-5.1058499	4.3469049	-1.3487980
			G_1	0.1870117	0.6987352	0.1316900	0.7269255	-2.5259384	2.1756251	-0.6540458
		0.2	G_0	1.2263282	-1.1608467	4.4744783	-11.584231	17.811241	-14.408250	4.6998279
			G_1	0.2154786	0.2441623	2.8107820	-7.6574580	11.171413	-9.0053693	2.9542871
		0.4	G_0	1.2989480	-0.9978000	1.9479540	-1.3002700	-1.4940100	2.8306230	-1.2126000
			G_1	0.2386246	0.1447774	3.3198992	-9.2456599	13.823512	-11.223715	3.6868232
		0.6	G_0	1.3971180	-1.1348400	1.7918740	-0.4202600	-2.8679300	3.7685480	-1.4405000
			G_1	0.2445670	0.5326670	0.5939690	-0.0361800	-2.0163100	2.2167010	-0.7782200
		0.8	G_0	1.5117010	-1.3244800	1.7568350	-0.1337900	-2.8629300	3.2953270	-1.1412400
			G_1	0.2704470	0.5113280	0.5357440	-0.0327300	-1.5570200	1.5570970	-0.5094600
0.0	2	0	G_0	0.8150546	-0.5623828	1.4465771	-4.6778133	8.4192164	-7.9025932	2.9866351
			G_1	0.1359146	0.0702340	3.5558581	-11.034445	16.967724	-14.126991	4.8706612
		0.2	G_0	0.8463715	-1.0011024	4.0052312	-11.937181	19.189548	-16.039296	5.4674371
			G_1	0.1395121	0.0753999	3.1895604	-9.5540932	14.214316	-11.649525	4.0073308
		0.4	G_0	0.8570045	-1.0183085	3.9957306	-11.886878	19.152747	-16.047480	5.4801806
			G_1	0.1436696	0.0544018	3.2816127	-9.8164232	14.610963	-11.942138	4.0907797
		0.6	G_0	0.8839861	-1.0765270	4.0774087	-11.976171	19.173189	-15.996207	5.4501217
			G_1	0.1504185	0.0478401	3.2579960	-9.6921199	14.370843	-11.736129	4.0258411
		0.8	G_0	0.9033134	-0.9619755	2.8501500	-7.6366897	11.596116	-9.4828625	3.2550163
			G_1	0.1458559	0.2313881	1.9882138	-5.5546045	7.4196069	-5.8965053	2.0855563
0.01	0.03125	0	G_0	0.1965046	2.9373464	-5.2582823	7.4889153	-6.9282667	3.3673349	-0.6677966
			G_1	0.0051780	0.1750280	2.7718680	-4.6457154	4.6780502	-3.2768090	0.9840994
		0.2	G_0	0.2149558	2.4720875	-1.2147834	-4.1389650	10.539267	-9.6956094	3.1225660
			G_1	0.0081814	0.2385252	2.4687702	-3.7439973	3.7704530	-2.9529315	0.9589542
		0.4	G_0	0.2371100	3.0647320	-3.4513200	3.3917110	2.7324370	-7.4671300	3.6474100
			G_1	0.0110140	0.4025030	1.6437570	-0.3727600	-0.8119700	-0.0858000	0.1781500
		0.6	G_0	0.2921630	3.6926360	-4.6925300	11.901720	-7.7448000	-3.7999500	3.3544000
			G_1	0.0226600	0.6715900	0.4388550	4.5930610	-6.5549400	2.3178280	-0.1251900
		0.8	G_0	0.5243760	2.2524770	16.793480	-53.803200	114.103600	-119.702000	44.914100
			G_1	0.0833680	0.4665890	4.7440270	-8.4336900	21.115630	-26.684500	10.785300
0.01	0.0625	0	G_0	0.2695332	2.1626001	-1.6551569	-1.2970208	4.5604304	-4.3163876	1.4010655
			G_1	0.0138667	0.1827458	2.5749608	-3.9044679	3.3556301	-2.1772209	0.6420134
		0.2	G_0	0.3011924	1.7811106	0.8562316	-6.9529186	11.339236	-8.4567250	2.3835697
			G_1	0.0198422	0.2079432	2.6052559	-4.3155521	4.6614903	-3.6113853	1.1602564
		0.4	G_0	0.3321630	2.4901340	-1.5629300	0.0711970	3.2088600	-4.5926200	1.7583400
			G_1	0.0275700	0.4338520	1.4670200	0.0742960	-2.3137100	1.6328580	-0.4232800
		0.6	G_0	0.4174310	3.3955340	-4.5683700	12.806250	-16.603400	8.3551170	-1.3349400
			G_1	0.0592490	0.4942840	2.2111170	-1.9453300	2.2241680	-3.3126700	1.4345200
		0.8	G_0	0.6609890	3.4633420	2.8481190	-3.5483900	4.2900100	-10.609700	6.3367900
			G_1	0.1233510	0.6910730	2.8678320	-1.6023100	0.5891520	-3.1647400	2.0037600
0.01	0.125	0	G_0	0.4065238	0.7772483	3.8861644	-12.573943	16.760207	-11.014593	2.8706957
			G_1	0.0320270	0.1825342	2.2670449	-2.7076615	1.2088194	-0.3777430	0.0763155
		0.2	G_0	0.4140502	1.1388823	1.7096208	-6.0970813	7.5806259	-4.7412598	1.1879060
			G_1	0.0486456	0.0159697	3.8996081	-9.0058939	12.464506	-9.7091690	2.9890898
		0.4	G_0	0.4927230	1.5440820	0.6341780	-2.3645300	1.5071740	0.0175250	-0.3190500
			G_1	0.0625230	0.3683750	1.6262050	-0.6018500	-1.8348700	1.7392560	-0.5338200
		0.6	G_0	0.6457970	1.8450060	0.8248110	-1.2027800	-1.6161800	2.2686010	-0.8026800
			G_1	0.1079430	0.4523420	1.7937000	-0.7530100	-1.6009900	1.2810970	-0.2997100
		0.8	G_0	0.9331980	1.8484040	4.0610460	-6.4488400	-1.5508000	5.3526860	-1.8508400
			G_1	0.1900180	0.4493580	2.8240480	-2.7063600	-0.5768000	1.3457950	-0.3958100

Tabela A5: Determinação do fator ϕ (Fonte: API-579 – Table 9.6).

ϕ											
L_r^P	L_r^S										
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	≥ 5.0
0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.1	0.0	0.815	0.869	0.877	0.880	0.882	0.883	0.883	0.882	0.879	0.874
0.2	0.0	0.690	0.786	0.810	0.821	0.828	0.832	0.833	0.833	0.831	0.825
0.3	0.0	0.596	0.715	0.752	0.769	0.780	0.786	0.789	0.789	0.787	0.780
0.4	0.0	0.521	0.651	0.696	0.718	0.732	0.740	0.744	0.745	0.743	0.735
0.5	0.0	0.457	0.589	0.640	0.666	0.683	0.693	0.698	0.698	0.695	0.688
0.6	0.0	0.399	0.528	0.582	0.612	0.631	0.642	0.647	0.648	0.644	0.638
0.7	0.0	0.344	0.466	0.522	0.554	0.575	0.587	0.593	0.593	0.589	0.587
0.8	0.0	0.290	0.403	0.460	0.493	0.516	0.528	0.533	0.534	0.534	0.535
0.9	0.0	0.236	0.339	0.395	0.430	0.452	0.464	0.470	0.475	0.480	0.486
1.0	0.0	0.185	0.276	0.330	0.364	0.386	0.400	0.411	0.423	0.435	0.449
1.1	0.0	0.139	0.218	0.269	0.302	0.326	0.347	0.367	0.387	0.406	0.423
1.2	0.0	0.104	0.172	0.219	0.256	0.287	0.315	0.340	0.362	0.382	0.399
1.3	0.0	0.082	0.142	0.190	0.229	0.263	0.291	0.316	0.338	0.357	0.375
1.4	0.0	0.070	0.126	0.171	0.209	0.241	0.269	0.293	0.314	0.333	0.350
1.5	0.0	0.062	0.112	0.155	0.190	0.220	0.247	0.270	0.290	0.309	0.325
1.6	0.0	0.055	0.100	0.139	0.172	0.200	0.225	0.247	0.267	0.285	0.301
1.7	0.0	0.048	0.089	0.124	0.154	0.181	0.204	0.224	0.243	0.260	0.276
1.8	0.0	0.042	0.078	0.110	0.137	0.161	0.183	0.202	0.220	0.236	0.250
1.9	0.0	0.036	0.068	0.096	0.120	0.142	0.162	0.180	0.196	0.211	0.225
≥ 2.0	0.0	0.031	0.058	0.083	0.104	0.124	0.141	0.170	0.172	0.186	0.198

Tabela A6: Determinação do fator ψ (Fonte: API-579 – Table 9.4).

ψ											
L_r^P	L_r^S										
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	≥ 5.0
0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.0	0.020	0.043	0.063	0.074	0.081	0.086	0.090	0.095	0.100	0.107
0.2	0.0	0.028	0.052	0.076	0.091	0.100	0.107	0.113	0.120	0.127	0.137
0.3	0.0	0.033	0.057	0.085	0.102	0.114	0.122	0.130	0.138	0.147	0.160
0.4	0.0	0.037	0.064	0.094	0.113	0.126	0.136	0.145	0.156	0.167	0.180
0.5	0.0	0.043	0.074	0.105	0.124	0.138	0.149	0.160	0.172	0.185	0.201
0.6	0.0	0.051	0.085	0.114	0.133	0.147	0.159	0.170	0.184	0.200	0.215
0.7	0.0	0.058	0.091	0.117	0.134	0.147	0.158	0.171	0.186	0.202	0.214
0.8	0.0	0.057	0.085	0.105	0.119	0.130	0.141	0.155	0.169	0.182	0.190
0.9	0.0	0.043	0.060	0.073	0.082	0.090	0.101	0.113	0.123	0.129	0.132
1.0	0.0	0.016	0.019	0.022	0.025	0.031	0.039	0.043	0.044	0.041	0.033
1.1	0.0	-0.013	-0.025	-0.033	-0.036	-0.037	-0.042	-0.050	-0.061	-0.073	-0.084
1.2	0.0	-0.034	-0.058	-0.075	-0.090	-0.106	-0.122	-0.137	-0.151	-0.164	-0.175
1.3	0.0	-0.043	-0.075	-0.102	-0.126	-0.147	-0.166	-0.181	-0.196	-0.209	-0.220
1.4	0.0	-0.044	-0.080	-0.109	-0.134	-0.155	-0.173	-0.189	-0.203	-0.215	-0.227
1.5	0.0	-0.041	-0.075	-0.103	-0.127	-0.147	-0.164	-0.180	-0.194	-0.206	-0.217
1.6	0.0	-0.037	-0.069	-0.095	-0.117	-0.136	-0.153	-0.168	-0.181	-0.194	-0.205
1.7	0.0	-0.033	-0.062	-0.086	-0.107	-0.125	-0.141	-0.155	-0.168	-0.180	-0.191
1.8	0.0	-0.030	-0.055	-0.077	-0.097	-0.114	-0.129	-0.142	-0.155	-0.166	-0.177
1.9	0.0	-0.026	-0.049	-0.069	-0.086	-0.102	-0.116	-0.129	-0.141	-0.154	-0.162
≥ 2.0	0.0	-0.023	-0.043	-0.061	-0.076	-0.091	-0.104	-0.116	-0.126	-0.137	-0.146