

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais - PPGEM

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS  
PELOS DOCUMENTOS API - 579 E BS - 7910 NA AVALIAÇÃO DE  
TRINCAS EM VASOS DE PRESSÃO.**

KLEBER ANTÔNIO MACHADO RAMOS

Eng<sup>o</sup> Mecânico

Dissertação para obtenção de título de

*Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de  
Inspeção de Equipamentos*

Porto Alegre - RS

2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais - PPGEM

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS  
PELOS DOCUMENTOS API - 579 E BS - 7910 NA AVALIAÇÃO DE  
TRINCAS EM VASOS DE PRESSÃO.**

KLEBER ANTÔNIO MACHADO RAMOS

Eng<sup>o</sup> Mecânico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos.

Porto Alegre - RS

2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade de Inspeção de Equipamentos e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Euripedes Ferreira Napolião

Dr. Luiz Antonio Bereta

Dr. Hermano Cezar Medaber Jambo

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, Agosto de 2009

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha querida esposa Grazielle e aos nossos amados filhos Vitor e Beatriz, por serem estímulos que me impulsionaram a buscar vida nova a cada dia, meus agradecimentos por terem aceitado se privar de minha companhia pelos estudos, concedendo a mim a oportunidade de me realizar ainda mais...

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor e orientador Afonso Reguly pelo auxílio e dedicação fundamental para a realização deste trabalho, e aos demais mestres da casa, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao engenheiro João Hein e aos demais colegas, engenheiros e técnicos, da Inspeção de Equipamentos / REPLAN, pela simpatia e presteza no auxílio das atividades durante o período de vivencial na REPLAN.

Aos colegas, engenheiros Rafael Pavan Bagagli, Hervandil Morosini Santanna e Marcelo Fonseca dos Santos pelo apoio prestado ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de turma do CEINSP 2008, pela espontaneidade na troca de informações e materiais numa demonstração de amizade e solidariedade.

A Petrobras, empresa que financia e acredita na qualificação profissional, pela oportunidade.

Ao PPGEM da UFRGS, pelo apoio institucional que tornou possível a realização deste trabalho.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>2</b>
3.1 Vasos de Pressão .....	2
3.2 Fundamentos da Mecânica da Fratura.....	3
3.2.1 Generalidades .....	3
3.2.2 Mecânica da fratura linear elástica – MFLE .....	5
3.2.2.1 Ensaio de tenacidade à fratura - $K_{IC}$ .....	8
3.2.3 Mecânica da fratura elasto-plástica – MFEP.....	11
3.2.3.1 Ensaio de tenacidade à fratura - CTOD .....	12
3.3 Visão geral do API-579.....	15
3.3.1 Procedimentos para avaliação de trincas, Seção 9 do API-579.....	18
3.3.1.1 Procedimento Nível 1 pelo API-579.....	21
3.3.1.2 Procedimento Nível 2 pelo API-579.....	23
3.4 Visão geral do documento BS-7910. ....	30
3.4.1 Procedimento Nível 1 pela BS-7910 .....	34
3.4.2 Procedimento Nível 2 pela BS-7910 .....	40
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>48</b>

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Organização de cada seção do API-579 .....	16
Tabela 3.2 - Resumo das seções com procedimentos de avaliação.....	17
Tabela 3.3 - Resumo dos Anexos do API-579. ....	17
Tabela 3.4 – Seções do documento BS-7910 .....	31
Tabela 4.1 - Profundidades das trincas avaliadas .....	49
Tabela 4.2 - Dados de projeto e propriedades do material .....	49
Tabela 4.3 – Valores de tensão residual considerados na avaliação. ....	50
Tabela 5.1 – Comparação entre as dimensões críticas. ....	59



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Abordagem da Mecânica da Fratura.....	5
Figura 3.2 - Modelo do orifício elíptico.....	6
Figura 3.3 - Dimensões do CP para ensaio de $K_{IC}$ .....	9
Figura 3.4 – Tipos de curvas carga-deslocamento do ensaio de $K_{IC}$ .....	9
Figura 3.5 - Definição de CTOD.....	11
Figura 3.6 - Curvas do ensaio de CTOD. ....	13
Figura 3.7 - Corpo de prova SENB do ensaio de CTOD. ....	14
Figura 3.8 - Determinação da componente plástico, $V_p$ .....	15
Figura 3.9 – FAD.....	19
Figura 3.10 – FAD generalizado. ....	29
Figura 3.11 - Caracterização das trincas.....	35
Figura 3.12 - FAD - nível 1A.....	39
Figura 3.13 - FAD genérico, Nível 2A.....	42
Figura 4.1 - Geometria estudada. ....	48
Figura 4.2 - FAD, metodologia para encontrar o $2c_c$ .....	55
Figura 5.1 – Pontos de avaliação ( $a$ , $2c_c$ ).....	58
Figura 5.2 - FAD, comparação entre os resultados do API-579 e BS-7910 (s/ TTAT).....	60

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

CP: Corpo de prova.

FAD: Failure Assessment Diagram.

FFS: Fitness-for-Service.

MFEP: Mecânica da Fratura Elasto-Plástica.

MFLE: Mecânica da Fratura Linear Elástica.

NDT: Nil Ductil Temperature.

PMTA: Pressão Máxima de Trabalho Admissível.

TTAT: Tratamento térmico de alívio de tensões.

## RESUMO

Equipamentos de processo, como vasos de pressão, podem apresentar descontinuidades em suas estruturas, sendo elas originadas durante o processo de fabricação, ou devido ao uso do equipamento. A possibilidade de causarem falhas por fratura catastrófica em equipamentos de alto risco fazem das trincas o tipo de descontinuidade mais preocupante. Sendo, por isso, muitas vezes caracterizadas como defeitos, portanto inadmissíveis por vários códigos de fabricação de vasos de pressão. Mesmo que sua presença não seja admissível em equipamentos novos, as trincas são comumente detectadas em serviço, podendo seu reparo significar grandes prejuízos econômicos devido à parada de produção em uma refinaria de petróleo. Diante dessa situação, há a necessidade de se conhecer e adotar metodologias adequadas que possam avaliar com segurança, e sem conservadorismo excessivo, a criticidade desses defeitos na integridade estrutural dos equipamentos. Dois dos principais documentos que apresentam metodologias para avaliação de adequação-ao-uso de equipamentos que apresentam algum tipo de descontinuidade são a API-579 e a BS-7910. O presente trabalho aplicou ambos os documentos na avaliação de uma trinca longitudinal, localizada próxima a um cordão de solda, em uma geometria cilíndrica hipotética com e sem tratamento térmico. Foram comparados ambos os resultados por meio do diagrama de análise de falhas – FAD. Foram realizadas comparações entre as diferentes metodologias, apontando as facilidades e dificuldades no seu uso.

## **ABSTRACT**

Process equipment, such as pressure vessels, may have discontinuities, which are generated during the manufacturing process, or due to the use of the equipment. The possibility of a catastrophic failure in high risk equipment makes the cracks the most worry some type of discontinuity. Therefore, cracks are often characterized as defects and are not permissible according several pressure vessels construction codes. Even being not permissible in new equipments, cracks are commonly detected in service; its repair can result in large economic losses due to losses in production at an oil refinery. To deal with this situation, there is a need to understand and adopt appropriate methodologies to evaluate safely and without excessive conservatism, the criticality of these defects in the structural integrity of equipment. API-579 and BS-7910 are two widely used documents that present methodologies for assessment of fitness-for-service in equipments that have any discontinuity. This study applied both documents in the evaluation of a longitudinal crack, located near to weld, in a hypothetical cylindrical geometry with and without heat treatment. Both results were compared by means of the Failure Analysis Diagram - FAD. Comparisons were made between different approaches, pointing out the advantages and difficulties in its use.

# **1 INTRODUÇÃO**

Equipamentos de processo como vasos de pressão podem apresentar algum tipo de descontinuidade em sua estrutura, e, nestes casos, análises de integridade estrutural são atividades indispensáveis para se garantir segurança na operação dos equipamentos, evitar perdas de produção e gastos desnecessários com reparos de descontinuidades que não representam risco de falha.

Fundamentados na mecânica da fratura, os documentos API-579 e BS-7910 constituem importantes ferramentas na avaliação de integridade estrutural utilizados pela Petrobras, e, um sólido conhecimento do conteúdo destes documentos se faz necessário para o correto uso dos seus procedimentos.

Para realização deste trabalho foram estudadas as partes dos documentos API-579 do American Petroleum Institute e BS-7910 do British Standard Institute que tratam da avaliação de descontinuidade tipo trinca. Os procedimentos foram então aplicados na avaliação de trincas superficiais internas a uma geometria comum de vasos de pressão, um casco cilíndrico de parede fina, com o objetivo de se comparar as diferentes metodologias, apontando as facilidades e dificuldades no seu uso.

## **2 OBJETIVOS**

No presente trabalho foram realizadas avaliações de trincas superficiais em uma geometria cilíndrica utilizando os procedimentos dos documentos API-579 e BS-7910 com os seguintes objetivos:

- Verificar qual dos documentos, API-579 ou BS-7910, é o mais conservativo para o tipo de trinca e geometria analisada;
- Comparar as diferentes metodologias, apontando as facilidades e dificuldades no seu uso.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Vasos de Pressão

De modo geral, pode-se dizer que vasos de pressão são equipamentos projetados para conter um fluido sob pressão. Existem diversos tipos de vasos de pressão apresentando dimensões, formatos e funcionalidades variadas, e, a depender do formato e/ou funcionalidade, eles podem ser conhecidos como esferas, reatores, torres, permutadores, filtros, separadores, vasos de pressão propriamente ditos etc...

Em uma refinaria de petróleo existem condições específicas que obrigam a se ter um maior grau de confiabilidade para estes equipamentos, pois, este tipo de indústria trabalha em regime contínuo, 24hs por dia, estando os equipamentos submetidos a um regime severo de operação, dado que operam durante meses sem paradas para manutenção e sem a possibilidade de uma inspeção mais criteriosa<sup>1</sup>. Estando os equipamentos interligados fisicamente para compor um determinado processo, a paralisação de um único equipamento pode ocasionar a paralisação de toda a instalação, acarretando em enormes prejuízos<sup>1</sup>. No refino de petróleo, a grande maioria dos processos apresentam condições de elevado risco devido à presença de fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, podendo estes estar submetidos a elevadas pressões e temperaturas, condições nas quais uma falha de equipamento poderia resultar em graves acidentes com enormes perdas materiais e de vidas humanas<sup>1</sup>.

Na maioria das vezes, os vasos de pressão são os equipamentos de maior tamanho, peso, custo unitário, e representam em média 60% do custo total dos materiais e equipamentos de uma unidade de processo<sup>1</sup>. Em síntese, dada a grande importância e risco que os vasos de pressão representam em uma refinaria de petróleo, fabricantes e proprietários devem, dentro de suas obrigações, dedicar especial atenção na fabricação, operação, manutenção e inspeção desses equipamentos.

A maioria dos vasos de pressão são fabricados a partir de chapas de aço calandradas, conformadas e soldadas entre si. Certamente, a soldagem dos componentes de um vaso é a etapa de fabricação que exige mais cuidado, pois, na soldagem existe a possibilidade de se introduzir defeitos de fabricação no equipamento.

As soldas podem apresentar diversas discontinuidades que deverão ser investigadas por vários exames. Todas as soldas de vasos de pressão, depois de completadas, devem ser

submetidas a exames não-destrutivos para a detecção de possíveis defeitos. A inspeção radiográfica é um método bem usual de inspeção em soldas de vasos de pressão novos. Embora soldas não radiografadas sejam permitidas, em alguns casos, pela Seção VIII, Divisão 1 do ASME B&PV (um dos principais códigos de construção de vasos de pressão existentes), é prática usual exigir-se pelos menos radiografia parcial (por amostragem) para todas as soldas principais. A radiografia total, isto é, em toda a extensão das soldas, é feita nos casos exigidos pelos materiais ou pelo serviço do vaso, ou quando se deseja adotar nos cálculos a eficiência de junta igual a um (1,0), para diminuir a espessura de parede do vaso<sup>1</sup>.

O exame radiográfico é capaz de identificar vários tipos de descontinuidades, sendo que os defeitos planares, como as trincas, são os mais graves porque podem apresentar um nível muito elevado de tensões em suas bordas, e resultar assim em fraturas frágeis, fraturas por fadiga ou por corrosão sob tensão; por esse motivo esses defeitos não são tolerados em nenhum caso pelos códigos de construção de vasos de pressão, devendo este tipo de defeito ser detectado e devidamente reparado. O ultra-som é um processo mais sensível, podendo detectar a maioria das descontinuidades e também dimensioná-las.

Além dos defeitos de fabricação, podem surgir em um vaso de pressão em operação outros defeitos devido ao meio e as condições operacionais a que este equipamento estiver submetido. Os fluidos de processo de uma refinaria de petróleo podem conter contaminantes que podem reagir com os materiais dos equipamentos, podendo ocorrer corrosão e outros tipos de deterioração. Além disso, certas condições operacionais de pressão e temperatura também podem causar deterioração e falhas nos equipamentos.

Nos últimos anos, metodologias de avaliação de integridade estrutural, baseadas nos fundamentos da mecânica da fratura, vêm sendo desenvolvidas para que um equipamento apresentando defeitos possa operar em segurança e ter seu tempo de campanha maximizado.

## ***3.2 Fundamentos da Mecânica da Fratura***

### **3.2.1 Generalidades**

#### **Falha**

De uma maneira bastante abrangente, pode-se conceituar falha como um estado de incapacidade de uma máquina, equipamento ou componente de realizar a função para a qual

foi projetado. Em componentes mecânicos, a falha pode ocorrer de diferentes formas como, por exemplo, fratura, início de escoamento, deformação excessiva, perda de material, instabilidade, entre outros. Os modos de falha podem ser classificados como: independentes do tempo (como por exemplo, fraturas e deformações devido a carregamentos estáticos) e dependentes do tempo (falha por fadiga, fluência, desgaste, etc.).

## **Fratura**

A falha por fratura leva ao surgimento e separação de duas ou mais superfícies em um sólido, com conseqüente separação do componente em duas ou mais partes e/ou vazamento de um fluido no caso de equipamentos pressurizados. A fratura pode ser dúctil ou frágil. Nos metais, uma fratura dúctil é caracterizada por uma apreciável deformação plástica na nucleação e na propagação da trinca. Uma fratura frágil é caracterizada por uma grande velocidade de propagação da trinca, com pequena deformação plástica. Um metal pode ter uma ruptura dúctil ou frágil, dependendo da temperatura, estado de tensões e velocidade de carregamento.

### **Fratura na presença de defeitos**

Em muitas situações o componente possui algum tipo de defeito em sua estrutura. Estes defeitos podem ser oriundos do processo de fabricação ou terem surgido durante operação do equipamento. Nestas situações, a integridade estrutural do equipamento deve ser analisada utilizando as ferramentas e conceitos da Mecânica da Fratura.

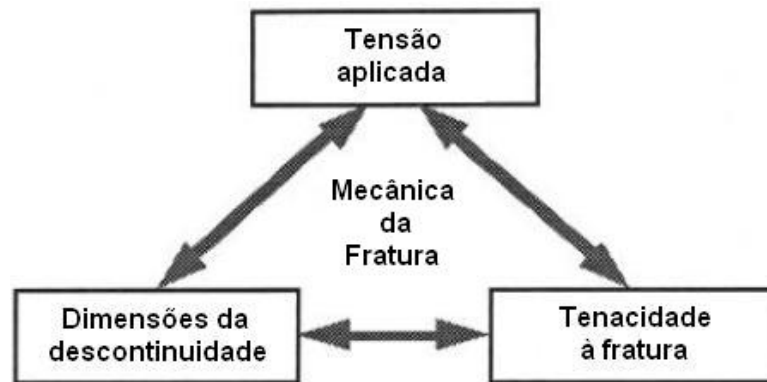
A Mecânica da fratura define o fator de intensidade de tensão,  $K_I$ , que caracteriza a sollicitação na região da trinca, o qual não pode ultrapassar um valor crítico,  $K_{IC}$ , denominado tenacidade à fratura que é uma propriedade do material. O critério de falha neste caso é:

$$K_I \geq K_{IC}$$

### **A Mecânica da Fratura**

Defeitos como, por exemplo, trincas, causam uma intensificação das tensões na região onde estão presentes, podendo causar falhas a níveis de tensão abaixo do valor de tensão admissível dos cálculos tradicionais de resistência dos materiais. Com isso, a mecânica da fratura preocupa-se em entender o comportamento dos materiais que apresentam defeitos através de formulações matemáticas que relacionam as três principais variáveis envolvidas, conforme Figura 3.1:





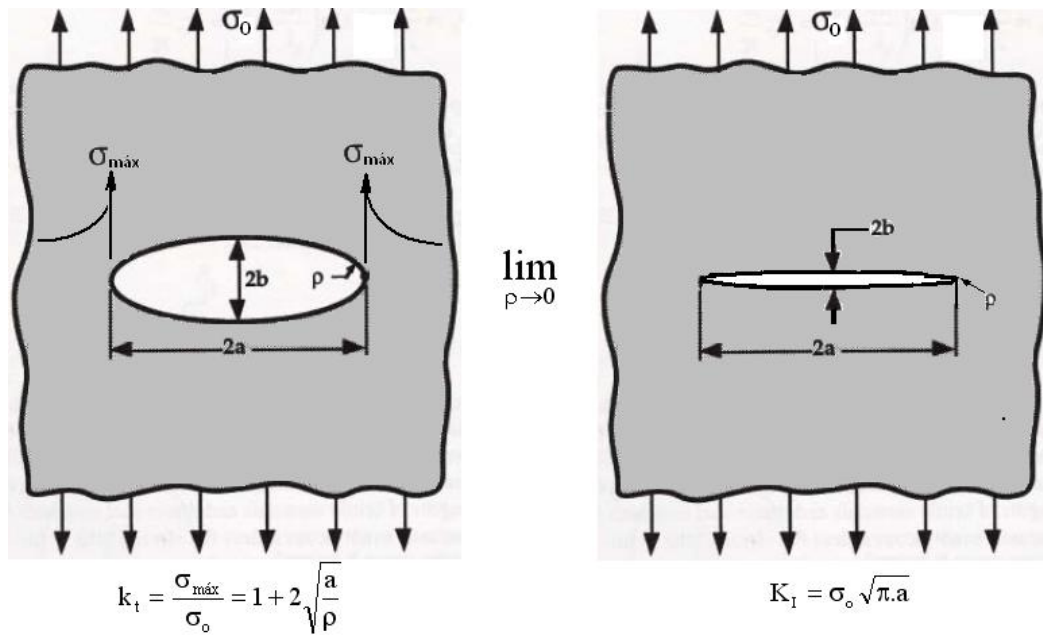
**Figura 3.1 - Abordagem da Mecânica da Fratura**

### **3.2.2 Mecânica da fratura linear elástica – MFLE**

Em teoria, para que houvesse a propagação de uma trinca, isto é, a fratura de um sólido e a criação de duas novas superfícies, uma tensão maior que a força de ligação entre os átomos desse material, da ordem de  $E/10$  ( $E$ : módulo de elasticidade), deveria se aplicada. Contudo, na prática a resistência do material é muito inferior a  $E/10$ . A primeira tentativa para explicar a diferença entre a tensão teórica e a tensão real que leva o material a falha foi a teoria de Griffith para fratura em materiais frágeis, que propôs que a queda de resistência é provocada por defeitos internos ao material, sejam estes macroscópicos ou não.

#### **Concentração de tensão na geometria de Griffith**

A geometria de Griffith é uma placa de dimensões infinitas com um orifício elíptico no centro da placa. A aplicação de uma tensão nominal  $\sigma_0$  faz surgir uma tensão máxima nas bordas do orifício elíptico, já que este age como um concentrador de tensão conforme apresentado na Figura 3.2.



**Figura 3.2 - Modelo do orifício elíptico.<sup>2</sup>**

Para um orifício elíptico, a tensão máxima pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\sigma_{\max} = \sigma_o \left( 1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (2.1)$$

onde:

$\sigma_o$  - tensão nominal;

2a - eixo maior da elipse;

2b - eixo menor da elipse;

Para uma elipse qualquer, o menor raio de curvatura é fornecido por:

$$\rho = \frac{b^2}{a}$$

Substituindo esta expressão na equação (2.1) tem-se:

$$\sigma_{\max} = \sigma_o \left( 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (2.2)$$

O fator de concentração de tensão para esta geometria é definido como:

$$k_t = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_o} = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

### Fator de intensidade de tensão

O fator de intensidade de tensão é definido como sendo o limite do produto entre a tensão  $\sigma_{\text{máx}}$  a raiz de  $\rho$  e a constante  $\sqrt{\pi}/2$ :

$$K_I = \lim_{\rho \rightarrow 0} \sigma_{\text{máx}} \sqrt{\rho} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (2.3)$$

Substituindo a Equação (2.2) na equação (2.3) e resolvendo o limite tem-se:

$$K_I = \sigma_o \sqrt{\pi.a} \quad (2.4)$$

Esta é a expressão matemática para o fator de intensidade de tensão para uma trinca interna passante em uma placa de dimensões infinitas. Este valor fornece uma maneira de quantificar o nível de sollicitação que ocorre no material próximo a região de localização da trinca, unindo, em um único parâmetro, o efeito do carregamento e do tamanho do defeito.

### Fator geométrico

O fator de intensidade de tensão calculado pela Equação (2.4) é válido apenas para a geometria de uma placa de dimensões infinitas. Para outras geometrias esta formulação não é mais válida.

Para outras geometrias o fator intensidade de tensão poderá se calculado com o uso da seguinte equação:

$$K_I = Y\sigma_o \sqrt{\pi.a} \quad (2.5)$$

onde:

$K_I$  - Fator de intensidade de tensão para a geometria;

$Y$  - Fator geométrico;

a - Tamanho característico da trinca;

$\sigma_0$ - Tensão nominal na peça.

O fator geométrico representa o quanto mais severa é a concentração de tensão da geometria de interesse em relação à geometria de placa infinita, sob tração.

### 3.2.2.1 Ensaio de tenacidade à fratura - $K_{IC}$

Quando o material se comporta de maneira linear elástica antes da fratura tal que, a zona plastificada em frente a trinca seja pequena em relação as dimensões do corpo de prova, um valor crítico para a intensidade de tensões,  $K_{IC}$ , poderá ser um parâmetro apropriado. A padronização dos ensaios de  $K_{IC}$  estão estabelecidos nas normas: ASTM E-399, ASTM E-1820 e BS-7448.

A Figura 3.3 mostra o desenho e a relação entre as dimensões de dois corpos de prova para ensaio de  $K_{IC}$  que normalmente são utilizados pelas normas (existem corpos de prova com outras geometrias).

Após usinagem, os corpos de prova são previamente trincados por fadiga, devendo o comprimento da trinca situar-se dentro de um certo intervalo de valores estabelecido por norma. O projeto do corpo de prova é tal que todas as dimensões críticas, a, B e W-a, sejam consideravelmente maiores que a zona plástica que se forma na ponta da trinca. Se a zona plástica for relativamente grande, então não será possível se obter um valor válido de  $K_{IC}$ . Os requisitos dimensionais para se obter um valor de  $K_{IC}$  válido devem respeitar a seguinte relação:

$$B, a \geq 2,5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.6)$$

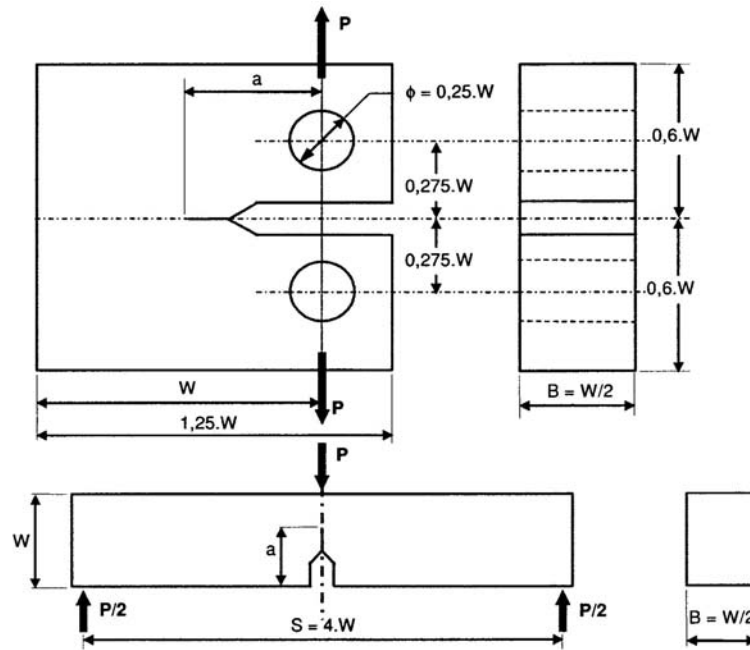


Figura 3.3 - Dimensões do CP para ensaio de  $K_{IC}$ .<sup>3</sup>

Assim como em um ensaio de tração, durante o ensaio de  $K_{IC}$ , cargas e deslocamentos são registrados num gráfico. A Figura 3.4 mostra as 3 curvas de carga vs deslocamento possíveis de se obter no ensaio:

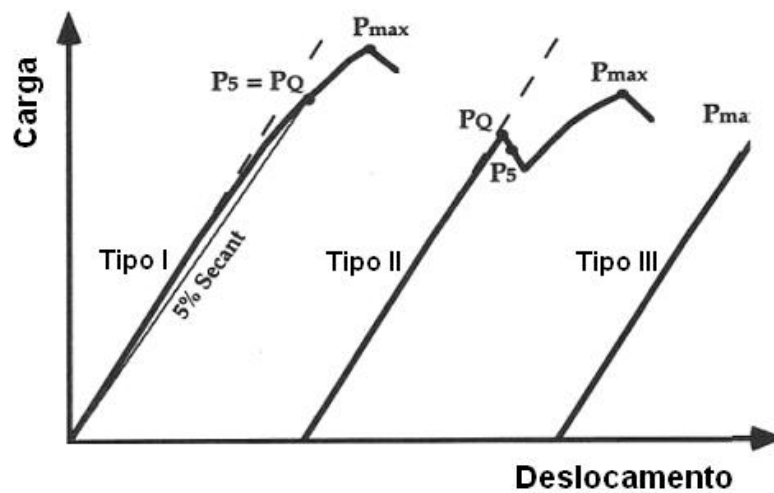


Figura 3.4 – Tipos de curvas carga-deslocamento do ensaio de  $K_{IC}$ .<sup>2</sup>

Sobre as curvas é definido um ponto,  $P_5$ , que corresponde ao ponto de intersecção de uma reta secante com 5% de inclinação em relação ao trecho reto da curva. A depender do tipo de curva, a carga crítica  $P_Q$  pode ser definida conforme segue:

**Tipo I:** se todos os pontos da curva que precedem o ponto  $P_5$  estiverem abaixo deste, então  $P_Q$  terá o valor de  $P_5$ ;

**Tipo II e Tipo III:** se houver um ponto de máximo superior a  $P_5$ , anterior ao mesmo, então este ponto de máximo corresponderá ao valor de  $P_Q$ ;

Após o ensaio, isto é, após a fratura do corpo de prova, a pré-trinca de fadiga previamente introduzida deve agora ser medida. Para tal, as normas exigem que se façam medidas do comprimento da trinca em pontos igualmente espaçados ao longo da espessura do corpo de prova para então se calcular a média do comprimento de trinca.

Uma vez determinados  $P_Q$  e o comprimento médio da trinca, calcula-se um valor inicial da tenacidade à fratura a partir da seguinte equação:

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f(a/W) \quad (2.7)$$

Onde:

**$K_Q$ :** fator de intensidade de tensão, [ksi.in<sup>1/2</sup>] ou (MPa.m<sup>1/2</sup>);

**$P_Q$ :** carga crítica, [klbf] ou (kN);

**$B, W, a$ :** dimensões do corpo de prova, [in] ou (cm);

**$f(a/W)$ :** fator de forma (adimensional);

O valor de  $K_Q$  será um valor válido de  $K_{IC}$  se os requisitos da norma que se está utilizando e todas as condições abaixo forem satisfeitas:

$$0,45 \leq \frac{a}{W} \leq 0,55 \quad (2.8)$$

$$B, a \geq 2,5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.9)$$

$$P_{\text{máx}} \leq 1,10P_Q \quad (2.10)$$

### 3.2.3 Mecânica da fratura elasto-plástica – MFEP

A aplicação da Mecânica da Fratura Elástica Linear, MFEL, está limitada a situações onde a plastificação da extremidade da trinca é restrita, pequena quando comparada com as dimensões da trinca e do ligamento. Ocorre que em muitas situações práticas as limitações da MFLE não podem ser respeitadas, tendo em vista que grande parte dos materiais com que muitos equipamentos são fabricadas apresentam uma tenacidade de média a alta. Nestes casos, o fator de intensidade de tensão,  $K_I$ , definido pela teoria da MFLE não é mais aplicável.

O primeiro parâmetro sugerido para contornar as restrições da MFLE foi o CTOD (do inglês, “Crack Tip Opening Displacement”) designado por  $\delta$  e sugerido por Wells em 1961. Este parâmetro visa caracterizar a capacidade do material deformar-se plasticamente antes da propagação da trinca, medindo o afastamento das duas faces da trinca pré-existente na sua extremidade conforme ilustra a Figura 3.5.

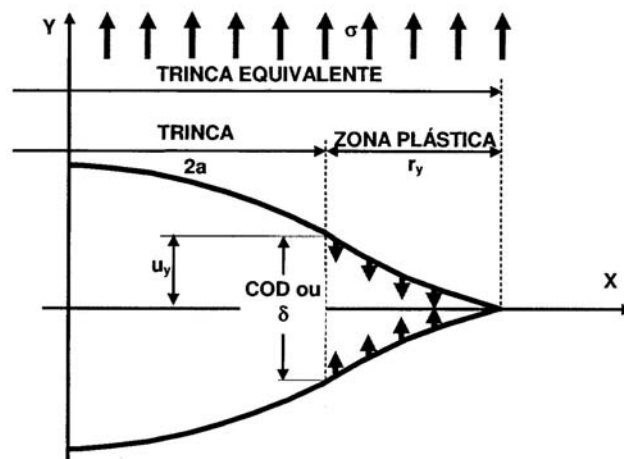


Figura 3.5 - Definição de CTOD.<sup>3</sup>

A definição de CTOD ( $\delta$ ) proposta por Wells foi a seguinte:

$$\delta = 2u_y = 2 \frac{\kappa + 1}{\mu} K_I \sqrt{\frac{r_y}{2\pi}} \quad (2.11)$$

onde,

$$\kappa = 3 - 4\nu$$

p/ estado plano de tensões

$$\kappa = \frac{3 - \nu}{1 + \nu} \quad \text{p/ estado plano de deformações}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{módulo de cisalhamento})$$

O raio plástico, proposto por Irwin, é calculado pela seguinte equação:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{ys}^2} \quad (2.12)$$

Desta forma obtém-se:

$$\text{CTOD} = \delta = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{ys} E} \quad (2.13)$$

Uma análise mais exata para a geometria de Griffith, baseado no modelo teórico desenvolvido por Dugdale, traz a seguinte equação para cálculo do CTOD:

$$\delta = \frac{8 \cdot \sigma_{ys} \cdot a}{\pi E} \ln \left[ \sec \left( \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_{ys}} \right) \right] \quad (2.14)$$

### 3.2.3.1 Ensaio de tenacidade à fratura - CTOD

O CTOD (crack tip opening displacement) é um dos parâmetros mais utilizados na determinação da tenacidade a fratura de materiais de baixa e média resistência mecânica. Devido à restrição de deformação plástica, o ensaio de  $K_{IC}$  não mais representaria a real tenacidade desses materiais a menos que o ensaio fosse realizado a temperaturas abaixo de NDT, isto é, no patamar inferior da curva de transição dúctil frágil do material cuja tenacidade se deseja determinar. O ensaio de CTOD é utilizado para materiais com comportamento a fratura dentro do regime elasto-plástico onde se admite considerável deformação plástica na ponta da trinca.



Este ensaio é padronizado pelas normas BS-7448, ASTM E-1820 e ASTM E-1290 e, assim como os corpos de prova do ensaio de  $K_{IC}$ , os corpos de prova para o ensaio de CTOD também possuem um entalhe mecânico a partir do qual se faz propagar uma trinca de fadiga.

O resultado de um ensaio de CTOD é um gráfico de carga vs abertura do entalhe do corpo de prova. A Figura 3.6 apresenta os tipos de gráfico possíveis de serem obtidos:

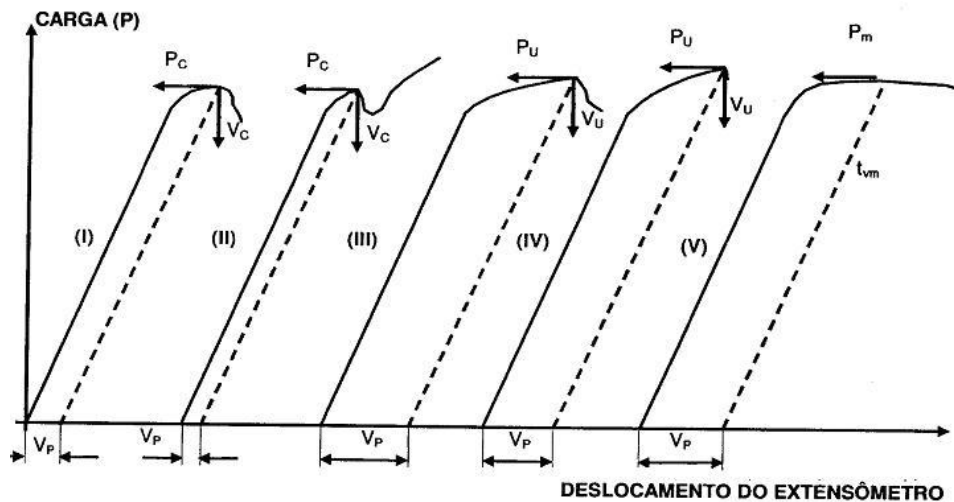


Figura 3.6 - Curvas do ensaio de CTOD. <sup>3</sup>

Os gráficos (I) e (II) fornecem o **CTOD crítico** ( $\delta_c$ ). Ocorre quando há pouca deformação plástica sendo que a fratura é quase totalmente por clivagem;

Os gráficos (III) e (IV) fornecem:

1. **CTOD de iniciação** ( $\delta_i$ ) com o crescimento dúctil da trinca se iniciando em  $P_i$ ;
2. **CTOD crítico** ( $\delta_u$ ) com propagação frágil após um pequeno crescimento dúctil da trinca;

O gráfico (V) fornece o **CTOD de carga máxima** ( $\delta_m$ ), onde a propagação da trinca se dá exclusivamente de maneira dúctil;

O valor de CTOD,  $\delta$ , é determinado separadamente em duas componentes, uma elástica ( $\delta_e$ ) e outra plástica ( $\delta_p$ ):

$$\delta = \delta_e + \delta_p \quad (2.15)$$

A componente elástica é obtida a partir de K:

$$\delta_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E} \quad (2.16)$$

A componente plástica do CTOD é calculada a partir da seguinte equação:

$$\delta_{pl} = \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a) + a + z} \quad (2.17)$$

Onde:

$\delta_p$ : componente plástica do CTOD;

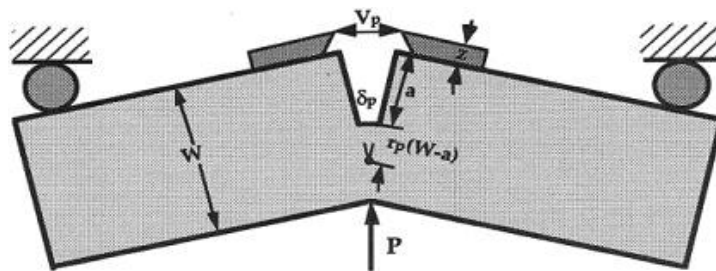
z: altura do suporte de fixação do extensômetro;

W: largura do corpo de prova;

a: valor médio do comprimento da trinca de fadiga + entalhe mecânico;

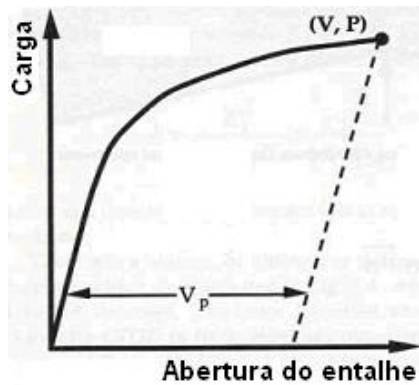
$r_p$ : fator rotacional plástico (um constante de valor entre 0 e 1 que define a posição relativa do centro aparente de rotação. De acordo com a norma ASTM E-1290, para um corpo de prova tipo SENB,  $r_p=0,44$ )

Esta equação é uma relação geométrica (semelhança de triângulos) em função da abertura do entalhe,  $V$ , do corpo de prova durante o ensaio. Esta abertura é medida com um extensômetro acoplado junto as aristas do entalhe conforme pode ser visto na Figura 3.7:



**Figura 3.7 - Corpo de prova SENB do ensaio de CTOD.<sup>2</sup>**

A componente plástica da abertura do entalhe,  $V_p$ , é obtida a partir da curva carga vs deslocamento pela traçagem de uma linha paralela a reta do carregamento elástico, conforme Figura 3.8:



**Figura 3.8 - Determinação da componente plástica,  $V_p$ .**<sup>2</sup>

### **3.3 Visão geral do API-579**

O documento API-579 fornece metodologias para avaliação da integridade estrutural de vasos de pressão, tubulações e tanques em serviço, podendo estes equipamentos apresentarem descontinuidades ou danos. Em conjunto com os códigos de inspeção do API (API Inspection codes - API 510, API 570 e API 653), estas metodologias buscam desenvolver uma avaliação de adequação-ao-uso (FFS – Fitness-for-Service em inglês) do equipamento para determinar se, mesmo apresentando descontinuidades, ele poderá operar com segurança durante certo período de tempo.

O API-579 pode ser utilizado para a avaliação de adequação-ao-uso e/ou estabelecimento de novas condições de operação para equipamentos projetados e construídos conforme os seguintes códigos:

- ASME B& PV code, Section VIII, Division 1.
- ASME B and PV code, Section VIII, Division 2
- ASME B and PV code, Section I
- ASME B31.3 Piping code
- ASME B31.1 Piping code
- API 650
- API 620.

Além das normas acima, o API-579 também fornece orientações para sua aplicação a equipamentos sob pressão construídos por outros códigos.

O API-579 está organizado em treze seções e vários Anexos. A **Seção 1** do documento trata de: introdução e escopo; responsabilidades do proprietário-usuário, inspetor e engenheiro; requisitos de qualificação do usuário, inspetor e engenheiro; e referências a outros códigos/normas.

Na **Seção 2**, o API-579 descreve, em linhas gerais, a metodologia que é comum a todos os procedimentos de avaliação, conforme resumido na Tabela 3.1 abaixo. Esta mesma organização é utilizada em todas as seções que contém procedimentos de avaliação FFS.

**Tabela 3.1 - Organização de cada seção do API-579**

<b>Sub-Seção</b>	<b>Título da Sub-Seção</b>
x.1	Geral
x.2	Aplicabilidade e limitações dos procedimentos de avaliação
x.3	Dados requeridos para a avaliação
x.4	Técnicas de avaliação e critérios de aceitação
x.5	Cálculo de vida remanescente
x.6	Remediação
x.7	Monitoramento em serviço
x.8	Documentação
x.9	Nomenclatura
x.10	Referências
x.11	Tabelas e figuras

Da **Seção 3** até a **Seção 13** encontram-se os procedimentos de avaliação FFS organizados por mecanismo de dano conforme resumido na Tabela 3.2. O API-579 contém ainda uma série de Anexos com informações técnicas que são requeridas em todas as seções da norma que contém procedimentos de avaliação FFS. Um resumo dos Anexos pode ser visto na Tabela 3.3.

**Tabela 3.2 - Resumo das seções com procedimentos de avaliação**

Seção	Descontinuidade ou mecanismo de dano
3	Fratura frágil
4	Perda de metal generalizada
5	Perda de metal localizada
6	Corrosão por pite
7	Danos por hidrogênio
8	Desalinhamento de solda e deformações de casco/tampo
9	Descontinuidade tipo trinca
10	Operação em regime de fluência
11	Danos por fogo
12	Amassamentos, cavidades ou combinação de ambas
13	Defeitos de laminação

**Tabela 3.3 - Resumo dos Anexos do API-579.**

Anexo	Título
A	Equações para cálculo de espessura requerida, tensão e PMTA
B1	Visão geral sobre análise de tensões
B2	Recomendações para linearização de tensões e para classificação das tensões de
B3	Desenvolvimento do histograma e contagem de ciclo para a análise da fadiga
B4	Fatores de ajuste plástico alternativos e tensões alternadas efetivas para análise de fadiga elástica
C	Compêndio de soluções para fatores de intensidade de tensões
D	Compêndio de soluções para tensões de referência para trincas
E	Cálculo de tensões residuais
F	Propriedades dos materiais
G	Mecanismos de danos
H	Base técnica e validação
I	Glossário de termos e definições
J	Anexo não utilizado
K	Áreas de abertura de trinca

Para cada procedimento (Seção 3 a 13) o API-579 fornece três níveis de avaliação que, basicamente, diferem entre si pelo conservadorismo, quantidade de dados requeridos e complexidade da avaliação. As avaliações **nível 1** são mais conservativas e podem ser

desenvolvidas com uma quantidade mínima de informações a cerca do equipamento e seu histórico de inspeção. As avaliações **nível 2** exigem procedimentos de cálculo mais detalhados e produzem resultados menos conservativos que as de nível 1. Já as avaliações pelo **nível 3** são as mais detalhadas e produzem resultados menos conservativos que as anteriores. Neste nível os procedimentos requerem informações (sobre o equipamento e sua inspeção) com maiores detalhes e é recomendado que a análise de tensões seja feita por técnicas numéricas como FEA (análise por elementos finitos).

### **3.3.1 Procedimentos para avaliação de trincas, Seção 9 do API-579.**

A seção 9 do API-579 apresenta um procedimento para avaliação de trincas e outros tipos de descontinuidades planares. Esta avaliação está baseada no **diagrama de análise de falhas** (do inglês, failure assessment diagram - FAD) ilustrado na Figura 3.9.

A metodologia do diagrama FAD procura estabelecer uma “medida” de aceitabilidade para um equipamento ou componente apresentando trincas, onde a falha pudesse ocorrer, ou por instabilidade da trinca, ou por colapso plástico na região da trinca devido à transposição de certo limite de carregamento. A falha por instabilidade da trinca usualmente ocorre em equipamentos fabricados de materiais de baixa tenacidade, mesmo apresentando pequenas descontinuidades; enquanto a falha por colapso plástico normalmente ocorre devido a grandes descontinuidades em equipamentos fabricados com materiais de boa tenacidade.

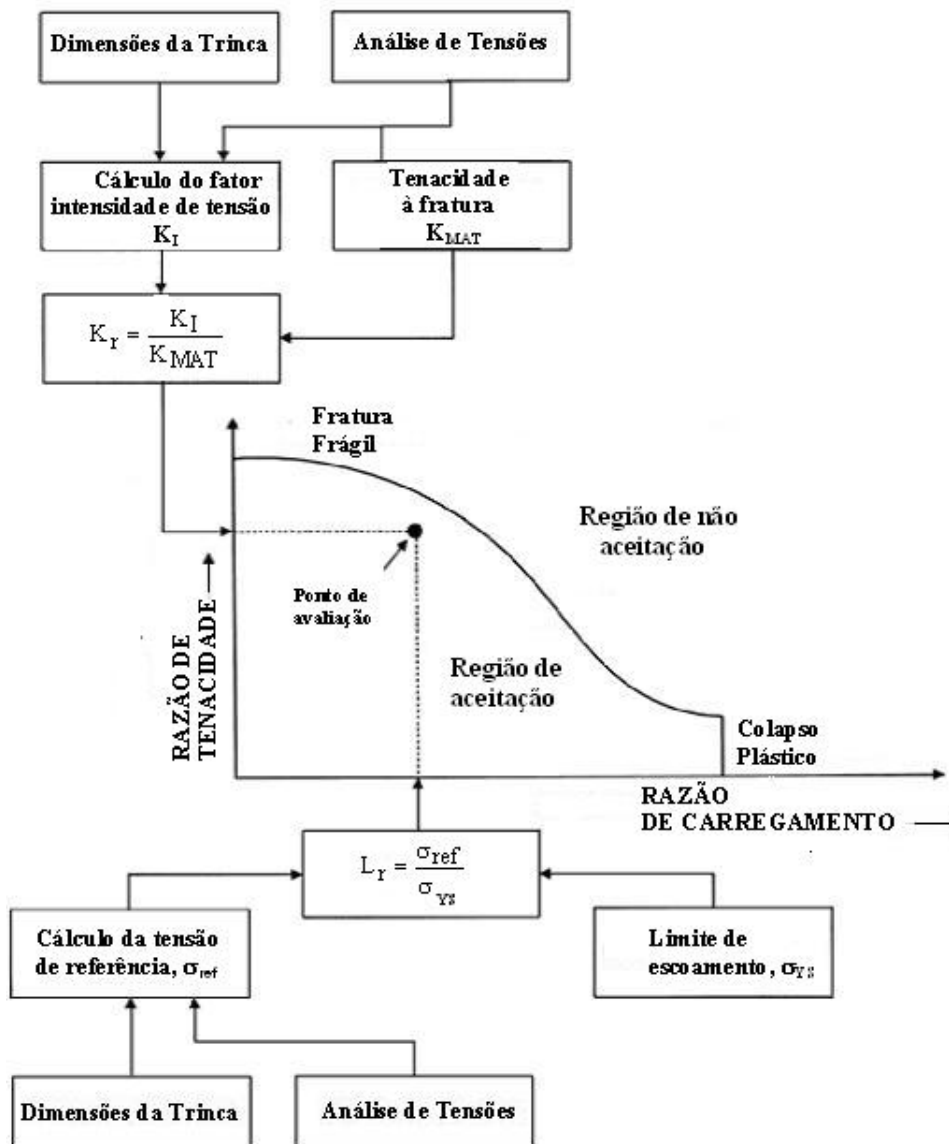


Figura 3.9 – FAD

Na análise FFS de um equipamento que apresenta uma ou mais trincas com dimensões e orientações determinadas, usa-se os resultados de uma análise de tensões na região da trinca, os resultados de cálculo do fator intensidade de tensões e limite de carregamento, a resistência do material e sua tenacidade à fratura para se calcular a **razão de tenacidade,  $K_r$** , e a **razão de carregamento,  $L_r$** . Com  $K_r$  e  $L_r$  representando as coordenadas cartesianas de um ponto, plota-se este ponto no diagrama FAD. Se o ponto situar-se sobre, ou abaixo da curva do diagrama FAD (região de aceitação) então o equipamento é considerado apto a continuar em serviço por tempo determinado e sob as mesmas condições operacionais utilizadas na avaliação.

A razão de tenacidade, ou o valor da ordenada no FAD é calculado pela seguinte equação:

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{mat}}$$

Onde:

$K_I^P$  : é o fator intensidade de tensões devido às cargas primárias;

$K_I^{SR}$  : é o fator intensidade de tensões devido às tensões secundárias e residuais;

$K_{mat}$  : é a tenacidade a fratura do material;

$\Phi$  : é o fator de interação plástica;

A razão de carregamento, ou o valor da abscissa no FAD, é calculada pela seguinte equação:

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}}$$

Onde:

$\sigma_{ref}^P$  : é uma tensão de referência calculada;

$\sigma_{ys}$  : é o valor da tensão de escoamento do material;

O procedimento de avaliação nível 1 da Seção 9 do API-579 consiste no uso de uma série de figuras cujas curvas definem um comprimento de descontinuidade admissível para uma dada situação em avaliação, e assim se estabelece o critério de aceitação. É uma metodologia simplificada e limitada à geometria, carregamentos e materiais. O nível 1 do API-579 é completamente diferente do nível 1 da BS-7910 para avaliação de trincas, e ambos, praticamente, não requerem cálculos.

O nível 2 utiliza **fatores de segurança parciais** (PSFs) aplicados a tenacidade, tamanho da descontinuidade e sobre as tensões aplicadas, através dos quais o analista pode estimar certa confiabilidade e executar uma análise determinística. Os PSFs são utilizados para se levar em conta a variabilidade dos parâmetros de entrada na avaliação. Se, após o ajuste dos parâmetros de entrada pelos PSFs, o ponto situar-se sobre ou abaixo da curva FAD, pode-se concluir que a real probabilidade de falha é menor que aquela estimada com o uso dos PSF's.



O nível 3 exige uma análise mais avançada e não será abordado neste trabalho.

### **3.3.1.1 Procedimento Nível 1 pelo API-579**

Na seqüência é apresentado um passo-a-passo para aplicação do procedimento para avaliação de trincas nível 1. Este passo-a-passo é apenas um resumo de parte do conteúdo da Seção 9 do API-579 e maiores informações deverão ser consultadas naquele documento.

#### **PASSO 1 — Determinar os carregamentos e temperaturas.**

Determinar os carregamentos e temperaturas a serem utilizadas na avaliação, baseando-se nas condições de projeto e operação.

#### **PASSO 2 — Determinar o comprimento, $2c$ , e a profundidade, $a$ , da trinca.**

O parágrafo 9.3.6, da Seção 9 da API-579 descreve a metodologia para a caracterização de trinca.

#### **PASSO 3 — Selecionar figura do API-579 para definição da aceitabilidade.**

A partir das Figuras 9.12 a 9.18, Seção 9 do API-579, determinar qual delas deverá ser utilizada na avaliação baseado na geometria do componente e na orientação da trinca em relação à junta soldada. As figuras são assim classificadas:

1. Figura 9.12 - Chapa plana com trinca paralela a junta soldada;
2. Figura 9.13 – Cilindro com trinca paralela a junta longitudinal;
3. Figura 9.14 – Cilindro com trinca perpendicular a junta longitudinal;
4. Figura 9.15 – Cilindro com trinca paralela a junta circunferencial;
5. Figura 9.16 – Cilindro com trinca perpendicular a junta circunferencial;
6. Figura 9.17 – Esfera com trinca paralela a junta circunferencial;
7. Figura 9.18 – Esfera com trinca perpendicular a junta circunferencial;

#### **PASSO 4 — Determinar a curva apropriada na figura selecionada.**

Determinar a curva a ser utilizada na avaliação a partir da figura selecionada no PASSO 3. Sendo  $t$  a espessura do componente e  $a$  a profundidade da trinca, selecionar a curva conforme as orientações seguintes:

1) Para cada figura, dois conjuntos de curvas,  $\frac{1}{4}.t$  e  $1.t$  de profundidade de trinca, são fornecidas para três condições: metal base, metal de solda com TTAT, e metal de solda sem TTAT.

2) Se a profundidade da trinca puder ser determinada de forma acurada, utilizando-se procedimentos qualificados de END, então as curvas  $\frac{1}{4}.t$  poderão ser utilizadas na avaliação conforme critério 3 abaixo; em qualquer outra situação, as curvas  $1.t$  deverão ser utilizadas, para todas as espessuras, até o limite superior de 38,0 mm.

3) A seleção da curva está baseada nos seguintes critérios:

i) Se  $t \leq 25,4$  mm, as curvas  $\frac{1}{4}.t$  são aplicáveis para  $a \leq t/4$ ;

ii) Se,  $25,4 \text{ mm} < t \leq 38,0$  mm, as curvas  $\frac{1}{4}.t$  são aplicáveis para  $a \leq 6,3$  mm;

4) Se a descontinuidade estiver localizada na solda, ou a uma distância de duas vezes a espessura nominal da chapa medida a partir da linha de centro da solda, então as curvas para o MS deverão ser utilizadas; caso contrário, utilizar as curvas para o MB. Para descontinuidades localizadas nas soldas, a curva aplicável na avaliação está baseada no TTAT do componente. Se houver alguma dúvida sobre o tipo e/ou a qualidade do TTAT, a curva C (isto é, sem TTAT) deverá ser utilizada.

#### **PASSO 5 — Determinar a temperatura de referência.**

Baseado na especificação do material, determinar:

1) A *curva de dispensa do teste de impacto do material* a partir da Seção 3, Tabela 3.2 do API-579;

2) A tensão de escoamento mínima do material à temperatura ambiente baseada no código de construção original do equipamento;

Com as informações acima, a partir da Seção 9, Tabela 9.2 do API-579, determinar a temperatura referência.

#### **PASSO 6 — Determinar o comprimento (2c) máximo admissível.**

Na figura estabelecida no PASSO 3, entrar com a temperatura de avaliação e a temperatura de referência determinadas nos PASSO 1 e 5, respectivamente, e determinar o comprimento de trinca (2c) máximo admissível utilizando a curva de avaliação apropriada.

### **PASSO 7— Avaliar os resultados.**

Se o tamanho admissível da descontinuidade, determinada no PASSO 6, for maior ou igual ao comprimento determinado no PASSO 2, então é aceitável que o componente continue em operação por tempo determinado.

Se o componente não atende os requisitos da avaliação Nível 1, então as seguintes ações, ou combinação delas, devem ser avaliadas:

- a) Os dados utilizados na análise devem ser refinados e a avaliação Nível 1 deve ser repetida, isto é, refinamento dos dados com a realização de END's adicionais para melhor caracterizar as dimensões da descontinuidade, e uma determinação mais apurada das condições futuras de operação.
- b) Reavaliação (por ex: temperatura), reparo ou substituição do componente.
- c) Realização pelos Níveis 2 ou 3.

#### **3.3.1.2 Procedimento Nível 2 pelo API-579.**

Diferentemente do nível 1, neste procedimento, fatores de segurança parciais (PSF's) podem ser aplicados as variáveis independentes (dimensão da descontinuidade, tenacidade a fratura do material e tensões aplicadas) para se levar em conta alguma incerteza nesses parâmetros de entrada.

Na seqüência apresentamos passo-a-passo a aplicação do procedimento para avaliação de trincas nível 2. Este passo-a-passo é apenas um resumo de parte do conteúdo da Seção 9 do API-579 e maiores informações deverão ser consultadas naquele documento.

#### **PASSO 1 — Determinar os carregamentos e temperaturas.**

Avaliar as condições de operação e determinar: pressão, temperatura e carregamentos combinados adicionais para serem utilizados na avaliação.

Além da pressão causada pelo fluido, carregamentos adicionais, se estiverem presentes e forem significativos, devem ser considerados na avaliação. A tabela A.1 do anexo A do API-579 contém um resumo de carregamentos adicionais em que um equipamento pode estar submetido.

#### **PASSO 2 — Determinar a distribuição de tensões.**

Determinar a distribuição de tensões no local da descontinuidade devido aos carregamentos determinados no PASSO 1 e classificar as tensões resultantes dentro das seguintes categorias:

- 1) Tensões primárias;
- 2) Tensões secundárias;
- 3) Tensões residuais;

O anexo B1 do API-579 contém métodos analíticos para análise de tensões em componentes que apresentam descontinuidades.

### **PASSO 3 — Determinar as propriedades do material.**

Determinar a tensão de escoamento, ruptura e tenacidade à fratura ( $K_{mat}$ ) do material para as condições determinadas no PASSO 1. As tensões de escoamento e ruptura são estabelecidas usando-se valores reais ou nominais, definidos como valores mínimos especificados para o material. A tenacidade à fratura é estabelecida com base nos valores reais, valores médios, ou uma estimativa pela metodologia “lower-bound”.

O anexo F do API-579 contém informações sobre as propriedades dos materiais utilizadas nas avaliações FFS. O parágrafo F.4.4 do anexo F fornece uma metodologia conservativa (“lower bound”) para estimar a tenacidade à fratura do material. A determinação da tenacidade por essa metodologia requer o conhecimento da temperatura de referência do material que pode ser obtida da Tabela 9.2 API-579.

### **PASSO 4— Determinar as dimensões da trinca.**

Determinar as dimensões da trinca a partir de dados de inspeção. A descontinuidade deverá ser caracterizada conforme parágrafo 9.3.6, Seção 9 do API-579.

### **PASSO 5 — Aplicar os Fatores Parciais de Segurança (PSF’s).**

Modificar as tensões primárias, a tenacidade à fratura do material, e as dimensões da descontinuidade aplicando os fatores de segurança parciais (PSF’s). Se for conhecido que os parâmetros de entrada (tensão, tenacidade e dimensões da trinca) são estimativas conservativas (isto é, “upper-bound” de tensão, “lower-bound” de tenacidade, ou “upper-bound” das dimensões da descontinuidade), então um PSF igual a 1,0 poderá ser utilizado na avaliação.

1) *Tensões de membrana e flexão primárias* — Modificar as tensões de membrana e flexão primárias do componente determinadas no PASSO 2 ( $P_m$  e  $P_b$ , respectivamente) usando o PSF para as tensões.

$$P_m = P_m.PSF_s$$

$$P_b = P_b.PSF_s$$

2) *Tenacidade do Material* — Modificar o valor médio da tenacidade a fratura do material determinada no PASSO 3 ( $K_{mat}$ ) usando o PSF para tenacidade a fratura.

$$K_{mat} = \frac{K_{mat}}{PSF_k}$$

3) *Dimensões da descontinuidade* — Modificar as dimensões da descontinuidade determinadas no PASSO 4 como mostrado abaixo usando o PSF para o tamanho da descontinuidade. Se a profundidade da descontinuidade modificada exceder a espessura do componente, então a descontinuidade deverá ser recategorizada como uma descontinuidade passante.

$$a = a.PSF_a \quad \text{p/ uma descontinuidade superficial}$$

$$2a = 2a.PSF_a \quad \text{p/ uma descontinuidade interna}$$

$$2c = 2c.PSF_a \quad \text{p/ uma descontinuidade interna}$$

A Tabela 9.3 da Seção 9 do API-579 permite a escolha dos PSF's apropriados.

**PASSO 6 — Calcular a tensão de referência,  $\sigma_{ref}^P$ .**

Calcular a tensão de referência para as tensões primárias,  $\sigma_{ref}^P$ , baseado nas tensões e dimensões da descontinuidade modificadas no PASSO 5 e nas soluções para tensão de referência do Anexo D do API-579. A Tabela D.1 do Anexo D fornece um sumário de soluções para cálculo da tensão de referência.

**PASSO 7 — Calcular a razão de carregamento.**

Calcular o valor da abscissa do diagrama FAD usando a tensão de referência calculada no PASSO 6 e a tensão de escoamento a partir do PASSO 3.

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}}$$

**PASSO 8 — Calcular a intensidade de tensão,  $K_I^P$ .**

Calcular a intensidade de tensão atribuída as cargas primárias,  $K_I^P$ , utilizando-se as tensões primárias e a dimensão,  $a$ , da descontinuidade modificada no PASSO 5; utilizar também as soluções para o fator de intensidade de tensão apresentadas no Anexo C do API-579.

A Tabela C.1 do Anexo C fornece um sumário de soluções para cálculo da intensidade de tensão.

Se  $K_I^P < 0,0$  então fazer  $K_I^P = 0,0$ .

**PASSO 9 — Calcular a tensão de referência,  $\sigma_{ref}^{SR}$ .**

Calcular a tensão de referência para as tensões secundárias e residuais,  $\sigma_{ref}^{SR}$ , baseadas nas tensões secundárias e residuais vistas no PASSO 2, nas dimensões da descontinuidade vista no PASSO 5, e nas soluções para cálculo da tensão de referência apresentadas no ANEXO D do API-579.

**PASSO 10 — Calcular a intensidade de tensões,  $K_I^{SR}$ .**

Calcular a intensidade de tensões atribuídas as tensões secundárias e residuais,  $K_I^{SR}$ , utilizando as tensões secundárias e residuais vistas no PASSO 2, as dimensões da descontinuidade vistas no PASSO 5, e as soluções para o fator de intensidade de tensão do ANEXO C do API-579. Se  $K_I^{SR} < 0,0$ , então fazer  $K_I^{SR} = 0,0$ . O valor de  $K_I^{SR}$  deve ser determinado no mesmo local da trinca utilizado para determinar  $K_I^P$ .

**PASSO 11 — Calcular o fator de interação plástica.**

Calcular  $\Phi$  utilizando o seguinte procedimento:

- 1) **PASSO 11.1** — Se  $K_I^{SR} = 0,0$ , então fazer  $\Phi = 1,0$  e ir para o PASSO 12. Caso contrário, calcular  $L_r^{SR}$  utilizando a seguinte equação com  $\sigma_{ref}^{SR}$  determinado no PASSO 9 e  $\sigma_{ys}$  do PASSO 3.

$$L_r^{SR} = \frac{\sigma_{ref}^{SR}}{\sigma_{ys}}$$

2) **PASSO 11.2** — Determinar  $\psi$  e  $\phi$  utilizando as Tabelas 9.4 a 9.7, Seção 9 do API-579 e calcular  $\Phi/\Phi_0$  utilizando a equação abaixo. O parâmetro  $L_r^p$  utilizado para encontrar  $\psi$  e  $\phi$  foi determinado no PASSO 7. Alternativamente,  $\Phi/\Phi_0$  pode ser determinado a partir da Figura 9.19, Seção 9 do API-579.

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 1 + \frac{\psi}{\phi}$$

3) **PASSO 11.3** — Calcular o fator de interação plástica,  $\Phi$  :

i) Se  $0 < L_r^{SR} \leq 4,0$ , então fazer  $\Phi_0 = 1,0$  e

$$\Phi = 1 + \frac{\psi}{\phi}$$

ii) Se  $L_r^{SR} > 4,0$  então calcular o fator de intensidade de tensões para as tensões secundárias e residuais corrigida para os efeitos da plasticidade,  $K_{Ip}^{SR}$ , e calcular  $\Phi$  e  $\Phi_0$  utilizando as equações abaixo:

$$\Phi_0 = \frac{K_{Ip}^{SR}}{K_I^{SR}}$$

$$\Phi = \Phi_0 \left( 1 + \frac{\psi}{\phi} \right)$$

O método mais preciso para calcular  $K_{Ip}^{SR}$  é desenvolver uma análise elasto-plástica por elementos finitos do componente trincado, com condições de contorno que modelem as tensões secundárias e residuais e todas as tensões primárias nulas. Orientação para o desenvolvimento desta análise é apresentada no ANEXO B1 do API-579. Baseado nos resultados da análise elasto-plástica, avaliar o valor da integral J e calcular  $K_{Ip}^{SR}$  a partir da seguinte equação (ver ANEXO F, parágrafo F.4.2.1.a do API-579).

$$K_{Ip}^{SR} = \sqrt{\frac{J^{SR} E}{1 - \nu^2}}$$

O seguinte método simplificado pode ser utilizado para calcular  $\Phi_0$ ; contudo, este método pode produzir resultados conservativos:

$$\Phi_0 = \left( \frac{a_{eff}}{a} \right)^{0,5}$$

com,

$$a_{eff} = a + \left( \frac{1}{2\pi\tau} \right) \left( \frac{K_I^{SR}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

Onde:

$a$ : profundidade da trinca;

$a_{eff}$ : profundidade efetiva da trinca;

$\tau$  : fator igual a 1,0 para estado plano de tensões e 3,0 para estado plano de deformações;

$\sigma_{ys}$  : tensão de escoamento do material na temperatura de avaliação;

**PASSO 12**— Calcular a razão de tenacidade,  $K_r$ .

Calcular  $K_r$ , o valor da ordenada do FAD, pela seguinte equação:

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{mat}}$$

Onde,  $K_I^P$  é a intensidade de tensão aplicada devido as tensões primárias conforme PASSO 8,  $K_I^{SR}$  é a intensidade de tensão aplicada devido as tensões secundárias e residuais conforme PASSO 10,  $K_{mat}$ , é a tenacidade do material modificada conforme PASSO 5, e  $\Phi$  é o fator de interação plástica conforme PASSO 11.

**PASSO 13**— **Avaliar os resultados.**

O ponto de avaliação sobre o diagrama FAD é definido pelo par ordenado ( $L_r^P$ ,  $K_r$ ):

1) **PASSO 13.1** — Determinar o valor de corte (do inglês, “cut-off”) para o eixo  $L_r^P$  do FAD (ver Figura 3.10).

2) **PASSO 13.2** — Plotar o ponto sobre o diagrama FAD conforme mostrado na Figura 3.10:



Se o ponto de avaliação situar-se sobre ou abaixo da curva do FAD (região de aceitação), então o componente é aceitável pelo procedimento de avaliação NÍVEL 2. Se o ponto estiver fora do FAD (acima e/ou a direita da curva), então o componente é inaceitável pelo procedimento. Notar que o valor de  $K_I^P$  e  $K_I^{SR}$  irão variar ao longo da fronteira da trinca; então, a avaliação pode ser repetida para outros pontos ao longo da frente da trinca para garantir que o local crítico foi encontrado.

Se o componente não atende os requisitos do nível 2, então as seguintes considerações devem ser avaliadas:

- Os dados utilizados na análise podem ser refinados e o nível 2 poderá ser repetido;
- Realizar análise pelo nível 3;
- Reparo da trinca ou substituição do componente com o defeito;

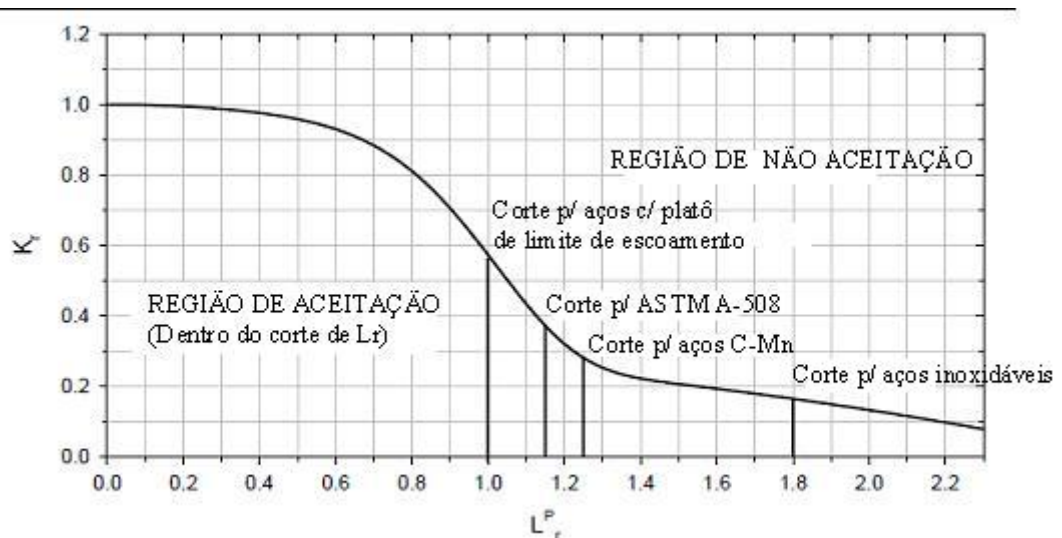


Figura 3.10 – FAD generalizado.

**Notas:**

1. A curva do FAD é definida pela seguinte equação:

$$K_r = (1 - 0,14(L_r^p)^2) (0,3 + 0,7 \exp[-0,65(L_r^p)^6]) \quad p / L_r^p \leq L_{r(max)}^p$$

2. A extensão da curva do FAD sobre o eixo  $L_r^p$  é definida como segue:

- a)  $L_{r(máx)}^P = 1,0$  para materiais com limite de escoamento definido; com platô de escoamento (expoente de encruamento  $> 15$ );
- b)  $L_{r(máx)}^P = 1,25$  para ASTM A-508;
- c)  $L_{r(máx)}^P = 1,25$  para aços C-Mn;
- d)  $L_{r(máx)}^P = 1,80$  para aços inoxidáveis austeníticos;
- e)  $L_{r(máx)}^P = \sigma_f / \sigma_{ys}$ , para outros materiais, onde:  $\sigma_f$  é “flow stress” (ver Anexo F do API-579) e  $\sigma_{ys}$  o limite de escoamento, ambas as tensões determinadas na temperatura de avaliação;
- f)  $L_{r(máx)}^P = 1,0$  se as características de encruamento do material forem desconhecidas;
3. O valor de  $L_{r(máx)}^P$  poder aumentado para componentes redundantes (ver Anexo D, parágrafo D.2.5.2.b do API-579);
4.  $L_{r(máx)}^P = 1,0$ , então a curva do FAD pode ser definida utilizando-se a seguinte equação:
- $$K_r = \left(1 - (L_r^P)^{2,5}\right)^{0,2}.$$

### **3.4 Visão geral do documento BS-7910.**

Ao contrário do API-579, a BS-7910 destina-se a avaliação de equipamentos construídos a partir de diferentes códigos e materiais, fornecendo metodologias para avaliação de descontinuidades para todos os tipos de estruturas e componentes. O BS-7910 compreende 10 seções e 21 anexos conforme Tabela 3.4:

**Tabela 3.4 – Seções do documento BS-7910**

<b>Seções</b>	<b>Descrição</b>
1	Escopo
2	Referências normativas
3	Símbolos e definições
4	Tipo de descontinuidade
5	Modos de falha e mecanismos de danos
6	Informações requeridas para avaliação
7	Avaliação de resistência à fratura
8	Avaliação de fadiga
9	Avaliação de descontinuidades sob a condição de fluência
10	Avaliação de outros modos de falha
<b>Anexos</b>	<b>Descrição</b>
A	Avaliação em condição de tensões normal e de cisalhamento combinadas ou modos de carregamento I, II e III combinados
B	Procedimentos de avaliação em juntas soldadas em estruturas tubulares offshore
C	Procedimentos para avaliação de fratura para vasos de pressão e dutos
D	Tensões devido ao desalinhamento
E	Re-categorização de descontinuidades
F	Um procedimento para avaliação “leak-before-break”
G	Avaliação de corrosão em dutos e vasos de pressão
H	Registro das avaliações de fratura, fadiga e fluência
I	A significância de soldas de resistências dissimilares sobre a tenacidade a fratura de juntas soldadas
J	Uso do teste de impacto Charpy-V para estimar a tenacidade a fratura
K	Confiabilidade, fatores de segurança parciais, n° de ensaios e fatores de reserva
L	Determinação da tenacidade à fratura para soldas
M	Soluções para fatores de intensidade de tensão
N	Procedimentos simplificados para definição de critérios de aceitação para descontinuidades conhecidas ou para estimativa do tamanho aceitável da descontinuidade pelo nível 1
O	Considerações sobre teste de pressão e “warm prestressing”
P	Cálculo da tensão de referência
Q	Distribuições de tensão residual em juntas soldadas

R	Determinação dos efeitos da interação de plasticidade para tensões primária e secundária combinadas
S	Métodos de integração numérica para estimativa de vida a fadiga
T	Informações para avaliação de propagação de trincas a alta temperatura
U	Exemplo para demonstração do procedimento de avaliação de falha a alta temperatura

As seções 7 a 10 contêm os procedimentos de avaliação por tipo de defeito ou mecanismo de dano. Os anexos contêm procedimentos normativos e informativos, dados atualizados, que são utilizados nos procedimentos de avaliação das seções 7 a 10.

Da mesma forma que o API-579, o BS-7910 fornece 3 níveis de avaliação de trincas baseados nos conceitos do diagrama de análise de falhas-FAD. São eles:

- Nível 1 é um procedimento de avaliação preliminar que poder ser realizado de forma rápida e segura, contudo, este é o mais conservativo. O nível 1 está subdividido em 1A, que utiliza um diagrama FAD genérico e 1B, que define a criticidade de uma descontinuidade sem o uso do FAD;
- Nível 2 também está subdividido em 2A, que utiliza um FAD genérico e 2B, que utiliza um FAD específico para cada material.
- Nível 3 também está subdividido em 3A e 3B que utilizam respectivamente os mesmos FAD's dos níveis 2A e 2B. A diferença para o nível 2 é que este nível incorpora o efeito de cisalhamento dúctil que tende a aumentar a resistência a fratura de materiais dúcteis a medida que a descontinuidade se propaga. Este nível de avaliação não será abordado neste trabalho.

**Os tipos de descontinuidades que podem ser avaliadas por estes documentos são:**

- Descontinuidades planares;
- Descontinuidades volumétricas;
- Imperfeições de forma;

**Os modos de falha considerados são:**

- Falha por fratura e colapso plástico (Seção 7)
- Danos por fadiga (Seção 8);
- Danos por fluência e fluência-fadiga (Seção 9);
- Danos por vazamento de contaminantes (Seção 10.2);
- Danos por erosão/corrosão (Seção 10.3.2);
- Danos por trincamento assistido pelo meio (Seção 10.3.3);
- Falha por instabilidade (Seção 10.4);

**Dados essenciais para a avaliação**

Os dados relevantes que podem ser requeridos na avaliação estão listados abaixo:

- a) Natureza, posição e orientação da descontinuidade;
- b) Geometria da estrutura, da solda e o procedimento de fabricação;
- c) Tensões (devido à pressão do fluido, tensões térmicas, residuais), temperaturas e transientes;
- d) Propriedades mecânicas do material;
- e) Dados de fadiga, corrosão-fadiga e dados sobre a propagação de trinca;
- f) Dados de tenacidade à fratura do material;
- g) Dados sobre fluência;
- h) Dados sobre corrosão-sob-tensão;

**Informações requeridas dos ensaios não destrutivos - END**

- a) Comprimento da descontinuidade;
- b) Profundidade da descontinuidade;
- c) Posição da descontinuidade;
- d) Orientação da descontinuidade em relação às tensões principais;
- e) Se a descontinuidade for planar ou volumétrica;

### **3.4.1 Procedimento Nível 1 pela BS-7910**

Abaixo é apresentado um passo-a-passo para aplicação do procedimento para avaliação de trincas nível 1. Este passo-a-passo é apenas um resumo de parte do conteúdo da Seção 7 da BS-7910 e maiores informações deverão ser consultadas naquele documento.

#### **PASSO 1 – Definir as tensões atuantes**

Determinar a distribuição de tensões no local da trinca devido aos carregamentos e classificar as tensões resultantes dentro das seguintes categorias:

- 1) Tensões primárias;
- 2) Tensões secundárias;
- 3) Tensões residuais;

A distribuição de tensão é determinada supondo a estrutura sem a presença de trinca. A distribuição de tensão real poderá ser utilizada na avaliação, contudo, a linearização da dessa distribuição torna-se mais conveniente para a avaliação. Ver Figura 1 na Seção 6 da BS-7910 para mais detalhes sobre linearização de tensões.

#### **PASSO 2 – Determinar ou estimar a tenacidade à fratura do material**

A tenacidade a fratura,  $K_{mat}$  ou  $\delta_{mat}$ , poderá ser determinada a partir de ensaios conforme exigências constantes no parágrafo 7.1.5 da BS-7910 ou conforme o Anexo L da mesma para a determinação da tenacidade à fratura para soldas.

Caso a medida da tenacidade a partir de ensaios não seja uma possibilidade, então pode-se estimar  $K_{mat}$  a partir de dados do teste de impacto Charpy-V conforme o Anexo J da BS-7910:2005.

#### **PASSO 3 – Determinar as propriedades do ensaio de tração do material**

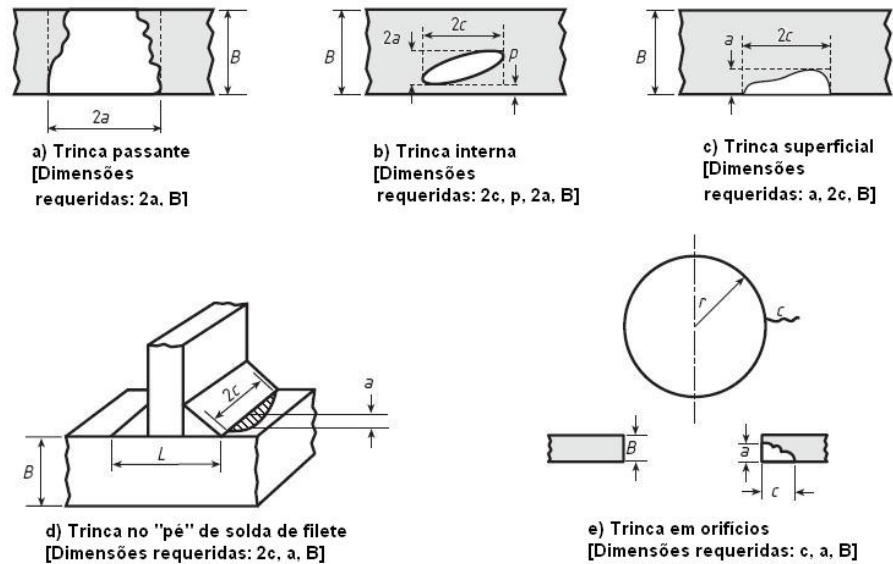
As propriedades mecânicas do material requerida na avaliação são:

- $\sigma_Y$ : tensão limite de escoamento mínima;
- $\sigma_u$ : tensão limite de resistência;
- E: módulo de elasticidade;

#### **PASSO 4 – Caracterização da trinca**

Uma trinca deve ser caracterizada por um comprimento e uma altura (ou profundidade no caso de trincas superficiais) que são as medidas dos lados de um retângulo imaginário que

envolve completamente a trinca. A depender da posição da trinca, suas dimensões são caracterizadas conforme a Figura 3.11:



**Figura 3.11 - Caracterização das trincas.**<sup>4</sup>

Quando várias trincas estão presentes em uma mesma seção transversal, a possibilidade de interação entre as mesmas pode causar, contra a integridade estrutural, efeitos mais severos que a soma dos efeitos causados por cada uma em separado. A Figura 9 na Seção 7 da BS-7910:2005 estabelece os critérios de interação de trincas e suas dimensões efetivas após interação quando múltiplas trincas estão presentes em uma mesma seção do material.

#### **PASSO 5 – Escolher a metodologia de avaliação**

Dentro do nível 1 da BS-7910, escolher entre os níveis 1A e 1B para avaliação da trinca. Se o nível 1A for o escolhido, então continuar a sequência de passos abaixo. Se for escolhido o nível 1B, que trata de um procedimento simplificado sem o uso do FAD e que define uma dimensão limite para a trinca, então utilizar o Anexo N da BS-7910:2005.

#### **PASSO 6 - Cálculo da tensão máxima**

Calcular a máxima tensão trativa,  $\sigma_{\text{máx}}$ , que é dada como a soma das componentes das tensões. Se somente a tensão nominal de membrana,  $S_{\text{nom}}$ , for conhecida, então:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = k_t S_{nom} + (k_m - 1) S_{nom} + Q$$

Se as componentes de tens\~ao de membrana e flex\~ao s\~ao conhecidas:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = k_{tm} P_m + k_{tb} [P_b + (k_m - 1) P_m] + Q$$

Onde:

$k_{tm}$  : concentra\~ao de tens\~ao devido as tens\~oes de membrana.

$k_{tb}$  : concentra\~ao de tens\~ao devido as tens\~oes de flex\~ao.

$k_m$  : fator de concentra\~ao de tens\~ao devido ao desalinhamento.

$P_m$  : componente de membrana da tens\~ao prim\~aria.

$P_b$  : componente de flex\~ao da tens\~ao prim\~aria.

$Q$  : tens\~ao secund\~aria (membrana+flex\~ao)

Para  $k_{tm}$ ,  $k_{tb}$  e  $k_m$  ver Anexo D da BS-7910:2005.

As varia\~oes das componentes das tens\~oes na se\~cao transversal n\~ao s\~ao levadas em considera\~ao levando a uma estimativa conservativa para a tens\~ao total aplicada.

## **PASSO 7 - C\~alculo das tens\~oes residuais**

### **a) Para estruturas soldadas sem TTAT:**

- **Para trincas situadas num plano transversal a solda:** a tens\~ao residual uniforme \acute{e determinada pela seguinte equa\~ao:

$$Q_m = \sigma'_Y$$

onde,

$\sigma'_Y$  : \acute{e} a tens\~ao de escoamento do material na temperatura ambiente onde a trinca estiver localizada.

- **Para trinca situada num plano paralelo a solda:** a tens\~ao residual dever\~a ser igual ao valor da tens\~ao de escoamento a temperatura ambiente da solda ou do metal base, o que for menor.



## b) Para estruturas soldadas submetidas a TTAT

Se o valor da tensão residual não for conhecido, então pode-se estimar, para aços ao manganês e aços baixa liga tratados termicamente em forno na faixa de temperatura entre 580 °C a 620 °C, como sendo:

- **Tensão paralela a solda:**

$$Q_m = 0,3 \cdot \sigma'_Y$$

onde,

$\sigma'_Y$ : é a tensão de escoamento do material na temperatura ambiente onde a trinca estiver localizada.

- **Tensão transversal a solda:** a tensão residual ( $Q_m$ ) deverá ser assumida como sendo igual a 20 % da tensão de escoamento da solda ou do metal base, o que for menor.

TTAT's localizados e não controlados podem induzir altos níveis de tensão residual na estrutura; neste caso deve-se assumir valores de tensão residual na condição de “como soldado” (isto é, sem TTAT).

Teste de pressão ou outra forma de carregamento mecânico podem reduzir os níveis de tensão residual da estrutura (ver Anexo O da BS-7910).

### PASSO 8 – Calcular $K_I$

Calcular o fator de intensidade de tensão aplicado,  $K_I$ , com o uso da seguinte fórmula:

$$K_I = (Y\sigma) \sqrt{(\pi a)}$$

Onde:

$$Y\sigma = M f_w M_m \sigma_{m\acute{a}x}$$

onde:

M: fator de correção para curvatura (“bulging factor”).

$f_w$ : fator de correção para largura finita do componente.

$M_m$ : fator geométrico para as tensões de membrana.

$\sigma_{m\acute{a}x}$ : tensão de tração atuante máxima (PASSO 7).

Os fatores  $M$ ,  $f_w$  e  $M_m$  são obtidos a partir do Anexo M da BS-7910:2005, em função da geometria considerada e do tipo de descontinuidade.

Se a informação de tenacidade a fratura do material ( $K_{mat}$  ou  $\delta_{mat}$ ) não estiver disponível, então uma estimativa desta poderá ser realizada a partir de dados de ensaio de impacto Charpy-V (ver Anexo J da BS-7910:2005).

### **PASSO 9 – Calcular $K_r$**

$K_r$  é a razão entre o fator de intensidade de tensões aplicado,  $K_I$ , e a tenacidade à fratura do material,  $K_{mat}$ :

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}}$$

### **PASSO 10 – Calcular o fator de intensidade de tensões aplicado ( $\delta_I$ )**

O CTOD aplicado,  $\delta_I$ , é determinado a partir de  $K_I$  como segue:

a) Para aços (incluindo aços inoxidáveis) e ligas de alumínio onde  $\sigma_{m\acute{a}x} / \sigma_Y \leq 0,5$  e para todas as outras razões  $\sigma_{m\acute{a}x} / \sigma_Y$  para outros materiais:

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{\sigma_Y E}$$

b) Para aços (incluindo aços inoxidáveis) e ligas de alumínio com  $\sigma_{m\acute{a}x} / \sigma_Y > 0,5$ :

$$\delta_I = \left( \frac{K_I^2}{\sigma_Y E} \right) \left( \frac{\sigma_Y}{\sigma_{m\acute{a}x}} \right)^2 \left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_Y} - 0,25 \right)$$

### **PASSO 11 – Calcular**

O coeficiente  $\delta_r$  é a razão entre  $\delta_I$  e a tenacidade a fratura do material,  $\delta_{mat}$ : e a raiz quadrada de  $\delta_r$  é calculada a partir da seguinte equação:

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_{mat}}}$$

### **PASSO 12 – Calcular a razão de colapso plástico ( $S_r$ )**

A razão de colapso plástico,  $S_r$ , é calculada a partir da seguinte equação:

$$S_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_f}$$

Onde:

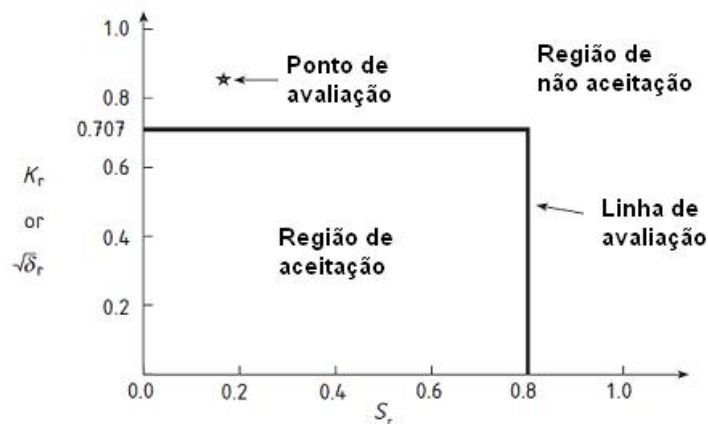
$\sigma_{ref}$  : é a tensão de referência calculada a partir de fórmulas do ANEXO P da BS-7910:2005.

$\sigma_f$  : (“flow strength”) deverá ser assumido como a média aritmética entre a tensão de escoamento e o limite de resistência do material até um máximo de  $1,2\sigma_Y$ :

$$\sigma_f = \frac{\sigma_Y + \sigma_U}{2} \leq 1,2\sigma_Y$$

### PASSO 13 – Plotar o FAD

A Figura 3.12 mostra o FAD genérico utilizado pelo nível 1A da BS-7910. Plotar sobre esse diagrama um ponto cujas coordenadas são os valores  $K_r$  (ou  $\sqrt{\delta_r}$ ) e  $S_r$  obtidos nos PASSOS 10, 11 e 12 respectivamente.



**Figura 3.12 - FAD - nível 1A**

Se o ponto, plotado no diagrama, situar-se no interior do retângulo delimitado pelos eixos coordenados e as linhas de avaliação, então a trinca é aceitável pelo nível 1 desta norma.

Se o ponto localizar-se fora do retângulo ou, se o ponto localizar-se sobre uma das linhas do FAD então a trinca em avaliação não é aceitável. Neste caso, uma das seguintes ações, ou combinação delas, devem ser avaliadas:

- Os dados utilizados na análise devem ser refinados e a avaliação de nível 1 deve ser repetida, isto é, pode-se refinar a análise das tensões atuantes e/ou pode-se re-caracterizar a(s) trinca(s) em análise.
- Realizar avaliação pelos níveis 2 ou 3.
- Reparar ou substituir o componente trincado.

O nível 1 da BS-7910 não requer a aplicação de fatores de segurança adicionais já que no próprio FAD está embutido um fator de segurança (aproximadamente igual a 2 para o tamanho de trinca). Contudo, as piores estimativas, isto é, os valores das variáveis de entrada nas condições mais críticas deverão ser adotados neste nível.

### **3.4.2 Procedimento Nível 2 pela BS-7910**

Abaixo é apresentado um passo-a-passo para aplicação do procedimento para avaliação de trincas nível 2. Este passo-a-passo é apenas um resumo de parte do conteúdo da Seção 7 da BS-7910 e maiores informações deverão ser consultadas naquele documento.

#### **PASSO 1 – Definir as tensões atuantes**

Determinar a distribuição de tensão no local da trinca devido aos carregamentos e classificar as tensões resultantes dentro das seguintes categorias:

- 1) Tensões primárias;
- 2) Tensões secundárias;
- 3) Tensões residuais;

A distribuição de tensão é determinada supondo a estrutura sem a presença de trinca. A distribuição de tensão real poderá ser utilizada na avaliação, contudo, a linearização da dessa distribuição torna-se mais conveniente para a avaliação. Ver Figura 1 na Seção 6 da BS-7910 para mais detalhes sobre linearização de tensões.

#### **Tensões residuais**

As tensões residuais, em geral, podem ser assumidas como sendo uniforme, assim como no nível 1, ou não-uniforme. O Anexo Q da BS-7910 trata de distribuições de tensão residual não-uniforme. Para distribuição de tensão não-uniforme, as componentes das tensões

residuais  $Q_m$  e  $Q_b$  podem ser obtidas pela linearização das tensões conforme Figura 1 na Seção 6 da BS-7910.

Se as tensões residuais forem assumidas como sendo uniforme, então a componente da tensão residual,  $Q_m$ , poderá ser assumida como sendo igual ao menor dos seguintes valores:

$$Q_m = \sigma'_Y$$

ou

$$Q_m = \left( 1,4 - \frac{\sigma_{\text{ref}}}{\sigma'_f} \right) \sigma'_Y$$

Onde,

$\sigma'_Y$ : é a tensão de escoamento do material apropriado na temperatura de avaliação, exceto para temperaturas abaixo da ambiente onde usa-se nas equações anteriores o valor de na temperatura ambiente;

$\sigma'_f$ : é a tensão de “flow strength” apropriado (assumido como sendo a média entre a tensão de escoamento e o limite de resistência do material) na temperatura de avaliação;

Ver PASSO 7, item “b) Para estruturas soldadas submetidas a TTAT” do nível 1 deste material e o Anexo O se a estrutura for submetida a TTAT e/ou teste de pressão.

#### **PASSO 2 – Determinar ou estimar a tenacidade à fratura do material**

Este passo é idêntico ao do nível 1. Ver PASSO 2 na seção 2.4.1 deste trabalho.

#### **PASSO 3 – Determinar as propriedades do ensaio de tração do material**

Este passo é idêntico ao do nível 1. Ver PASSO 3 na seção 2.4.1 deste trabalho.

#### **PASSO 4 – Caracterização da trinca**

Este passo é idêntico ao do nível 1. Ver PASSO 4 na seção 2.4.1 deste trabalho.

#### **PASSO 5 – Selecionar o FAD**

Neste passo deve-se escolher entre realizar a avaliação pelo nível 2A ou 2B:

##### **Nível 2A:**

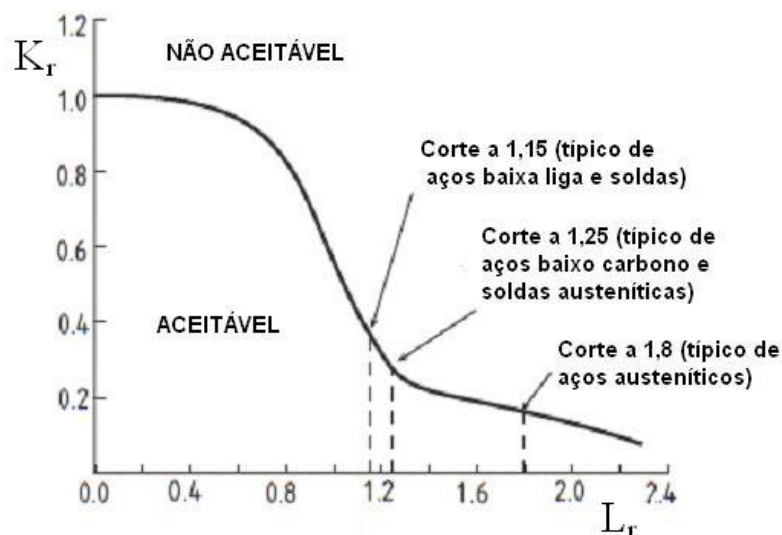
Este nível utiliza um FAD generalizado, igual ao FAD do nível 2 do API-579, que não depende de dados mais detalhados da curva tensão-deformação do material, isto é, este FAD possui uma curva genérica válida para vários materiais alterando-se apenas o limite (“cut-off”) que define o colapso plástico a depender do material.

As equações que descrevem as curvas do FAD são as seguintes:

$$\sqrt{\delta} \text{ ou } K_I = (1 - 0,14L_r^2)[0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)] \quad L_r \leq L_{r \text{ max}}$$

$$\sqrt{\delta} \text{ ou } K_I = 0 \quad L_r > L_{r \text{ max}}$$

A Figura 3.13 mostra o FAD o nível 2A com diferentes “cut-offs” para diferentes materiais.



**Figura 3.13 - FAD genérico, Nível 2A**

Para materiais que exibem limite de escoamento definido, deve-se adotar o limite de colapso plástico (“cut-off”) fazendo  $L_r = 1,0$ , ou deve-se avaliar pelo nível 2B. Se for impraticável determinar um FAD nível 2B, então a curva do FAD para  $L_r = 1,0$  e  $L_r > 1,0$  pode ser estimada utilizando-se as seguintes expressões:

$$\left[ 1 + \frac{E\varepsilon_L}{\sigma_Y^u} + \frac{1}{2(1 + E\varepsilon_L / \sigma_Y^u)} \right]^{-0,5} \quad \text{para } \sqrt{\delta_r} (L_r = 1) \text{ ou } K_I (L_r = 1)$$

$$\sqrt{\delta_r} (L_r = 1) L_r^{(N-1)/2N} \quad \text{para } \sqrt{\delta_r} (L_r > 1)$$

$$K_r (L_r = 1) L_r^{(N-1)/2N} \quad \text{para } K_r (L_r > 1)$$

Onde:

$\varepsilon_L = 0,0375(1 - \sigma_Y^u / 1000)$ : é o comprimento estimado do platô de Luders (esta relação é válida para  $\sigma_Y^u < 800\text{N/mm}^2$ ).

$\sigma_Y^u$ : é o limite de escoamento superior (caso este não seja conhecido, pode-se utilizar o limite de escoamento inferior ou 0,2%  $\sigma_Y$ ).

$$N = 0,3(1 - \sigma_Y^u / \sigma_u).$$

### Nível 2B:

Este método geralmente fornece resultados mais precisos que o nível 2A, contudo requer mais dados que o anterior a partir da curva tensão-deformação específica do material em análise. Este nível não é adequado para a ZTA, sendo o nível 2A mais apropriado.

As equações que descrevem as curvas do FAD são as seguintes:

$$\sqrt{\delta} \text{ ou } K_r = \left[ \frac{E\varepsilon_{\text{ref}}}{L_r\sigma_Y} + \frac{L_r\sigma_Y}{2E\varepsilon_{\text{ref}}} \right]^{-0,5} \quad \text{para } L_r \leq L_{r \text{ max}}$$

$$\sqrt{\delta} \text{ ou } K_r = 0 \quad \text{para } L_r > L_{r \text{ max}}$$

Onde:

$\varepsilon_{\text{ref}}$  é a deformação verdadeira obtida a partir da curva de tensão-deformação uniaxial na tensão verdadeira,  $L_r\sigma_Y$ .

### PASSO 6 – Calcular a tensão ( $Y\sigma$ )

Calcular a tensão atuante, ( $Y\sigma$ ), que é dada como a soma das componentes de tensão primária ( $Y\sigma$ )<sub>p</sub> e secundária ( $Y\sigma$ )<sub>s</sub> conforme equação abaixo:

$$(Y\sigma) = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s$$

**Calcular  $(Y\sigma)_p$ :**

$$(Y\sigma)_p = Mf_W[k_{tm}M_{km}M_mP_m + k_{tb}M_{kb}M_b\{P_b + (k_m - 1)P_m\}]$$

**Calcular  $(Y\sigma)_s$ :**

$$(Y\sigma)_s = M_mQ_m + M_bQ_b$$

Onde:

$f_W$ : fator de correção para largura finita do componente.

$k_m$  : fator de concentração de tensão devido ao desalinhamento.

$k_{tm}$  : concentração de tensão devido as tensões de membrana.

$k_{tb}$  : concentração de tensão devido as tensões de flexão.

$M$ : fator de correção para curvatura (“bulging factor”).

$M_m$ : fator geométrico para as tensões de membrana.

$M_b$ : fator geométrico para as tensões de flexão.

$M_{km}$ : fator de concentração de tensão na margem da solda aplicado à tensão de membrana;

$M_{kb}$ : fator de concentração de tensão na margem da solda aplicado à tensão de flexão.

$P_m$  : componente de membrana da tensão primária.

$P_b$  : componente de flexão da tensão primária.

$Q_m$  : componente de membrana da tensão secundária.

$Q_b$  : componente de flexão tensão secundária.

Os fatores  $M$ ,  $f_W$ ,  $M_m$  e  $M_b$  são obtidos no Anexo M da BS-7910:2005 em função da geometria considerada e do tipo de descontinuidade.  $M_{km}$  e  $M_{kb}$  aplicam-se quando a descontinuidade está localizada em uma região de concentração de tensão e são dados na Tabela M.5 e Tabela M.6. Para  $k_{tm}$ ,  $k_{tb}$  e  $k_m$  ver Anexo D da BS-7910:2005.



## PASSO 8 - Cálculo das tensões residuais

### 1. Para estruturas soldadas sem TTAT:

- **Para trincas situadas num plano transversal a solda:** a tensão residual trativa deverá ser assumida como sendo uma contribuição de  $Q_m$  a tensão uniforme de membrana. Esta tensão deve ser considerada igual à tensão de escoamento a temperatura ambiente do material no qual a trinca está localizada.
- **Para trinca situada num plano paralelo a solda:** a tensão residual assumida deverá ser igual ou menor que o valor da tensão de escoamento a temperatura ambiente da solda ou do metal base.

**2. Para estruturas soldadas submetidas a TTAT:** as tensões residuais geralmente não são reduzidas a zero. Onde os dados não estiverem disponíveis, elas podem ser assumidas, no caso de aços ao manganês e aços baixa liga, que as tensões após o TTAT em forno e temperatura de tratamento entre 580 °C to 620 °C são como segue:

- Paralela a solda, a tensão residual ( $Q_m$ ) deverá ser assumida como sendo igual a 30 % da tensão de escoamento do material a temperatura ambiente.
- Transversal a solda, a tensão residual ( $Q_m$ ) deverá ser assumida como sendo igual a 20 % da tensão de escoamento da solda ou do metal base, a que for menor.

## PASSO 9 – Calcular $K_I$

Com o valor de ( $Y\sigma$ ) obtido no PASSO 6, calcular o fator de intensidade de tensão aplicado,  $K_I$ , com o uso da seguinte fórmula:

$$K_I = (Y\sigma)\sqrt{\pi a}$$

## PASSO 10 – Calcular $K_r$

$K_r$  é a razão entre o fator de intensidade de tensões aplicado,  $K_I$ , e a tenacidade à fratura do material,  $K_{mat}$  :

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad \text{sem a presença de tensões secundárias.}$$

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} + \rho \quad \text{com a presença de tensões secundárias.}$$

Onde:

$\rho$ : é um fator de correção de plasticidade; necessário para permitir a interação das componentes de tensão primária  $(Y\sigma)_p$  e secundária  $(Y\sigma)_s$ . Este fator está definido no Anexo R da BS-7910:2005.

O valor de  $K_I$  pode variar ao longo da linha de frente da trinca influenciado por uma série de fatores. O  $K_{mat}$  também pode variar devido a heterogeneidades do material ou devido a variações de restrição ao deslocamento de material. Nesse sentido, para que a avaliação seja conservadora, deve-se utilizar na avaliação o maior valor de  $K_r$  calculado ao longo da frente da trinca. Para maiores informações a esse respeito, ver Seção 7.3.5.2 da BS-7919:2005.

#### **PASSO 10 – Calcular o fator de intensidade de tensão aplicado ( $\delta_I$ )**

O CTOD aplicado,  $\delta_I$ , é determinado a partir de  $K_I$  como segue:

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{X\sigma_Y E'}$$

Onde:

$X$ : é um fator (geralmente, de valor entre 1 e 2) influenciado pela ponta da trinca, restrição geométrica e capacidade de encruamento do material. Se o valor de  $X$  for desconhecido, então dever fazer  $X = 1$ .

Ver Seção 7.3.6 da BS-7910:2005 para obter mais detalhes de como se pode determinar o valor de  $X$ .

#### **PASSO 11 – Calcular**

$\delta_r$  é a razão entre o CTOD aplicado,  $\delta_I$ , e a tenacidade a fratura do material,  $\delta_{mat}$ , incluindo fatores de segurança parciais obtido no Anexo K da BS-7910:2005. A raiz quadrada de  $\delta_r$  é calculada a partir da seguinte equação:

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_{mat}}}$$

### **PASSO 12 – Calcular a razão de colapso plástico ( $L_r$ )**

A razão de colapso plástico,  $L_r$ , para os níveis 2 e 3 é calculada a partir da seguinte equação:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y}$$

Onde:

$\sigma_{ref}$  : é a tensão de referência calculada a partir de fórmulas do ANEXO P da BS-7910:2005 com a aplicação de fatores de segurança parciais apropriados.

$\sigma_Y$  : é a tensão de escoamento do material.

### **PASSO 13 – Plotar o FAD**

Plotar sobre o FAD da Figura 3.13 um ponto cujas coordenadas são os valores  $K_r$  (ou  $\sqrt{\delta_r}$ ) e  $S_r$  obtidos nos PASSOS 10, 11 e 12 respectivamente. Se o ponto situar-se abaixo da curva do diagrama e a esquerda da linha vertical que define o limite de carregamento então a trinca é aceitável pelo nível 2A deste documento.

Se o ponto localizar-se sobre ou acima da curva do FAD ou a direita da linha vertical do limite de carregamento então a trinca em avaliação não é aceitável. Neste caso, uma das seguintes ações, ou combinação delas, devem ser avaliadas:

- a) Os dados utilizados na análise devem ser refinados e a avaliação de nível 1 deve ser repetida, isto é, pode-se refinar a análise das tensões atuantes e/ou pode-se re-caracterizar a(s) trinca(s) em análise.
- b) Realizar avaliação pelos níveis 2 ou 3.
- c) Reparar ou substituir o componente trincado.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### Geometria avaliada

O tipo de descontinuidade escolhido para avaliação foram trincas superficiais (semi-elípticas), com orientação paralela ao cordão de solda longitudinal e localizadas na ZTA, na superfície interna de um casco cilíndrico cujas dimensões estão mostradas na Figura 4.1. Esta geometria é típica de um de vaso de pressão de parede fina.

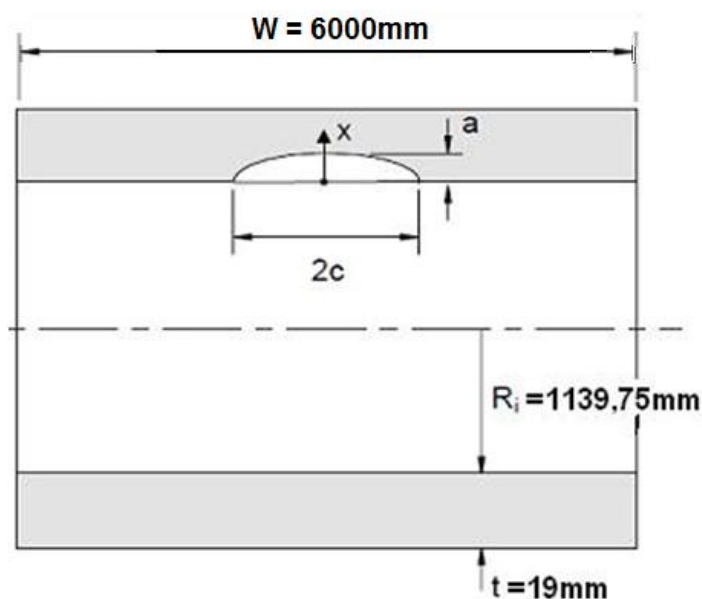


Figura 4.1 - Geometria estudada.

### Dimensões das trincas

Trincas com nove (09) profundidades diferentes foram avaliadas. Os valores de profundidade de trinca (valores de  $a$ ) foram fixados entre 10 a 90% da espessura do casco cilíndrico conforme mostra a Tabela 4.1: Estas dimensões foram escolhidas de modo a termos uma varredura da profundidade de trincas encontradas.

**Tabela 4.1 - Profundidades das trincas avaliadas**

Profundidade da trinca, a [mm]	Relação a/t
1,9	0,1
3,8	0,2
5,7	0,3
7,6	0,4
9,5	0,5
11,4	0,6
13,3	0,7
15,2	0,8
17,1	0,9

t = 19mm (espessura do casco cilíndrico avaliado)

### Dados de projeto e propriedades do material

Os dados de projeto e as propriedades do material do casco cilíndrico em estudo estão listados na Tabela 4.2:

**Tabela 4.2 - Dados de projeto e propriedades do material**

Material	SA-285 Gr C
Curva UCS-66 do ASME	Curva A
Temperatura de Operação (T)	49,0 °C
Pressão de Projeto (P)	17,4 kgf/cm <sup>2</sup>
Comprimento do costado (W)	6000,0 mm
Diâmetro interno do Vaso (D)	2279,5 mm
Espessura do Vaso (t)	19,0 mm
Módulo de Elasticidade (E)	207000 MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,33
Tensão de Escoamento ( $\sigma_{ys}$ ) – Temp. Ambiente	2112 kgf/cm <sup>2</sup>
Tensão de Escoamento ( $\sigma_{ys}$ ) – Temp. Operação	2112 kgf/cm <sup>2</sup>
Tensão de Ruptura ( $\sigma_u$ )	3867 kgf/cm <sup>2</sup>

### Cálculo das tensões

As tensões consideradas nas avaliações foram a tensão primária de membrana devido a pressão interna do fluido e a tensão residual média de soldagem da solda longitudinal do casco cilíndrico com e sem TTAT.

A tensão de membrana devido a pressão do fluido foi calculada, para ambos os procedimentos, pela seguinte equação:

$$P_m = P \left( \frac{D}{2t} + 0,6 \right)$$

Onde,

$P_m$  : tensão de membrana circunferencial, kgf/cm<sup>2</sup>;

P: pressão interna do fluido, kgf/cm<sup>2</sup>;

D: diâmetro interno do casco cilíndrico, mm;

t: espessura de parede do casco cilíndrico, mm;

As tensões residuais foram assumidas como sendo distribuições uniformes de tensão ao longo da espessura de parede do casco. A Tabela 4.3 apresenta os valores considerados na avaliação em cada caso. Como pode ser observado nesta tabela foram consideradas duas condições de solda. Com tratamento térmico de alívio de tensões e sem tratamento térmico de alívio de tensões.

**Tabela 4.3 – Valores de tensão residual considerados na avaliação.**

<b>Documento</b>	<b>c/ TTAT</b>	<b>s/ TTAT</b>
<b>API-579</b>	$Q_m = 0,2 \cdot \sigma_{vs}$	$Q_m = \sigma_{vs}$
<b>BS-7910</b>	$Q_m = 0,2 \cdot \sigma_{vs}$	$Q_m = \sigma_{vs}$

Foi considerado que não existem tensões secundárias nem tensões de flexão.

### **Estimativa da tenacidade do material**

Na avaliação pelos documentos API-579 e BS-7910, a tenacidade do material foi estimada utilizando a metodologia “lower bound” da Seção XI do código ASME B&PV e reproduzida no Anexo F do API-579. As fórmulas para cálculo de  $K_{IC}$  por esta metodologia são apresentadas abaixo:

$$K_{IC} = 36,5 + 3,084 \exp[0,036(T - T_{ref} + 56)] \quad (MPa.m^{1/2})$$

Onde,

T: temperatura de avaliação, °C;

T<sub>ref</sub>: temperatura de referência, °C, dada por:

$$T_{ref} = \frac{5}{9} \left[ 66 \cdot \arctan h \left( \frac{\frac{\sqrt{640 \cdot CVN \cdot E}}{1100 \cdot (\sigma_{ys} / C_{us})} - 1,7}{1,7 - \frac{27}{(\sigma_{ys} / C_{us})}} \right) + T_o - 32 \right]$$

Onde,

σ<sub>ys</sub>: tensão de escoamento do material na temperatura de avaliação, MPa;

CVN = 20 Joules, para aços-carbono;

T<sub>0</sub> = 114°F, para a Curva A da Fig. UCS-66 do ASME VIII;

C<sub>us</sub> = 6,894757.

### Soluções para K<sub>I</sub> e σ<sub>ref</sub>

#### Solução para K<sub>I</sub> do API-579:

Para cálculo do fator intensidade de tensão foi utilizada a solução KCSCLE2 do Anexo C do API-579:

$$K_I = [G_0 \{ \sigma_0 + p_c \} + G_1 \sigma_1 \left( \frac{a}{t} \right) + G_2 \sigma_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + G_3 \sigma_3 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + G_4 \sigma_4 \left( \frac{a}{t} \right)^4] \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Q}}$$

Assumindo uma distribuição de tensão uniforme ao longo da espessura do casco cilíndrico então G<sub>1</sub>=G<sub>2</sub>=G<sub>3</sub>=G<sub>4</sub>=0, e assumindo também que não há pressão sobre as faces da trinca (p<sub>c</sub>=0), a equação acima simplifica-se para:

$$K_I = G_0 \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Q}}$$

Onde,

K<sub>I</sub>: fator intensidade de tensão, MPa.m<sup>1/2</sup>;

a: profundidade da trinca, m;

$\sigma_0$ : tensão uniforme atuante na seção de localização da trinca, MPa;

$G_0$ : “influence coefficient” dado pela seguinte equação:

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6$$

Os valores de  $A_{ij}$  são encontrados na Tabela C.12 do Anexo C do API-579.

e

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi}$$

$p_c$ : pressão sobre a face da trinca, MPa;

$$Q = 1,0 + 1,464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,65} \quad p/ \ a/c \leq 1,0$$

$$Q = 1,0 + 1,464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1,65} \quad p/ \ a/c > 1,0$$

Os limites para aplicação desta solução são:

- a)  $0,0 \leq a/t \leq 0,8$ ;
- b)  $0,03125 \leq a/c \leq 2,0$ ;
- c)  $0 \leq \varphi \leq \pi$ ;
- d)  $0,0 \leq t/R_i \leq 1,0$ ;

### **Solução para $\sigma_{ref}$ do API-579:**

Para cálculo da tensão de referência foi utilizada a solução RCSCLE2 do Anexo D do API-579:

$$\sigma_{ref} = \frac{gP_b + [(gP_b)^2 + 9.(M_s.P_m.(1-\alpha)^2)^2]^{0,5}}{3.(1-\alpha)^2}$$

onde,

$$\alpha = \frac{a/t}{1 + t/c}$$



Sendo que as tensões de flexão foram consideradas nulas ( $P_b=0$ ) a equação acima simplifica-se para:

$$\sigma_{\text{ref}} = M_s \cdot P_m$$

Onde,

$P_m$ : tensão primária de membrana;

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \left( \frac{1}{M_t} \right)}$$

$$M_t = \left( \frac{1,02 + 0,4411\lambda^2 + 0,006124\lambda^4}{1,0 + 0,02642\lambda^2 + 1,533 \cdot 10^{-6}\lambda^4} \right)^{0,5}$$

e

$$\lambda = \frac{1,818 \cdot c}{\sqrt{R_i \cdot a}}$$

### Solução para $K_I$ da BS-7910:

Para cálculo do fator intensidade de tensão foi utilizada a seguinte equação obtida a partir do Anexo M da BS-7910:

$$K_I = \left( (M_f \cdot [k_{tm} M_{km} M_m P_m + k_{tb} M_{kb} M_b \{P_b + (k_m - 1)P_m\}] + (M_m Q_m + M_b Q_b) \right) \sqrt{\pi \cdot a}$$

Onde,

- $P_b=Q_b=0$ , pois as tensões de flexão foram consideradas nulas;
- $M=1$ , para trinca longitudinal na superfície interna de cilindros;
- $f_w=1$ ;
- $M_{km}=M_{kb}=1$ , pois a trinca não está localizada no “pé” do cordão de solda;
- $k_{tm}=k_{tb}=1$ , pois não há tensões de pico;
- $k_m=1$ , pois não há tensões devido a desalinhamento;

Considerando os valores acima, a equação anterior simplifica-se para:

$$K_I = M_m (P_m + Q_m) \sqrt{\pi \cdot a}$$

$K_I$ : fator intensidade de tensão, MPa.m<sup>1/2</sup>;

$a$ : profundidade da trinca, m;

$P_m$ : tensão primária de membrana, MPa;

$Q_m$ : tensão residual de membrana, MPa;

$M_m$ : fator geométrico para as tensões de membrana, MPa.

### Solução para $\sigma_{ref}$ da BS-7910:

Para cálculo da tensão de referência foi utilizada a seguinte solução do Anexo P da BS-7910:

$$\sigma_{ref} = 1,2M_s \cdot P_m + \frac{2P_b}{3 \cdot (1 - \alpha^n)^2}$$

Sendo que as tensões de flexão serão consideradas nulas ( $P_b=0$ ) a equação acima simplifica-se para:

$$\sigma_{ref} = 1,2M_s \cdot P_m$$

Onde,

$P_m$ : tensão primária de membrana, MPa;

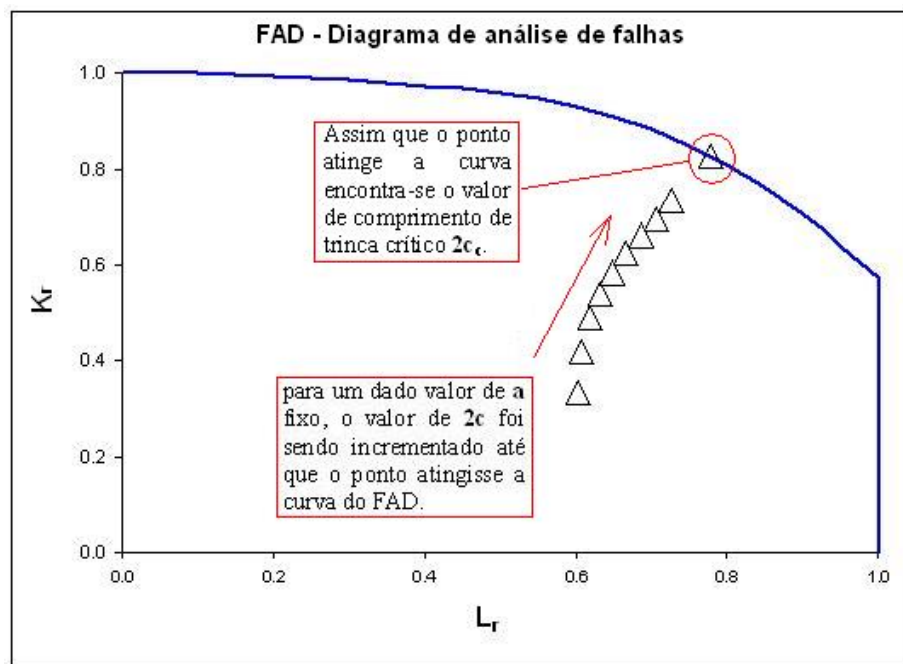
$$M_s = \frac{1 - \left( \frac{a}{t \cdot M_T} \right)}{1 - \left( \frac{a}{t} \right)}$$

$$M_T = \sqrt{1 + 1,6 \left( \frac{c^2}{R_i \cdot t} \right)}$$

## Metodologia de avaliação

Para cada valor de profundidade de trinca (**a**) constantes na Tabela 4.1, foram avaliados os comprimentos de trinca CRÍTICOS (**2c<sub>c</sub>**) correspondentes por meio do uso do diagrama de análise de falhas – FAD – generalizado pelos procedimentos nível 2 e nível 2A dos documentos API-579 e BS-7910, respectivamente. Fazendo-se uso de uma planilha de cálculo, para um dado valor de **a** fixo, o valor de **2c** foi sendo variado até que o ponto de avaliação dado pelas coordenadas (**L<sub>r</sub>** e **K<sub>r</sub>**) atingisse a curva do FAD, encontrando-se assim as dimensões críticas de trinca para um dado valor de **a** conforme ilustrado na Figura 4.2. A fim de se fazer comparações, os valores das dimensões críticas obtidos pelo API-579 e BS-7910 foram tabelados lado a lado (Tabela 5.1) e também plotados num mesmo gráfico de modo que se possa avaliar, graficamente, as diferenças entre os resultados obtidos (Figura 5.1).

A metodologia acima descrita foi aplicada duas vezes, em ambos os documentos, considerando o componente com e sem tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT).



**Figura 4.2 - FAD, metodologia para encontrar o  $2c_c$**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 5.1 apresenta os resultados das avaliações realizadas pelos documentos API-579 e BS-7910. Esta tabela relaciona os comprimentos de trinca críticos,  $2c_c$ , relativos a cada um dos nove valores de profundidade de trinca,  $a$ , avaliados por ambos os documentos. Nesta tabela pode-se observar que para algumas trincas foram encontrados valores de  $2c_c$  superiores a 6000 mm e, para esses casos, nenhum tratamento dos dados foi realizado.

A Figura 5.1 apresenta um gráfico onde foram plotados os dados da Tabela 5.1; exceto para as trincas com  $2c_c$  superior a 6000mm. Exceto por um ponto, esta figura mostra que o API-579 permite maiores comprimentos,  $2c_c$ , para trincas de mesma profundidade. E, pelo aspecto do gráfico pode-se dizer que há coerência na relação  $a$  versus  $2c_c$  entre o API-579 e BS-7910.

Na Tabela 5.1 estão apresentadas as diferenças entre os valores dos comprimentos críticos encontrados. Nas avaliações com TTAT uma diferença percentual média de 26% foi encontrada, sendo que todos os valores de  $2c_c$  pela BS-7910 ficaram abaixo dos valores do API-579 como pode ser visto na Figura 5.1. Para as avaliações sem TTAT a diferença percentual média encontrada foi de 20% sem considerar o ponto com  $a=17,1$  mm, já que este foi o único ponto de avaliação onde se encontrou um  $2c_c$  pela BS-7910 superior ao do API-579.

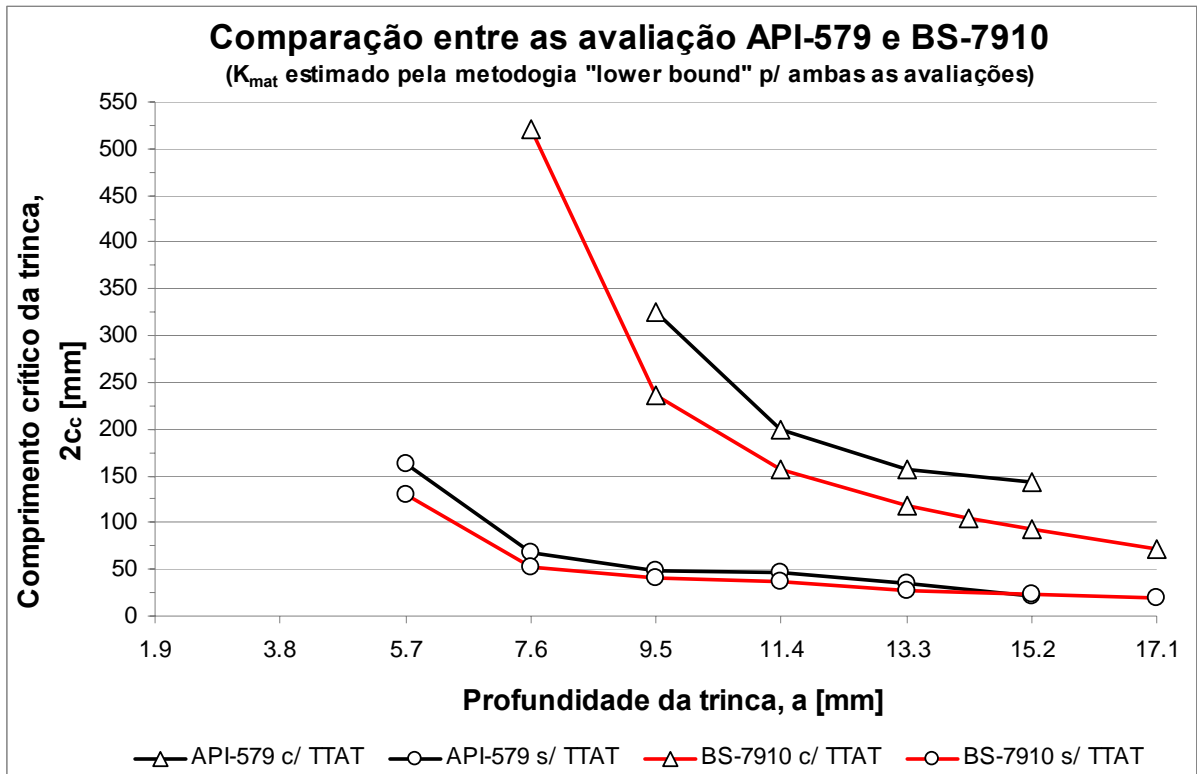
A Figura 5.2 e a Figura 5.3 apresentam os FAD's com pontos pretos representando as dimensões críticas das trincas avaliadas pelo o API-579 para as condições com TTAT e sem TTAT respectivamente. Sobre esses FAD's também foram plotados os pontos de avaliação pela BS-7910 considerando as trincas com dimensões iguais as dimensões críticas ( $a$ ,  $2c_c$ ) das trincas avaliadas pelo API-579. A partir dessas figuras pode-se comparar, sobre um mesmo FAD, os pontos de avaliação obtidos por ambos os documentos observando-se que, enquanto que os pontos pretos pelo API-579 estão na condição limite de aceitação (pontos sobre a curva) os pontos vermelhos pela BS-7910 encontram-se fora da região de aceitação; exceto pelo ponto  $a = 17,1$  mm.

Pode-se perceber que a seqüência principal dos procedimentos nível 2 para avaliação de trincas são semelhantes para ambos os documentos, ao mesmo tempo em que apresentam peculiaridades bastante distintas em certas partes do procedimento.

Pelo API-579 teve-se que realizar inúmeras interpolações de valores tabelados (Tabelas C.12, 9.4 e 9.6) que manualmente torna o seu procedimento de avaliação mais lento e com maior possibilidade de ocorrência de equívocos pelo usuário. Uma outra peculiaridade é que, enquanto a BS-7910 possui uma fórmula geral para cálculo do fator de intensidade de tensão,  $K_I$ , válida para diversas geometrias, o API-579 apresenta no seu Anexo C um compêndio de soluções para cálculo de  $K_I$ , com diferentes formulações matemáticas a depender da geometria do componente, do tipo, localização e orientação de trinca, podendo possuir inclusive mais de uma fórmula matemática para o mesmo problema que se deseja avaliar, e, para usuários pouco experientes, isso poderia gerar dúvidas na escolha da solução mais adequada.

Outro exemplo é quando na avaliação deve-se considerar a estrutura na condição de “como-soldado”; nesta situação a BS-7910 é direta, assumindo que o nível de tensões residuais é igual a tensão de escoamento do material na temperatura de avaliação. Já o API-579 remete o usuário ao seu Anexo E, que contém procedimentos pouco simplificados para estimativa da distribuição de tensão residual ao longo da espessura do componente.

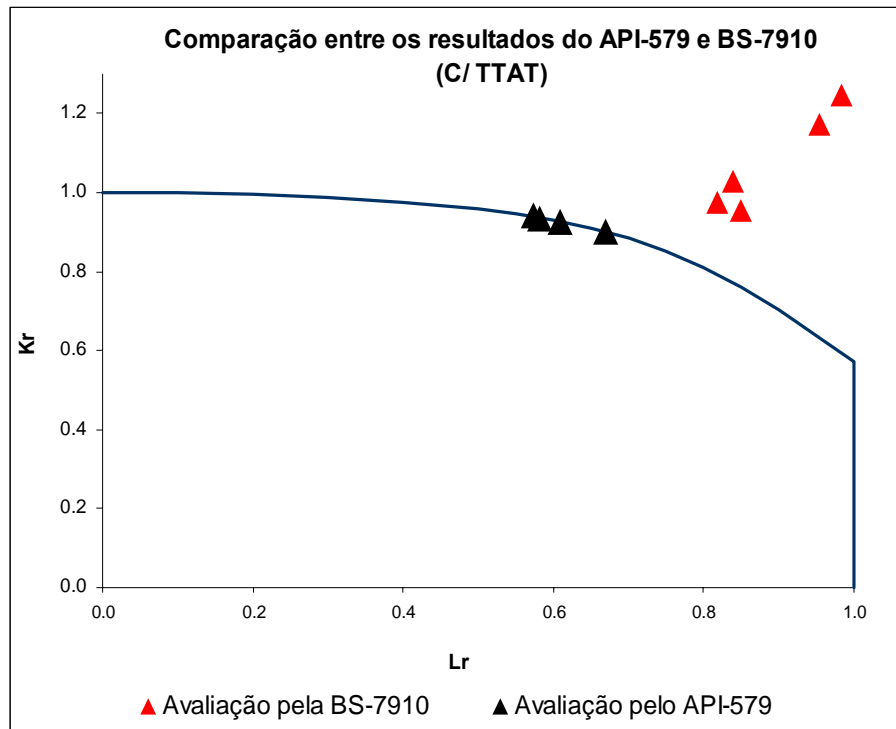
Em síntese, numa visão geral, o documento BS-7910 pareceu ser mais conciso e direto que o documento API-579, sendo o primeiro de uso menos complicado para usuários iniciantes que não possuem o recurso do software.



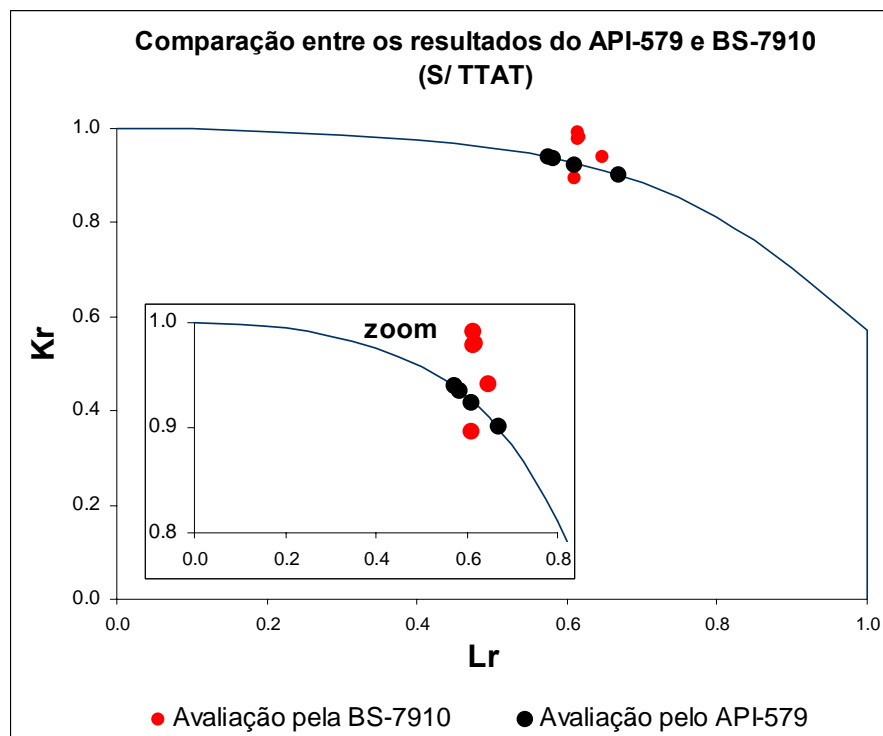
**Figura 5.1 – Pontos de avaliação ( $a$ ,  $2c_c$ ).**

**Tabela 5.1 – Comparação entre as dimensões críticas.**

<b>COMPARAÇÃO ENTRE AS DIMENSÕES CRÍTICAS DE TRINCA</b>					
<b>C / TTAT</b>					
<b>a</b>	<b>a/t</b>	<b>2c<sub>c</sub> [API]</b>	<b>2c<sub>c</sub> [BS]</b>	<b>2c<sub>c</sub> [API] - 2c<sub>c</sub> [BS]</b>	<b>Diferença [%]</b>
1,9	0,1	> 6000	> 6000	---	
3,8	0,2	> 6000	> 6000	---	
5,7	0,3	> 6000	> 6000	---	
7,6	0,4	> 6000	521	---	
9,5	0,5	325	236	89	27%
11,4	0,6	200	157,5	42,5	21%
13,3	0,7	157	118	39	25%
15,2	0,8	143	93	50	35%
17,1	0,9	Ver nota	71	---	
<b>Média:</b>					<b>26%</b>
<b>S/ TTAT</b>					
<b>a</b>	<b>a/t</b>	<b>2c<sub>c</sub> [API]</b>	<b>2c<sub>c</sub> [BS]</b>	<b>2c<sub>c</sub> [API] - 2c<sub>c</sub> [BS]</b>	<b>Diferença [%]</b>
1,9	0,1	> 6000	> 6000	---	
3,8	0,2	> 6000	> 6000	---	
5,7	0,3	162	130	32	20%
7,6	0,4	67	52,5	14,5	22%
9,5	0,5	49	41	8	16%
11,4	0,6	46,5	37,5	9	19%
13,3	0,7	34	26,5	7,5	22%
15,2	0,8	20,5	22,5	-2	-10%
17,1	0,9	Ver nota	19,5	---	
<b>Média:</b>					<b>20%</b>
<p><b>a:</b> Profundidade da trinca, mm.  <b>2c<sub>c</sub>:</b> Comprimento crítico da trinca, mm.  <b>t:</b> espessura de parede do cilindro, 19mm.</p>					
<b>Nota:</b>					
a = 17,1mm extrapola o intervalo de aplicação da solução de K <sub>1</sub> do API-579; <b>0,0 ≤ a/t ≤ 0,8;</b>					



**Figura 5.2 - FAD, comparação entre os resultados do API-579 e BS-7910 (c/ TTAT)**



**Figura 5.3 - FAD, comparação entre os resultados do API-579 e BS-7910 (s/ TTAT)**



## 6 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu as seguintes conclusões:

Na comparação entre os resultados das avaliações por ambos os documentos pode-se concluir que a diferença média entre os comprimentos críticos em função da profundidade de trinca é da ordem de 23% para as soluções de  $K_I$  e  $\sigma_{ref}$  utilizadas neste trabalho. Ou seja, com estas soluções de  $K_I$  e  $\sigma_{ref}$ , nível 2 com o FAD generalizado e em condições de carregamento idênticos, o documento BS-7910 gera resultados mais conservativos que o API-579.

A abordagem de avaliação dos defeitos via BS-7910 apresenta uma sequência de utilização mais amigável ao usuário que está iniciando este tipo de análise.

## **7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Expandir esta análise comparativa utilizando a avaliação de nível 3 de modo a comparar os resultados destas diferentes metodologias.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <sup>1</sup> Telles, P. C. S., **Vasos de Pressão**, 2ª Edição Atualizada, LTC Editora SA, 1996, Rio de Janeiro, Brasil.
- <sup>2</sup> Anderson, T.L., **Fracture Mechanics Fundamentals and Applications**, 2ª Edition, CRC Press, 1995, USA.
- <sup>3</sup> Donato, G. V. P., **Apostila: Curso de Mecânica da Fratura**, Escola de ciências e tecnologia de abastecimento, Universidade Petrobrás, RH.
- <sup>4</sup> **BS 7910:2005 – Guide to Methods for Assessing Acceptability of Flaws in Metallic Structures**, July/2005, BSI – British Standards Institution.
- <sup>5</sup> **API RP579-1/ASME FFS-1 - Fitness for Service, Recommended Practice**, Second Edition, June/2007, American Petroleum Institute Publishing Services, Washington DC, USA.
- <sup>6</sup> Anderson, T. L., Osage, D. A., **API-579: a comprehensive fitness-for-service guide**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 77, pp. 953-963, 2000.
- <sup>7</sup> Da Rosa, E., **Apostila: Mecânica da Fratura e Fadiga**, GRANTE, Departamento De Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

## ANEXOS

<b>Dados de operação:</b>		
Temperatura operação, °C:	To	49
Pressão de operação, kgf/cm <sup>2</sup> :	Po	

<b>Dados de projeto do vaso:</b>		
Pressão projeto, kgf/cm <sup>2</sup> :	Pp	17,4
Temperatura projeto, °C:	Tp	
Diâmetro interno, mm:	D	2279,5
Espessura nominal, mm:	t <sub>c</sub>	19
Perda uniforme espessura, mm:	Δt	0
Corrosão futura, mm:		0
Comprimento do cilindro, mm:	W	6000
Material:		SA 285 Gr C
Alívio de tensões:		
Eficiência de junta soldada:	E	1

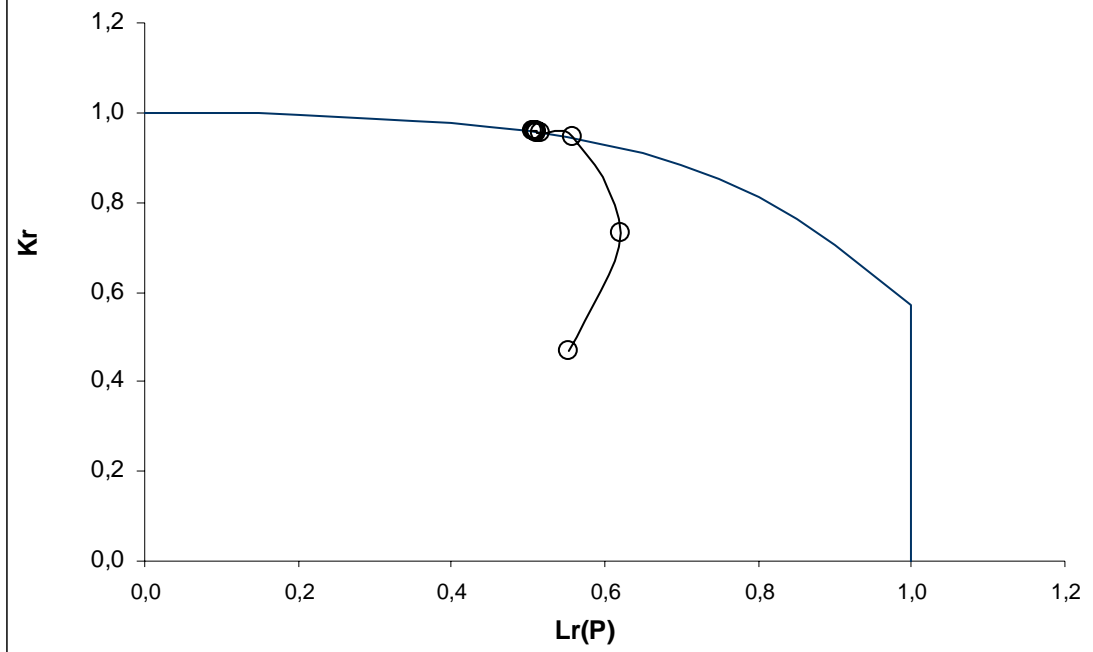
<b>Dados da inspeção:</b>		
Profundidade da trinca, mm:	a	
Comprimento da trinca, mm:	2c	
Ligação, mm:	p	
Tipo de trinca:	Superficial	
Localização da trinca:	Solda longit. casco cilíndrico, interna	
Orientação da trinca:	Paralela a solda	

## API-579, NÍVEL 2 S/ TTAT

API-579, NÍVEL 2 S/ TTAT										
ETAPA										
<b>Dados</b>	<b>TTAT?</b>	<b>NÃO</b>								
	<b>a</b>	[mm]	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2
	<b>2c</b>	[mm]	6000	6000	162	67	49	46,5	34	20,5
<b>Passo 1</b>	<b>T</b>	[°C]	49	49	49	49	49	49	49	49
	<b>P</b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4
<b>Passo 2</b>	<b>P<sub>m</sub></b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9
	<b>P<sub>b</sub></b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>σ<sub>Rm</sub></b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8
	<b>σ<sub>Rb</sub></b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Passo 3</b>	<b>σ<sub>uts</sub></b>	[MPa]	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0
	<b>σ<sub>ys</sub></b>	[MPa]	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0
	<b>σ<sub>ys</sub></b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8
	<b>CVN</b>	[J]	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	<b>E<sub>y</sub></b>	[MPa]	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000
	<b>T<sub>0</sub></b>	[°F]	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0
	<b>T<sub>ref</sub></b>	[°C]	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0
	<b>K<sub>IC</sub></b>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7
<b>Passo 4</b>	<b>a</b>	[mm]	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2
	<b>2c</b>	[mm]	6000	6000	162	67	49	46,5	34	20,5
<b>Passo 5</b>	<b>ΔT</b>	[ °C]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	<b>B0</b>									
	<b>B1</b>									
	<b>B2</b>									
	<b>B3</b>									
	<b>B4</b>									
	<b>B5</b>									
	<b>K<sub>mat( med )/K<sub>IC</sub></sub></b>		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	<b>K<sub>mat( med )</sub></b>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	<b>R<sub>ky</sub></b>	[m <sup>1/2</sup> ]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	<b>PSF<sub>s</sub></b>		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	<b>PSF<sub>k</sub></b>		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	<b>PSF<sub>a</sub></b>		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	<b>P<sub>m</sub></b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9
<b>P<sub>b</sub></b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
<b>K<sub>mat</sub></b>	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	
<b>a</b>	[mm]	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	
<b>Passo 6</b>	<b>α</b>		0,0994	0,1987	0,2430	0,2552	0,2816	0,3302	0,3306	0,2803
	<b>λa</b>		117,2016	82,8740	1,8270	0,6544	0,4280	0,3708	0,2510	0,1416
	<b>Mt</b>		42,1569	33,8382	1,5339	1,0938	1,0468	1,0377	1,0228	1,0141
	<b>Ms</b>		1,108	1,241	1,117	1,036	1,023	1,022	1,016	1,011
	<b>g</b>		0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>σ<sub>ref</sub> (P)</b>	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	1169,1	1309,0	1177,9	1092,4	1079,0	1078,4	1071,6	1066,7
<b>Passo 7</b>	<b>Lr(P)</b>		0,554	0,620	0,558	0,518	0,511	0,511	0,508	0,505
<b>Passo 8</b>	<b>t/R</b>		0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667
	<b>a/c</b>		0,0006333	0,0012667	0,0703704	0,227	0,3877551	0,490	0,782	1,483
	<b>a/t</b>		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80

A0,0		0,3257933	0,6889445	0,9664274	1,1546274	1,3601071	1,2067981			
A1,0		2,2001272	0,3178975	-0,4851658	-1,030489	-1,24358	-1,15622			
A2,0		-1,3068499	3,4719532	3,7057129	3,7779514	2,9804689	2,4926643			
A3,0		0,088907	-6,754086	-4,101444	-2,359389	-2,131047	-4,436039			
A4,0		1,133704	4,926800	-1,221657	-4,921644	-2,195903	5,2129875			
A5,0		-1,479987	-1,016758	4,499535	7,7420044	4,0168671	-3,762934			
A6,0		0,4975488	-0,2841719	-2,0597460	-3,105095	-1,61678	1,2679942			
A0,0										
A1,0										
A2,0										
A3,0										
A4,0										
A5,0										
A6,0										
Q		1,0000077	1,0000243	1,0183542	1,1266367	1,3066627	1,4516856	1,9764625	1,7641762	
$p_c$	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	
$\beta$		1	1	1	1	1	1	1	1	
$G_0$		1,2366051	1,3518036	1,459244	1,3505793	1,3036616	1,2579666	1,1701328	0,825251	
$G_1$										
$K_r(P)$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	9,88	15,28	20,02	20,34	20,38	20,44	17,60	14,05	
$\beta$		0	0	0	0	0	0	0	0	
$G_0$		0,0041686	0,0087093	0,3257933	0,6889445	0,9664274	1,1546274	1,3601071	1,2067981	
$G_1$										
$K_r(P)$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	0,03	0,10	4,47	10,38	15,11	18,76	20,46	20,54	
<b>Passo 9</b>	$\sigma_{ref}(SR)$	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	2339,2	2619,2	2356,9	2185,8	2159,0	2157,9	2144,2	2134,5
<b>Passo 10</b>	$K_r(SR)$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	19,78	30,57	40,05	40,70	40,78	40,90	35,22	28,10
	$K_r(SR)$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	0,07	0,20	8,94	20,76	30,23	37,54	40,93	41,10
<b>Passo 11</b>	$L_r(P)$		0,554	0,620	0,558	0,518	0,511	0,511	0,508	0,505
	$L_r(SR)$		1,108	1,241	1,117	1,036	1,023	1,022	1,016	1,011
	$\Psi$		0,08262	0,09306	0,08326	0,07721	0,07630	0,07626	0,07580	0,07548
	$\phi$		0,56742	0,54238	0,56581	0,58150	0,58400	0,58411	0,58540	0,58632
	$\Phi/\Phi_0$		1,146	1,172	1,147	1,133	1,131	1,131	1,129	1,129
	$\Phi_0$		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$\Phi$		1,146	1,172	1,147	1,133	1,131	1,131	1,129	1,129
<b>Passo 12</b>	$K_r(\varphi=90^\circ)$		0,467	0,733	0,947	0,954	0,954	0,957	0,824	0,657
	$K_r(\varphi=0^\circ)$		0,002	0,005	0,211	0,486	0,707	0,878	0,957	0,961
	$K_r$		0,467	0,733	0,947	0,954	0,954	0,957	0,957	0,961
<b>Passo 13</b>	$L_r(máx)$		1	1	1	1	1	1	1	1

FAD - API-579, nível 2, S/ TTAT

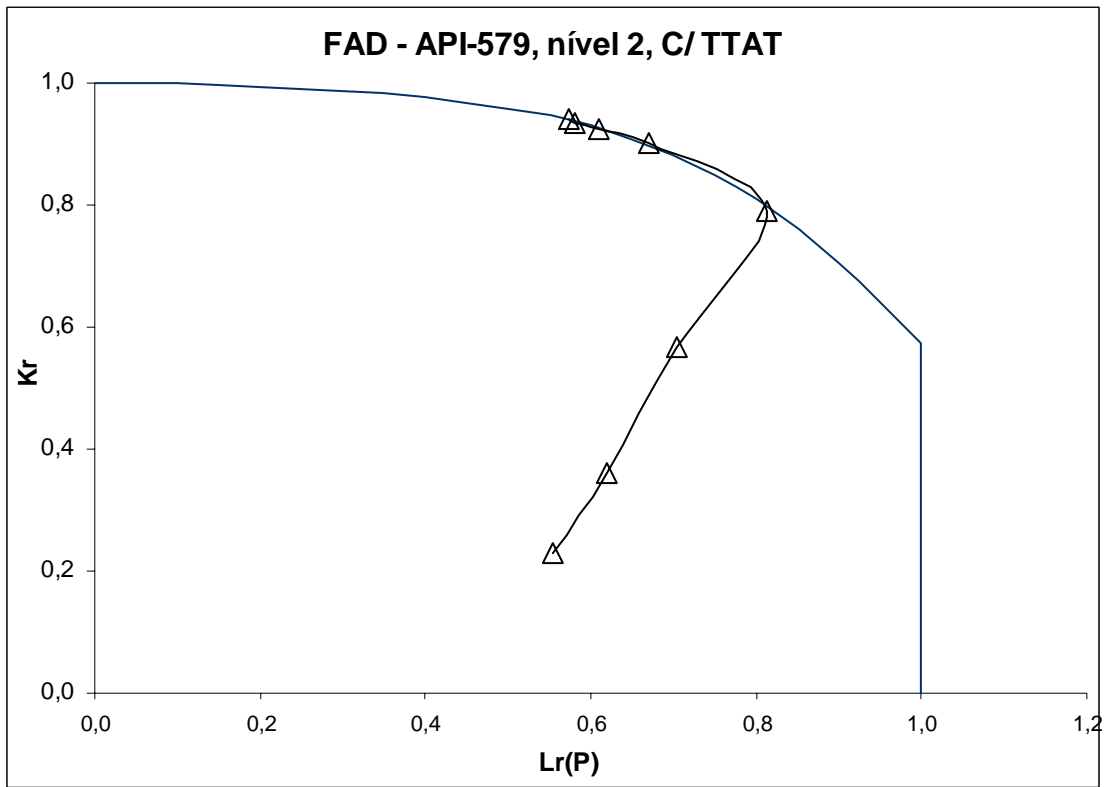


## API-579, NÍVEL 2 C/ TTAT

API-579, NÍVEL 2 C/ TTAT									
ETAPA									
<b>Dados</b>	<b>TTAT?</b>	<b>SIM</b>							
	<b>a</b> [mm]	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2
	<b>2c</b> [mm]	6000	6000	6000	6000	325	200	157	143
<b>Passo 1</b>	<b>T</b> [°C]	49	49	49	49	49	49	49	49
	<b>P</b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4
<b>Passo 2</b>	<b>P<sub>m</sub></b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9
	<b>P<sub>b</sub></b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>σ<sub>Rm</sub></b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2
	<b>σ<sub>Rb</sub></b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	<b>σ<sub>uts</sub></b> [MPa]	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0
<b>Passo 3</b>	<b>σ<sub>ys</sub></b> [MPa]	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0
	<b>σ<sub>ys</sub></b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8
	<b>CVN</b> [J]	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	<b>E<sub>y</sub></b> [MPa]	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000
	<b>T<sub>0</sub></b> [°F]	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0
	<b>T<sub>ref</sub></b> [°C]	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0
	<b>K<sub>IC</sub></b> [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7
	<b>a</b> [mm]	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2
	<b>2c</b> [mm]	6000	6000	6000	6000	325	200	157	143
<b>Passo 5</b>	<b>ΔT</b> [°C]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	<b>B0</b>								
	<b>B1</b>								
	<b>B2</b>								
	<b>B3</b>								
	<b>B4</b>								
	<b>B5</b>								
	<b>K<sub>mat(med)/K<sub>IC</sub></sub></b>	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	<b>K<sub>mat(med)</sub></b> [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	<b>R<sub>ky</sub></b> [m <sup>1/2</sup> ]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	<b>PSF<sub>s</sub></b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	<b>PSF<sub>k</sub></b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	<b>PSF<sub>a</sub></b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	<b>P<sub>m</sub></b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9
	<b>P<sub>b</sub></b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	<b>K<sub>mat</sub></b> [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7
<b>a</b> [mm]	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	
<b>Passo 6</b>	<b>α</b>	0,099	0,199	0,298	0,397	0,448	0,504	0,564	0,632
	<b>λa</b>	117,2016	82,8740	67,6664	58,6008	2,8391	1,5949	1,1591	0,9876
	<b>Mt</b>	42,1569	33,8382	29,0804	25,9050	2,0248	1,4298	1,2522	1,1914
	<b>Ms</b>	1,108	1,241	1,408	1,625	1,339	1,220	1,164	1,147
	<b>g</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>σ<sub>ref</sub> (P)</b> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	1169,1	1309,0	1485,1	1714,1	1412,3	1287,0	1228,1	1210,5
<b>Passo 7</b>	<b>Lr(P)</b>	0,554	0,620	0,704	0,812	0,669	0,610	0,582	0,573
<b>Passo 8</b>	<b>t/R</b>	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667
	<b>a/c</b>	0,0006333	0,0012667	0,0019	0,00253	0,05846	0,114	0,169	0,213
	<b>a/t</b>	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80



A0,0					0,359316	0,6016908	0,8859131	1,1242049				
A1,0					3,0414004	2,2191081	1,0896047	0,0109716				
A2,0					3,5538804	-0,958171	3,5845522	7,4392569				
A3,0					7,777002	4,1150867	-5,528236	-14,2296				
A4,0					-8,160228	-9,114865	-0,396006	9,3806074				
A5,0					2,601009	7,3628754	4,1059424	-1,32386				
A6,0					0,0644935	-2,179682	-1,778004	-0,520685				
A0,0												
A1,0												
A2,0												
A3,0												
A4,0												
A5,0												
A6,0												
Q					1,0000077	1,0000243	1,0000474	1,0000761	1,0135169	1,040685	1,0782278	1,113757
$\rho_c$	[kgf/cm <sup>2</sup> ]				0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
$\beta$					1	1	1	1	1	1	1	1
G <sub>0</sub>					1,2366051	1,3518036	1,7074958	2,0601138	2,129113	2,0460432	1,963767	1,8808951
G <sub>1</sub>												
K <sub>I</sub> (P)	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]				9,88	15,28	23,64	32,93	37,80	39,27	39,99	40,29
$\beta$					0	0	0	0	0	0	0	0
G <sub>0</sub>					0,0041686	0,0087093	0,0137457	0,0192367	0,359316	0,6016908	0,8859131	1,1242049
G <sub>1</sub>												
K <sub>I</sub> (P)	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]				0,03	0,10	0,19	0,31	6,38	11,55	18,04	24,08
<b>Passo 9</b>	$\sigma_{ref}$ (SR)	[kgf/cm <sup>2</sup> ]			467,8	523,8	594,3	686,0	565,2	515,1	491,5	484,4
<b>Passo 10</b>	K <sub>I</sub> (SR)	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]			3,96	6,11	9,46	13,18	15,12	15,71	16,00	16,12
	K <sub>I</sub> (SR)	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]			0,01	0,04	0,08	0,12	2,55	4,62	7,22	9,64
<b>Passo 11</b>	Lr(P)				0,554	0,620	0,704	0,812	0,669	0,610	0,582	0,573
	Lr(SR)				0,222	0,248	0,282	0,325	0,268	0,244	0,233	0,229
	$\Psi$				0,02566	0,02752	0,02881	0,02735	0,02846	0,02727	0,02651	0,02627
	$\phi$				0,04701	0,04494	0,04241	0,04003	0,04342	0,04527	0,04615	0,04641
	$\Phi/\Phi_0$				1,546	1,612	1,679	1,683	1,655	1,602	1,574	1,566
	$\Phi_0$				1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$\Phi$				1,546	1,612	1,679	1,683	1,655	1,602	1,574	1,566
<b>Passo 12</b>	K <sub>r</sub> ( $\varphi=90^\circ$ )				0,230	0,361	0,567	0,791	0,902	0,925	0,936	0,941
	K <sub>r</sub> ( $\varphi=0^\circ$ )				0,001	0,002	0,005	0,007	0,152	0,272	0,422	0,562
	K <sub>r</sub>				0,230	0,361	0,567	0,791	0,902	0,925	0,936	0,941
<b>Passo 13</b>	Lr(máx)				1	1	1	1	1	1	1	1



## INTERPOLAÇÕES DOS “INFLUENCE COEFFICIENTS” – $G_0$ (TABELA C.12 DO API-579)

Interpolações de a/t.			$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	
t/R	a/c	a/t								
0,01667	0,03125	0	$G_0$	0,19650	2,93735	-5,25828	7,48892	-6,92827	3,36733	-0,66780
		0,1	$G_0$	0,20569	2,70483	-3,23815	1,68812	1,78423	-3,15336	1,22669
		0,2	$G_0$	0,21487	2,47232	-1,21802	-4,11268	10,49672	-9,67406	3,12118
		0,3	$G_0$	0,22608	2,76446	-2,30621	-0,48245	6,82487	-8,73029	3,28942
		0,4	$G_0$	0,23730	3,05660	-3,39440	3,14777	3,15302	-7,78652	3,45766
		0,5	$G_0$	0,26553	3,32180	-3,61840	5,79599	0,84650	-8,36022	4,18480
		0,6	$G_0$	0,29377	3,58700	-3,84240	8,44420	-1,46003	-8,93392	4,91193
		0,5	$G_0$	0,198735	3,802199	-10,1652	26,2487	-36,991	27,83892	-8,9734
		0,8	$G_0$	0,483835	3,156615	8,803117	-27,1648	69,60191	-82,4796	32,6826
0,06250		0	$G_0$							
		0,1	$G_0$	0,142855	1,032724	-0,49469	-0,69037	1,40032	-1,0103	0,244633
		0,2	$G_0$	0,28571	2,06545	-0,98938	-1,38075	2,80064	-2,02060	0,48927
		0,3	$G_0$	0,307247	2,328803	-1,70132	0,841336	0,424055	-1,17695	0,451863
		0,4	$G_0$	0,32878	2,59216	-2,41326	3,06342	-1,95253	-0,33330	0,41446
		0,5	$G_0$	0,37323	2,99979	-3,54431	8,07100	-9,49692	4,22776	-0,54700
		0,6	$G_0$	0,41769	3,40742	-4,67535	13,07859	17,04130	8,78883	-1,50846
		0,7	$G_0$	0,208843	1,703708	-2,33768	6,539295	-8,52065	4,394414	-0,75423
		0,8	$G_0$							
0,125		0	$G_0$	0,40652	0,77725	3,88616	-12,57394	16,76021	-11,01459	2,87070
		0,1	$G_0$	0,41036	0,95587	2,81506	-9,39860	12,27546	-7,96092	2,05484
		0,2	$G_0$	0,41420	1,13449	1,74395	-6,22325	7,79071	-4,90724	1,23898
		0,3	$G_0$	0,454523	1,306966	1,431237	-5,13383	6,0595	-3,5834	0,814663
		0,4	$G_0$	0,494848	1,479444	1,118527	-4,04441	4,328286	-2,25956	0,39035
		0,5	$G_0$	0,567921	1,72237	0,477159	-0,92193	-1,54678	2,399372	-0,96635
		0,6	$G_0$	0,64099	1,96530	-0,16421	2,20055	-7,42184	7,05830	-2,32305
		0,7	$G_0$	0,78834	1,91959	1,86523	-1,93442	-4,68313	6,37398	-2,16683
		0,8	$G_0$	0,93568	1,87388	3,89467	-6,06939	-1,94441	5,68965	-2,01061
0,25		0	$G_0$							
		0,1	$G_0$	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
		0,2	$G_0$							
		0,3	$G_0$	0,36651	0,02705	2,00322	-3,68474	2,53136	-0,36726	-0,21868
		0,4	$G_0$	0,73303	0,05410	4,00643	-7,36947	5,06273	-0,73451	-0,43736
		0,5	$G_0$	0,827027	0,003767	4,229309	-6,87319	2,801543	1,785161	-1,34937
		0,6	$G_0$	0,92103	-0,04657	4,45219	-6,37691	0,54036	4,30483	-2,26137
		0,7	$G_0$	1,06288	-0,41567	6,70275	-12,04606	7,37920	-0,00741	-1,07282
		0,8	$G_0$	1,20473	-0,78476	8,95331	-17,71520	14,21804	-4,31965	0,11573

0,5	0	G <sub>0</sub>							
	0,1	G <sub>0</sub>	0	0	0	0	0	0	
	0,2	G <sub>0</sub>							
	0,3	G <sub>0</sub>	0,497996	-0,3485	1,403679	-0,74418	-1,92903	2,77104	-1,06904
	0,4	G <sub>0</sub>	0,99599	-0,69700	2,80736	-1,48836	-3,85805	5,54208	-2,13808
	0,5	G <sub>0</sub>	1,08001	-0,88356	3,27908	-1,84299	-4,49982	6,71125	-2,63858
	0,6	G <sub>0</sub>	1,16403	-1,07011	3,75080	-2,19761	-5,14159	7,88041	-3,13907
	0,7	G <sub>0</sub>	1,258628	-1,2404	4,206477	-3,46369	-2,99477	5,924542	-2,42183
	0,8	G <sub>0</sub>	1,35322	-1,41068	4,66215	-4,72976	-0,84795	3,96867	-1,70458
1	0	G <sub>0</sub>							
	0,1	G <sub>0</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,2	G <sub>0</sub>							
	0,3	G <sub>0</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,4	G <sub>0</sub>							
	0,5	G <sub>0</sub>	0,69258	-0,58230	1,05125	-0,71311	-0,63318	1,25970	-0,53072
	0,6	G <sub>0</sub>	1,38516	-1,16460	2,10250	-1,42622	-1,26635	2,51939	-1,06144
	0,7	G <sub>0</sub>	1,43833	-1,24604	2,03542	-1,10381	-1,58011	2,54637	-0,99623
	0,8	G <sub>0</sub>	1,49150	-1,32747	1,96834	-0,78139	-1,89387	2,57335	-0,93101
2	0	G <sub>0</sub>							
	0,1	G <sub>0</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,2	G <sub>0</sub>							
	0,3	G <sub>0</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,4	G <sub>0</sub>							
	0,5	G <sub>0</sub>	0,42497	-0,17780	-0,36601	1,72952	-3,20446	2,56823	-0,71693
	0,6	G <sub>0</sub>	0,84994	-0,35561	-0,73202	3,45905	-6,40892	5,13646	-1,43386
	0,7	G <sub>0</sub>	0,87595	-0,66424	1,16102	-2,44503	3,20672	-2,70539	1,09431
	0,8	G <sub>0</sub>	0,90196	-0,97286	3,05406	-8,34910	12,82235	-10,54723	3,62248

## INTERPOLAÇÕES DE $a/c$ PARA AS AVALIAÇÕES S/TTAT (TABELA C.12 DO API-579)

	$a/c$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$a/t$	<b>0,06250</b>	0,30725	2,32880	-1,70132	0,84134	0,42406	-1,17695	0,45186
0,3	<b>0,07037</b>	0,32579	2,20013	-1,30685	0,08891	1,13370	-1,47999	0,49755
	<b>0,125</b>	0,45452	1,30697	1,43124	-5,13383	6,05950	-3,58340	0,81466
$a/t$	$a/c$							
	<b>0,125</b>	0,49485	1,47944	1,11853	-4,04441	4,32829	-2,25956	0,39035
0,4	<b>0,22687</b>	0,68894	0,31790	3,47195	-6,75409	4,92680	-1,01676	-0,28417
	<b>0,25</b>	0,73303	0,05410	4,00643	-7,36947	5,06273	-0,73451	-0,43736
$a/t$	$a/c$							
	<b>0,25</b>	0,82703	0,00377	4,22931	-6,87319	2,80154	1,78516	-1,34937
0,5	<b>0,388</b>	0,96643	-0,48517	3,70571	-4,10144	-1,22166	4,49953	-2,05975
	<b>0,5</b>	1,08001	-0,88356	3,27908	-1,84299	-4,49982	6,71125	-2,63858
$a/t$	$a/c$							
	<b>0,25</b>	0,92103	-0,04657	4,45219	-6,37691	0,54036	4,30483	-2,26137
0,6	<b>0,490</b>	1,15463	-1,03049	3,77795	-2,35939	-4,92164	7,74200	-3,10509
	<b>0,5</b>	1,16403	-1,07011	3,75080	-2,19761	-5,14159	7,88041	-3,13907
$a/t$	$a/c$							
	<b>0,5</b>	1,25863	-1,24040	4,20648	-3,46369	-2,99477	5,92454	-2,42183
0,7	<b>0,782</b>	1,36011	-1,24358	2,98047	-2,13105	-2,19590	4,01687	-1,61678
	<b>1</b>	1,43833	-1,24604	2,03542	-1,10381	-1,58011	2,54637	-0,99623
$a/t$	$a/c$							
	<b>1</b>	1,49150	-1,32747	1,96834	-0,78139	-1,89387	2,57335	-0,93101
0,8	<b>1,483</b>	1,20680	-1,15622	2,49266	-4,43604	5,21299	-3,76293	1,26799
	<b>2</b>	0,90196	-0,97286	3,05406	-8,34910	12,82235	-10,54723	3,62248

**INTERPOLAÇÕES DE  $a/c$  PARA AS AVALIAÇÕES C/TTAT  
(TABELA C.12 DO API-579)**

	$a/c$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$a/t$	<b>0,03125</b>	0,26553	3,32180	-3,61840	5,79599	0,84650	-8,36022	4,18480
0,5	<b>0,05846</b>	0,35932	3,04140	-3,55388	7,77700	-8,16023	2,60101	0,06449
	<b>0,06250</b>	0,37323	2,99979	-3,54431	8,07100	-9,49692	4,22776	-0,54700
	$a/c$							
$a/t$	<b>0,06250</b>	0,41769	3,40742	-4,67535	13,07859	-17,04130	8,78883	-1,50846
0,6	<b>0,11400</b>	0,60169	2,21911	-0,95817	4,11509	-9,11486	7,36288	-2,17968
	<b>0,125</b>	0,64099	1,96530	-0,16421	2,20055	-7,42184	7,05830	-2,32305
	$a/c$							
$a/t$	<b>0,125</b>	0,78834	1,91959	1,86523	-1,93442	-4,68313	6,37398	-2,16683
0,7	<b>0,169</b>	0,88591	1,08960	3,58455	-5,52824	-0,39601	4,10594	-1,77800
	<b>0,25</b>	1,06288	-0,41567	6,70275	-12,04606	7,37920	-0,00741	-1,07282
	$a/c$							
$a/t$	<b>0,125</b>	0,93568	1,87388	3,89467	-6,06939	-1,94441	5,68965	-2,01061
0,8	<b>0,213</b>	1,12420	0,01097	7,43926	-14,22960	9,38061	-1,32386	-0,52069
	<b>0,25</b>	1,20473	-0,78476	8,95331	-17,71520	14,21804	-4,31965	0,11573

## INFLUENCE COEFFICIENTS FOR A LONGITUDINAL INFINITE LENGTH SURFACE CRACK IN A CYLINDRICAL SHELL (Table C.10)

$t/R_i$	$a/c$	$a/t$	$G_0(L)$
0,01667	0	0	1,12
		0,1	1,23699
		0,2	1,353978
		0,3	1,71537
		0,4	2,076759
		0,5	2,96700
		0,6	3,85725
		0,7	6,83775
		0,8	9,818255

### S/ TTAT

		$P/\varphi=0$	$P/\varphi=\pi/2$
$a/t$	$a/c$	$G_0$	$G_0$
	0	0,00000	1,23699
0,1	0,00063	0,00417	1,23661
	0,03125	0,20569	1,21804
$a/t$	$a/c$	$G_0$	$G_0$
	0	0,00000	1,35398
0,2	0,00127	0,00871	1,35180
	0,03125	0,21487	1,30033

### C/ TTAT

		$P/\varphi=0$	$P/\varphi=\pi/2$
$a/t$	$a/c$	$G_0$	$G_0$
	0	0,00000	1,23699
0,1	0,00063	0,00417	1,23661
	0,03125	0,20569	1,21804
$a/t$	$a/c$	$G_0$	$G_0$
	0	0,00000	1,35398
0,2	0,00127	0,00871	1,35180
	0,03125	0,21487	1,30033
$a/t$	$a/c$	$G_0$	$G_0$
	0	0,00000	1,71537
0,3	0,00190	0,01375	1,70750
	0,03125	0,22608	1,58588
$a/t$	$a/c$	$G_0$	$G_0$
	0	0,00000	2,07676
0,4	0,00253	0,01924	2,06011
	0,03125	0,23730	1,87143

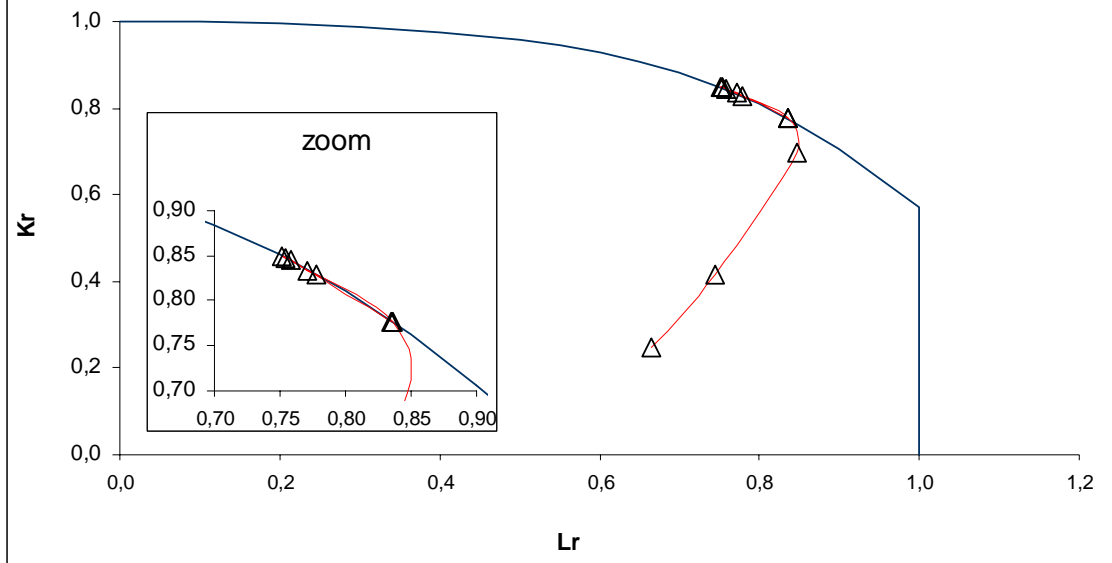
## BS-7910, NÍVEL 2A C/ TTAT

Dados	TTAT?	SIM										
			1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	14,25	15,2	17,1
			6000	6000	6000	521	236	157,5	118	104,5	93	71
<b>Passo 1</b>	$P_m$	kgf/cm <sup>2</sup>	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9
	$P_b$	kgf/cm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$Q_m$	kgf/cm <sup>2</sup>	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2	422,2
	$Q_b$	kgf/cm <sup>2</sup>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Passo 2</b>	$T_{27j}$	°C										
	$T_0$	°C										
	$T_K$	°C										
	$P_f$											
	$K_{mat}$	MPa.m <sup>1/2</sup>	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7
<b>Passo 3</b>	$\sigma_u$	MPa	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0
	$\sigma_u$	kgf/cm <sup>2</sup>	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7
	$\sigma_Y$	MPa	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0
	$\sigma_Y$	kgf/cm <sup>2</sup>	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8
	E	MPa	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000
<b>Passo 4</b>	a	mm	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	14,25	15,2	17,1
	2c	mm	6000	6000	6000	521	236	157,5	118	104,5	93	71
<b>Passo 5</b>	<b>Nível 2A: FAD generalizado</b>											
	$L_{r_{max}}$ calculado		1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	$L_{r_{max}}$ adotado		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
<b>Passo 6</b>	$M_T$		25,700	25,700	25,700	2,444	1,421	1,206	1,120	1,095	1,076	1,045
	M		1,107	1,240	1,412	1,394	1,296	1,256	1,251	1,261	1,284	1,389
	$f_w$		1,067	1,145	1,238	1,002	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	a/c		0,00	0,00	0,00	0,03	0,08	0,14	0,23	0,27	0,33	0,48
	a/2c		0,000	0,001	0,001	0,015	0,040	0,072	0,113	0,136	0,163	0,241
	B/r <sub>i</sub>		0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667
	a/B		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9
	$M_m$		1,170	1,305	1,578	1,810	1,823	1,744	1,625	1,550	1,462	1,213
	$M_b$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$M_{km}$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$M_{kb}$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$k_{tm}$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$k_{tb}$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$k_m$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$(Y\sigma)_p$	kgf/cm <sup>2</sup>	1457,2	1954,8	2910,2	2665,9	2493,9	2312,2	2143,5	2063,4	1979,5	1777,5
	$(Y\sigma)_s$	kgf/cm <sup>2</sup>	494,0	551,0	666,1	764,0	769,4	736,4	685,8	654,5	617,1	512,1
	$Y\sigma$	kgf/cm <sup>2</sup>	1951,2	2505,8	3576,3	3429,9	3263,3	3048,6	2829,3	2717,9	2596,6	2289,6
<b>Passo 7</b>	$K_I^p$	MPa.m <sup>1/2</sup>	11,0	20,9	38,2	40,4	42,2	42,9	43,0	42,8	42,4	40,4
	$K_I^s$	MPa.m <sup>1/2</sup>	3,7	5,9	8,7	11,6	13,0	13,7	13,7	13,6	13,2	11,6
	$K_I$	MPa.m <sup>1/2</sup>	14,8	26,8	46,9	52,0	55,3	56,6	56,7	56,4	55,6	52,0



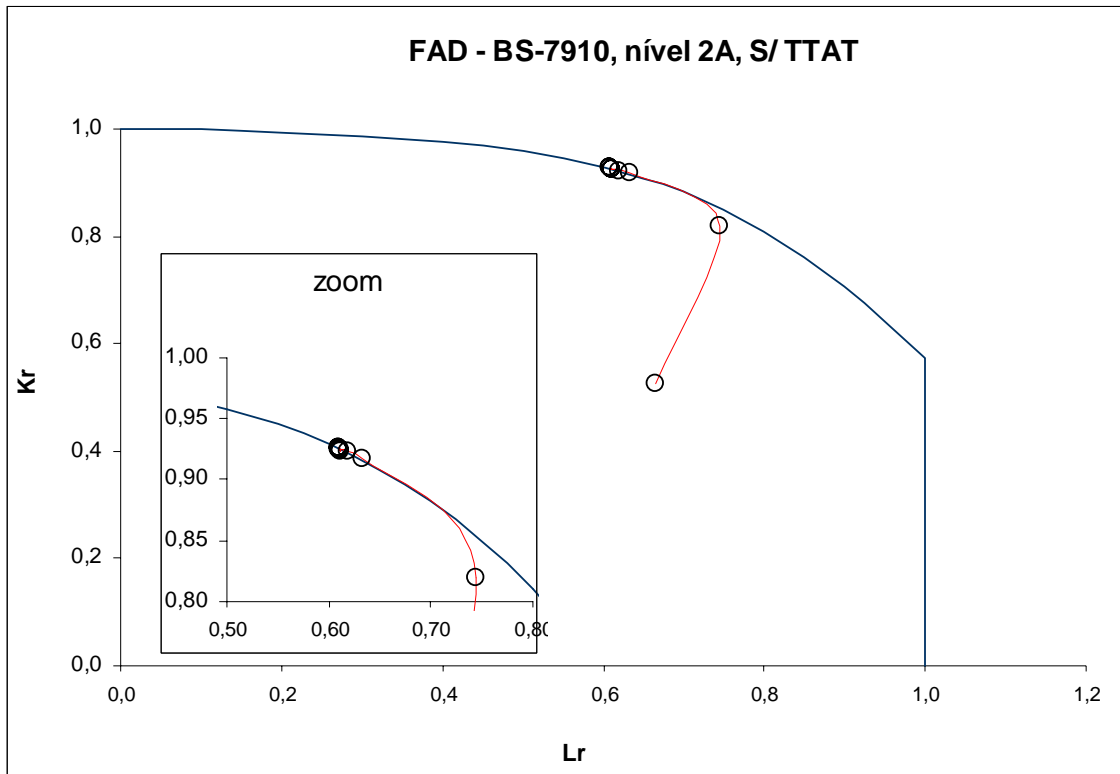
<b>Passo 8</b>	$K_i^3/(K_i^p/L_r)$	0,225	0,210	0,194	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,241
	<b>X</b>	0,225	0,210	0,194	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,241
	$\rho_i$	0,03412	0,03247	0,03073	0,03566	0,03571	0,03572	0,03572	0,03573	0,03575
	$\rho$	0,03412	0,03247	0,02498	0,03046	0,03571	0,03572	0,03572	0,03573	0,03078
	<b>K<sub>r</sub></b>	0,246	0,418	0,699	0,776	0,829	0,848	0,850	0,845	0,834
<b>Passo 9</b>	$\alpha''$	0,0994	0,1987	0,2981	0,3728	0,4307	0,4834	0,5295	0,5500	0,5679
	$M_T$	25,806	25,806	25,806	2,452	1,424	1,208	1,121	1,096	1,077
	$M_S$	1,107	1,240	1,412	1,395	1,298	1,258	1,252	1,263	1,286
	$\sigma_{ref}$	1401,1	1570,1	1787,4	1765,7	1643,1	1592,3	1585,3	1599,3	1627,6
	<b>L<sub>r</sub></b>	0,664	0,744	0,847	0,837	0,778	0,754	0,751	0,758	0,771
										0,835

### FAD - BS-7910, nível 2A, C/TTAT



BS-7910, NÍVEL 2A S/ TTAT												
Dados	TTAT?	NÃO										
		a	mm	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	17,1
		2c	mm	6000	6000	130	52,5	41	37,5	26,5	22,5	19,5
Passo 1	P <sub>m</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	1054,9	
	P <sub>b</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Q <sub>m</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	
	Q <sub>b</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Passo 2	T <sub>27j</sub>	°C										
	T <sub>0</sub>	°C										
	T <sub>K</sub>	°C										
	P <sub>f</sub>											
	K <sub>mat</sub>	MPa.m <sup>1/2</sup>	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	69,7	
Passo 3	σ <sub>u</sub>	MPa	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	379,0	
	σ <sub>u</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	3864,7	
	σ <sub>y</sub>	MPa	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	
	σ <sub>y</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	2110,8	
	E	MPa	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	207000	
Passo 4	a	mm	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	17,1	
	2c	mm	6000	6000	130	52,5	41	37,5	26,5	22,5	19,5	
Passo 5	Nível 2A: FAD generalizado											
	L <sub>r</sub> max calculado		1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	
	L <sub>r</sub> max adotado		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Passo 6	M <sub>T</sub>		25,700	25,700	1,144	1,025	1,015	1,013	1,006	1,005	1,003	
	M		1,107	1,240	1,054	1,016	1,015	1,019	1,015	1,018	1,031	
	f <sub>w</sub>		1,067	1,145	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
	a/c		0,00	0,00	0,09	0,29	0,46	0,61	1,00	1,35	1,75	
	a/2c		0,0003	0,0006	0,044	0,145	0,232	0,304	0,502	0,676	0,877	
	B/r <sub>i</sub>		0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667	
	a/B		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
	M <sub>m</sub>		1,170	1,305	1,340	1,187	1,064	0,966	0,899	0,838	0,785	
	M <sub>b</sub>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	M <sub>km</sub>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	M <sub>kb</sub>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	K <sub>tm</sub>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	K <sub>tb</sub>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	K <sub>m</sub>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	(Yσ) <sub>p</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	1457,2	1954,8	1490,1	1272,1	1139,1	1038,8	962,5	900,6	853,8	
(Yσ) <sub>s</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	2470,0	2755,1	2828,4	2504,7	2245,3	2039,9	1897,7	1769,4	1656,7		
Yσ	kgf/cm <sup>2</sup>	3927,2	4709,8	4318,5	3776,8	3384,4	3078,8	2860,2	2670,0	2510,5		
Passo 7	K <sub>i</sub> <sup>p</sup>	MPa.m <sup>1/2</sup>	11,0	20,9	19,6	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,4	
	K <sub>i</sub> <sup>s</sup>	MPa.m <sup>1/2</sup>	18,7	29,5	37,1	38,0	38,0	37,9	38,0	37,9	37,7	
	K <sub>i</sub>	MPa.m <sup>1/2</sup>	29,8	50,5	56,7	57,2	57,3	57,1	57,3	57,2	57,1	
Passo 8	K <sub>i</sub> <sup>s</sup> /(K <sub>i</sub> <sup>p</sup> /L <sub>r</sub> )		1,125	1,048	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	

	<b>X</b>		1,125	1,048	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
	$\rho_i$		0,09998	0,09578	0,10391	0,10390	0,10390	0,10391	0,10390	0,10391	0,10391
	$\rho$		0,09998	0,09578	0,10391	0,10390	0,10390	0,10391	0,10390	0,10391	0,10391
	<b>K<sub>r</sub></b>		0,527	0,820	0,917	0,925	0,927	0,924	0,927	0,925	0,923
<b>Passo 9</b>	$\alpha''$		0,0994	0,1987	0,2321	0,2320	0,2595	0,2980	0,2876	0,2975	0,3052
	M <sub>T</sub>		25,806	25,806	1,145	1,025	1,015	1,013	1,006	1,005	1,004
	M <sub>S</sub>		1,107	1,240	1,054	1,016	1,015	1,019	1,015	1,019	1,031
	$\sigma_{ref}$	kgf/cm <sup>2</sup>	1401,1	1570,1	1334,8	1286,6	1285,1	1290,1	1284,9	1289,4	1305,7
	<b>L<sub>r</sub></b>		0,664	0,744	0,632	0,610	0,609	0,611	0,609	0,611	0,619



## M<sub>m</sub> - MEMBRANE LOADING (Seção M.3.2.2 da BS-7910)

### C/ TTAT

a, mm	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	14,25	15,2	17,1
2c, mm	6000	6000	6000	521	236	157,5	118	104,5	93	71
B, mm	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
c, mm	3000	3000	3000	260,5	118	78,75	59	52,25	46,5	35,5
a/c	0,000633333	0,001267	0,0019	0,029175	0,080508	0,144762	0,225424	0,272727	0,326882	0,48169
c/a	1578,947368	789,4737	526,3158	34,27632	12,42105	6,907895	4,43609	3,666667	3,059211	2,076023
a/2c	0,000316667	0,000633	0,00095	0,014587	0,040254	0,072381	0,112712	0,136364	0,163441	0,240845
a/B	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9
M1*	1,129943	1,129886	1,129829	1,127374	1,122754	1,116971	1,109712	1,105455	1,100581	1,086648
M1*	2549,376226	915,3894	505,9221	13,88156	5,275398	3,354525	2,479935	2,1957	1,96309	1,56049
M1	1,129943	1,129886	1,129829	1,127374	1,122754	1,116971	1,109712	1,105455	1,100581	1,086648
M2*	3,895952816	3,881994	3,868123	3,343501	2,63281	2,041492	1,552032	1,342692	1,149184	0,765579
M2*	1,24308E+12	7,77E+10	1,53E+10	276061,9	4760,621	455,4208	77,45179	36,15062	17,51731	3,715001
M2	3,895952816	3,881994	3,868123	3,343501	2,63281	2,041492	1,552032	1,342692	1,149184	0,765579
M3*	12,75177874	12,54507	12,34138	5,906453	0,998646	-0,42998	-0,61185	-0,57703	-0,52262	-0,38363
M3*	6,83696E+11	-4,3E+10	-8,4E+09	-151834	-2618,34	-250,481	-42,5985	-19,8828	-9,63452	-2,04325
M3	12,75177874	12,54507	12,34138	5,906453	0,998646	-0,42998	-0,61185	-0,57703	-0,52262	-0,38363
g*	1,1035	1,114	1,1315	1,156	1,1875	1,226	1,2715	1,296875	1,324	1,3835
g*	6,626315789	12,15263	17,67895	3,019474	2,186842	1,970395	1,860789	1,821875	1,785263	1,688553
g(0°)	1,1035	1,114	1,1315	1,156	1,1875	1,226	1,2715	1,296875	1,324	1,3835
g*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
g*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
g(90°)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f0*	0,025166115	0,03559	0,043589	0,170806	0,28374	0,380476	0,474788	0,522233	0,571736	0,694039
f0*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f0(0°)	0,025166115	0,03559	0,043589	0,170806	0,28374	0,380476	0,474788	0,522233	0,571736	0,694039
f0*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f0*	39,73597071	28,09757	22,94157	5,854598	3,524351	2,628287	2,106203	1,914854	1,74906	1,440841
f0(90°)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
g.f0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Φ*	1,000003865	1,000012	1,000024	1,002144	1,011394	1,029729	1,060807	1,0824	1,109666	1,199433
Φ*	526,5318368	297,219	212,7177	22,36533	9,722117	6,0431	4,254852	3,672977	3,203741	2,426156
Φ	1,000003865	1,000012	1,000024	1,002144	1,011394	1,029729	1,060807	1,0824	1,109666	1,199433
M <sub>m</sub>	1,170	1,305	1,578	1,810	1,823	1,744	1,625	1,550	1,462	1,213

## M<sub>m</sub> - MEMBRANE LOADING (Seção M.3.2.2 da BS-7910)

### S/ TTAT

a, mm	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	17,1
2c, mm	6000	6000	130	52,5	41	37,5	26,5	22,5	19,5
B, mm	19	19	19	19	19	19	19	19	19
c, mm	3000	3000	65	26,25	20,5	18,75	13,25	11,25	9,75
a/c	0,000633	0,001267	0,087692	0,289524	0,463415	0,608	1,003774	1,351111	1,753846
c/a	1578,947	789,4737	11,40351	3,453947	2,157895	1,644737	0,996241	0,740132	0,570175
a/2c	0,000317	0,000633	0,043846	0,144762	0,231707	0,304	0,501887	0,675556	0,876923
a/B	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
M1*	1,129943	1,129886	1,122108	1,103943	1,088293	1,07528	1,03966	1,0084	0,972154
M1*	2549,376	915,3894	4,917252	2,115244	1,595773	1,366846	1,037893	0,885779	0,772321
M1	1,129943	1,129886	1,122108	1,103943	1,088293	1,07528	1,037893	0,885779	0,772321
M2*	3,895953	3,881994	2,553583	1,278093	0,801544	0,561485	0,199342	0,033782	-0,08449
M2*	1,24E+12	7,77E+10	3382,081	28,4638	4,336617	1,463577	0,197009	0,060016	0,021138
M2	3,895953	3,881994	2,553583	1,278093	0,801544	0,561485	0,197009	0,060016	0,021138
M3*	12,75178	12,54507	0,691527	-0,56054	-0,39813	-0,29491	-0,10468	0,000278	0,099882
M3*	-6,8E+11	-4,3E+10	-1860,14	-15,6551	-2,38514	-0,80497	-0,10836	-0,03301	-0,01163
M3	12,75178	12,54507	0,691527	-0,56054	-0,39813	-0,29491	-0,10836	-0,03301	-0,01163
g*	1,1035	1,114	1,1315	1,156	1,1875	1,226	1,2715	1,324	1,3835
g*	6,626316	12,15263	1,459211	1,293421	1,288816	1,307237	1,270855	1,265789	1,261645
g(0°)	1,1035	1,114	1,1315	1,156	1,1875	1,226	1,270855	1,265789	1,261645
g*	1	1	1	1	1	1	1	1	1
g*	1	1	1	1	1	1	1	1	1
g(90°)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fθ*	0,025166	0,03559	0,296129	0,538074	0,680746	0,779744	1,001885	1,162373	1,324329
fθ*	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fθ(0°)	0,025166	0,03559	0,296129	0,538074	0,680746	0,779744	1	1	1
fθ*	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fθ*	39,73597	28,09757	3,376908	1,85848	1,468977	1,282473	0,998119	0,860309	0,7551
fθ(90°)	1	1	1	1	1	1	0,998119	0,860309	0,7551
g.fθ	1	1	1	1	1	1	1,270855	1,265789	1,261645
Φ*	1,000004	1,000012	1,013109	1,090584	1,188074	1,282241	1,572618	1,845364	2,167802
Φ*	526,5318	297,219	9,067438	3,509672	2,491634	2,080231	1,566822	1,375154	1,256729
Φ	1,000004	1,000012	1,013109	1,090584	1,188074	1,282241	1,566822	1,375154	1,256729
M <sub>m</sub>	1,170	1,305	1,340	1,187	1,064	0,966	0,899	0,838	0,785