

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

**ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE CRESCIMENTO SUBCRÍTICO
DE DESCONTINUIDADES DURANTE A REALIZAÇÃO DE TESTES
HIDROSTÁTICOS EM VASOS DE PRESSÃO E SEUS POSSÍVEIS
EFEITOS.**

FILIPE JOSÉ SOARES MARTINS
ENGENHEIRO METALÚRGICO

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

**ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE CRESCIMENTO SUBCRÍTICO
DE DESCONTINUIDADES DURANTE A REALIZAÇÃO DE TESTES
HIDROSTÁTICOS EM VASOS DE PRESSÃO E SEUS POSSÍVEIS
EFEITOS.**

FILIPE JOSÉ SOARES MARTINS
ENGENHEIRO METALÚRGICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos 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 Engenharia de Inspeção de Equipamentos e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker - PPGEM/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski, PPGEM/UFRGS
Dr. Eduardo Hippert Junior, CENPES/PETROBRAS
Dr. Alexander Hiroshi Kasama, CENPES/PETROBRAS

Prof. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, Julho de 2009.

Dedico esta dissertação aos meus pais, José Martins e Deise.

AGRADECIMENTOS

A PETROBRAS, por investir na qualificação de seu quadro de funcionários.

Ao PPGEM/UFRGS, pela parceria com a PETROBRAS para a realização deste mestrado profissional.

Aos meus pais, por estarem ao meu lado em todos os momentos, transmitindo confiança e segurança.

Aos meus familiares e amigos, por compreenderem os momentos de ausência em função do desenvolvimento do trabalho.

A minha companheira, Evelyn, pela paciência, carinho e dedicação.

Ao professor do PPGEM/UFRGS, Telmo Roberto Strohaecker, pela orientação no desenvolvimento do trabalho.

A Guilherme Donato, pesquisador do Cenpes/Petrobras, por compartilhar sua experiência e conhecimento na área de integridade estrutural.

A Marcus Vinicius Maciel Martins, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de CEINSP, pela harmoniosa convivência durante o curso de formação e desenvolvimento da dissertação, em especial ao meu parceiro de tema, Ricardo Rocha.

A todos os professores e colegas de trabalho que passaram pela Universidade Petrobras ao longo dos últimos 12 meses, transmitindo e compartilhando seu conhecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Vasos de Pressão.....	4
2.1.1 Definições.....	4
2.1.2 Classificação dos Vasos de Pressão.....	4
2.1.3 Aplicações dos Vasos de Pressão.....	5
2.1.4 Principais Componentes de um Vaso de Pressão.....	5
2.1.5 Projeto de Vasos de Pressão.....	6
2.1.5.1 Tensões Admissíveis e Coeficientes de Segurança.....	6
2.1.6 O código ASME.....	7
2.1.6.1 ASME seção VIII – divisão 1.....	7
2.1.6.2 ASME seção VIII – divisão 2.....	8
2.1.6.3 ASME seção VIII – divisão 3.....	9
2.1.7 Categorias de Tensões Atuantes em Vasos de Pressão.....	9
2.1.7.1 Tensões Primárias.....	9
2.1.7.2 Tensões Secundárias.....	10
2.1.7.3 Tensões de Pico.....	10
2.2 Teste Hidrostático.....	11
2.2.1 Definições.....	11
2.2.2 Ocasões de Aplicação de Testes Hidrostáticos.....	11
2.2.3 Teste Hidrostático na Fabricação de Vasos de Pressão.....	12

2.2.4	Teste Hidrostático Periódico de Vasos de Pressão.....	13
2.2.5	Procedimentos Para a Realização de Teste Hidrostático.....	14
2.2.5.1	A Temperatura de Teste Hidrostático.....	15
2.2.5.2	A Pressão de Teste Hidrostático.....	15
2.2.6	Falhas de Vasos de Pressão durante a Realização de Testes Hidrostáticos.....	17
2.3	Mecânica da Fratura.....	23
2.3.1	Introdução.....	23
2.3.2	Definição.....	24
2.3.3	A Mecânica da Fratura Linear-Elastica (MFLE).....	24
2.3.3.1	O Critério de Energia.....	24
2.3.3.2	O Fator de Intensidade de Tensões.....	26
2.3.3.3	Plasticidade na Ponta da Trinca.....	27
2.3.4	A Mecânica da Fratura Elasto-Plástica.....	29
2.3.4.1	A Metodologia do CTOD.....	30
2.3.4.2	A Metodologia da Integral J.....	31
2.3.4.3	O cálculo da Integral J.....	32
2.3.4.4	As Curvas de Resistência J-R.....	34
2.3.4.5	A Integral J como critério de Fratura.....	35
2.4	Avaliação de Integridade Estrutural de Vasos de Pressão.....	36
2.4.1	Mecanismos de Dano e Envelhecimento dos Vasos de Pressão.....	36
2.4.2	Códigos de Projeto x Defeitos.....	38
2.4.3	Reparos.....	38
2.4.4	Avaliação de Integridade Estrutural:Definições.....	39
2.4.5	Técnicas e Métodos para avaliação de Integridade Estrutural e Cálculo da Vida Remanescente de Vasos de Pressão.....	39
2.4.5.1	Avaliação da Vida Remanescente.....	40
2.4.5.2	Análise de probabilidade de falha e vida remanescente de um vaso de pressão.....	42
2.4.6	A Inspeção Baseada em Risco (IBR).....	45
2.4.7	Mecânica da Fratura Aplicada às Estruturas.....	47
2.4.7.1	A Curva de Projeto.....	48

2.4.7.2	O Diagrama de Análise de Falha (FAD)	49
2.4.7.3	A Abordagem da Adequação ao Uso (Fitness for Service)	50
2.4.7.3.1	O Método R6	52
2.4.7.3.2	O PD 6493	52
2.4.7.3.3	A Norma Inglesa BS 7910	53
2.4.7.3.4	ASME FFS-I / API-579	59
3.0	METODOLOGIA	63
3.1	Introdução.....	63
3.2	O equipamento Objeto de Estudo.....	63
3.3	A Presença de Defeitos no Equipamento.....	65
3.4	Dados de Tenacidade e Propriedades Mecânicas	65
3.5	O Procedimento de Análise de Rasgamento Dúctil da BS 7910	68
3.6	Realização das Simulações – O Software Crackwise.....	72
3.7	Considerações finais sobre a proposta de estudo.....	81
4.0	RESULTADOS.....	83
4.1	As Curvas J-R.....	83
4.2	Diagramas FAD.....	84
4.2.1	FADs das análises realizadas em condições de menor tenacidade	85
4.2.2	FADs das análises realizadas em condições de tenacidade média	86
4.2.3	FADs das análises realizadas em condições de maior tenacidade.....	87
4.3	Análise de Criticidade de Defeitos.....	88
4.4	Descrição dos cenários para as Condições Avaliadas.....	89
4.5	Análise e quantificação da extensão da trinca em função das variáveis avaliadas.....	90
5.0	DISCUSSÃO	93
5.1	Curvas de Tenacidade	93
5.2	Avaliação dos resultados da análise de criticidade de defeitos nos níveis 2 e 3, e sua relação com a ocorrência de CSCD	94
5.3	Avaliação dos Diagramas FAD.....	95
5.4	A Influência do expoente de Encruamento	97
5.5	Comentários Gerais sobre testes hidrostáticos, CSCD e Seus Efeitos.....	97

6.0	CONCLUSÕES	104
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Categorias das tensões atuantes em um vaso de pressão.....	11
Figura 2.2	Gráfico de pressão x profundidade de trinca, relacionando os tamanhos críticos de defeito nas condições de operação(a_s) e teste hidrostático(a_{TH})...	19
Figura 2.3	Gráfico de pressão x profundidade de defeito para materiais de alta tenacidade, mostrando a ocorrência de crescimento subcrítico em função do Teste Hidrostático.....	20
Figura 2.4	Variáveis envolvidas nas análises de resistência dos materiais e mecânica da fratura.....	23
Figura 2.5	Esquema de uma placa infinita, com uma trinca passante, sendo tracionada uniaxialmente.....	26
Figura 2.6	Equações para determinação da distribuição de tensões na ponta da trinca..	27
Figura 2.7	Zona de singularidade na ponta da trinca	27
Figura 2.8	Correção da plasticidade na ponta da trinca proposta por Irwin	28
Figura 2.9	Efeito da espessura do corpo de prova sobre a tenacidade à fratura do material.	29
Figura 2.10	Crack tip opening displacement (CTOD).....	30
Figura 2.11	Contorno arbitrário ao redor da trinca, usado na determinação da integral ..	31
Figura 2.12	Relação entre as componentes J_e e J_p na formação do J total em função da carga aplicada	33
Figura 2.13	Curva J-R e etapas de evolução da trinca.....	34
Figura 2.14	Alteração da curva R a partir de JIC, em função da diferença do expoente de encruamento do material	35
Figura 2.15	Diferença entre os tempos de operação estimados para situações otimistas e pessimistas na avaliação de integridade estrutural	41
Figura 2.16	Variabilidade na distribuição dos valores de tenacidade à fratura	42
Figura 2.17	Curva de distribuição de tamanhos de defeitos	43

Figura 2.18	Gráfico da probabilidade de falha em função do tempo.....	44
Figura 2.19	Gráficos de estimativa de probabilidade de falha em função do tempo (a) e da pressão atuante no equipamento (b)	44
Figura 2.20	Exemplo de comportamento de crescimento de defeito em função do tempo.....	45
Figura 2.21	Matriz de risco apresentada na norma API 581	46
Figura 2.22	A Curva de Projeto CTOD	49
Figura 2.23	Exemplo de um diagrama FAD	50
Figura 2.24	Exemplo de diagrama FAD de nível 1 da BS 7910.....	55
Figura 2.25	Exemplo de diagrama FAD de nível 2 da BS 7910.....	56
Figura 2.26	Exemplo de diagrama FAD nível 3 e a evolução de defeitos por rasgamento dúctil.	57
Figura 2.27	Exemplo de diagrama FAD nível 2 do API 579.....	62
Figura 3.1	Possíveis resultados de uma análise de rasgamento dúctil	69
Figura 3.2	Tela de apresentação do software crackwise	74
Figura 3.3	Primeira aba da interface do crackwise – Dados da análise	74
Figura 3.4	Seleção das geometrias da estrutura e do defeito	75
Figura 3.5	Aba para dimensionamento do defeito	75
Figura 3.6	Aba para considerações e cálculos de desalinhamento	76
Figura 3.7	Aba para definições das tensões primárias atuantes do equipamento	76
Figura 3.8	Aba para definição das tensões secundárias atuantes no equipamento	77
Figura 3.9	Aba das propriedades de tração do material do equipamento	78
Figura 3.10	Aba tenacidade	79
Figura 3.11	Aba para análise de parâmetros críticos e sensibilidade.....	79
Figura 3.12	Aba dos fatores de segurança parciais.....	80
Figura 3.13	Aba dos resultados da análise de fratura	81
Figura 4.1	Curva J-R para condições de menor tenacidade.....	83
Figura 4.2	Curva J-R para as condições de tenacidade média	83
Figura 4.3	Curva J-R para as condições de maior tenacidade	84
Figura 4.4	FAD para condição de menor tenacidade e expoente de encruamento 5	85

Figura 4.5	FAD para condição de menor tenacidade e expoente de encruamento 10	85
Figura 4.6	FAD para condição de menor tenacidade e expoente de encruamento 20	85
Figura 4.7	FAD para condição de tenacidade média e expoente de encruamento 5.....	86
Figura 4.8	FAD para condição de tenacidade média e expoente de encruamento 10.....	86
Figura 4.9	FAD para condição de tenacidade média e expoente de encruamento 20.....	86
Figura 4.10	FAD para condições de maior tenacidade e expoente de encruamento 5	87
Figura 4.11	FAD para condições de maior tenacidade e expoente de encruamento 10 ...	87
Figura 4.12	FAD para condições de maior tenacidade e expoente de encruamento 20 ...	87
Figura 4.13	Avaliação do tamanho crítico de defeito nos níveis 2 e 3 e expoente de encruamento 5.....	88
Figura 4.14	Avaliação do tamanho crítico de defeito nos níveis 2 e 3 e expoente de encruamento 10.....	88
Figura 4.15	Avaliação do tamanho crítico de defeito nos níveis 2 e 3 e expoente de encruamento 20.....	89
Figura 4.16	Gráfico da extensão de defeito em função do tamanho de trinca para expoente de encruamento 5.....	91
Figura 4.17	Gráfico da extensão de defeito em função do tamanho de trinca para expoente de encruamento 10.....	91
Figura 4.18	Gráfico da extensão de defeito em função do tamanho de trinca para expoente de encruamento 20.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Critérios para determinação de tensões admissíveis no código ASME seção VIII Divisão 1	8
Tabela 2.2	Critérios para determinação de tensões admissíveis no código ASME seção VIII Divisão 2	8
Tabela 3.1	Dados do equipamento utilizado no estudo.....	64
Tabela 3.2	Valores de tensões residuais de soldagem recomendados pela BS 7910	64
Tabela 3.3	Valores dos parâmetros das curvas J-R de resistência ao rasgamento dúctil segundo ASME FFS I / API 579	67
Tabela 3.4	Parâmetros usados para levantamento das curvas J-R.....	67
Tabela 3.5	Propriedades mecânicas do aço SA 516 Gr 60.....	68
Tabela 4.1	Valores de J_{IC} das curvas de tenacidade.	84
Tabela 4.2	Cenários Esperados para as Condições Avaliadas	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

API – American Petroleum Institute

BS –British Standard

ASME – American Society of Mechanical Engineers

CSCD –Crescimento Subcrítico de Descontinuidade

CTOD – Crack Tip Opening Displacement

END – Ensaio Não-Destrutivo

EPD –Estado Plano de Deformação

FAD – “Failure Analysis Diagram” – Diagrama de Análise de Falha

IBR – Inspeção Baseada em Risco

MFEP – Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

MFLE – Mecânica da Fratura Linear-Elástica

NR-13 – Norma Regulamentadora nº13 do Ministério do Trabalho e Emprego.

PH – Profissional Habilitado

PMO – Pressão Máxima de Operação

PMTA – Pressão Máxima de Trabalho Admissível

PSV – Válvula de Segurança

POD – Probabilidade de detecção

SCG – Stable Crack Growth

SPIE – Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos

TH –Teste Hidrostático

SÍMBOLOS

a – Profundidade da Trinca Avaliada

A_C – Tamanho crítico de trinca

A_i – Tamanho inicial de trinca.

a_s - Tamanho de Defeito Crítico nas Condições Operacionais
 a_{TH} - Tamanho de Defeito Crítico Para Condições de Teste Hidrostático
 C - Constante usada para determinação da curva J-R
 E - Módulo de Elasticidade
 f_w - Fator de correção para comprimento infinito
 G - Taxa de Liberação de Energia Elástica
 J_{el} - Parcela Elástica de J
 J_p - Parcela Plástica de J
 K - Fator de Intensidade de Tensões
 K_{IC} - Tenacidade a fratura do material para condições de deformação plana no modo I de Carregamento.
 K_m - Fator de correção das tensões devido ao desalinhamento
 K_{tb} - Fator de concentração de tensões devido às tensões de flexão
 K_{tm} - Fator de Concentração devido às tensões de membrana
 $L_r - \sigma_{ref} / S_y$
 M - Fator de correção para a curvatura
 M_b - Fator geométrico para tensões de membrana
 M_{kb} - Fator de Concentração de tensões na Margem do cordão de solda para tensões de Flexão.
 M_{km} - Fator de Concentração de tensões na Margem do cordão de solda para tensões de membrana.
 M_m - Fator geométrico para tensões de membrana
 P - Pressão interna aplicada
 P_b - Tensão primária devida à flexão
 P_m - Tensão primária de membrana
 PSF - Partial Safety Factor (Fator de Segurança Parcial)
 P_{TH} - Pressão de Teste Hidrostático
 Q - Tensões Secundárias
 Q_b - Tensão secundária de flexão
 Q_m - Tensão secundária de membrana
 R - Raio interno do equipamento
 r_p - Raio da zona plástica
 S - Tensão admissível do material
 S_f - Tensão Admissível na Temperatura Ambiente

S_q – Tensão Admissível na Temperatura de Operação
 S_r – Limite de resistência do material
 S_y – Limite de escoamento do material
 T – temperatura de TH
 T_f – Tempo de vida do equipamento até a falha.
 T_i – Tempo de operação em que se realiza a análise de vida remanescente.
 Y - Fator geométrico para cálculo do fator de intensidade de tensões
 $(Y\sigma)_p$ - Fatores geométricos e tensões primárias
 $(Y\sigma)_s$ - Fatores geométricos e tensões secundárias
 δ - valor do CTOD do material
 Δa – Extensão da trinca
 ϵ_0 - Deformação específica para tensão de escoamento, igual a σ_{LE}
 ρ - Fator de interação de plasticidade
 σ - tensão nominal aplicada
 σ_y – Tensão de escoamento do material
 σ_{LE} – Tensão de Escoamento do Material.
 σ_{ref} - Tensão de referência para cálculo do L_r
 ν - Coeficiente de Poisson

RESUMO

Embora seja extensivamente utilizado em todo o mundo, há uma grande discussão entre os profissionais da área de inspeção de equipamentos sobre os reais benefícios da realização do teste hidrostático como ferramenta para avaliação de integridade de vasos de pressão. Um dos principais argumentos contra a realização de testes hidrostáticos é o perigo da ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades (CSCD), sem que este fenômeno seja percebido, causando a redução da vida remanescente do equipamento. Este trabalho tem como objetivo estudar as condições para ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades (CSCD) em um vaso de pressão durante a realização de teste hidrostático e seus possíveis efeitos. O objeto de estudo é um vaso de pressão, com características típicas de um vaso de refinaria de petróleo, contendo defeitos em sua estrutura (em seu costado). O trabalho consistiu, basicamente, de simulações realizadas com auxílio do programa crackwise, baseadas no procedimento de análise de rasgamento dúctil da norma inglesa BS 7910, verificando em que condições a aplicação do TH influenciaria no comportamento futuro do equipamento, causando CSCD e reduzindo sua vida remanescente. Através da variação de valores das profundidades das trincas, dos expoentes de encruamento do material e da tenacidade à fratura do material, foram quantificados os valores de extensão dúctil das trincas e analisadas as alterações nos diagramas FADs gerados para as condições avaliadas.

Palavras-chave: Vasos de Pressão, Teste Hidrostático, Integridade Estrutural, Crescimento subcrítico de descontinuidades.

ABSTRACT

Although it is widely used around the world, there is a great discussion among professionals in the field of equipment inspection of the real benefits of performing hydrostatic testing as a tool for assessing the integrity of pressure vessels. One of the main arguments against hydrostatic testing is the danger of the occurrence of stable crack growth (SCG), without this phenomenon been perceived, resulting in the reduction of the equipment remaining life. This work aims to study the conditions for the occurrence of stable crack growth (SCG) in a pressure vessel during the performance of a hydrostatic test and its possible effects. The object of study is a pressure vessel, with typical characteristics of oil refinery vessels, having cracks in its structure. The work basically consisted of simulations using the Crackwise software. The study was based on the procedure of ductile tearing analysis of the British standard BS 7910, to verify which conditions used during the hydrostatic test influence the future behavior of the equipment, causing SCG and reducing its remaining life. Varying crack depths values, the hardening exponents and the fracture toughness of the material, the crack ductile extension was quantified and the changes in the FAD diagrams generated were analyzed.

1.0 INTRODUÇÃO

Os vasos de pressão representam a categoria de equipamentos de maior importância na indústria do petróleo, refinarias, petroquímicas e indústria química. Em geral, fazem parte de uma cadeia contínua, formada por diversos equipamentos, que trabalham submetidos a rigorosas condições operacionais de forma ininterrupta por meses a fio, sem paradas para inspeção ou manutenção. A paralisação não programada de qualquer destes equipamentos, por qualquer que seja o motivo, resulta em grandes perdas de produção e lucros cessantes. As falhas, por sua vez, podem levar a acidentes de proporções incalculáveis, com grandes danos materiais e ambientais e, em certos casos, à perda de vidas humanas.

Em oposição ao pensamento arcaico de que inspeção e manutenção eram males necessários, que não agregavam valor ao produto e ainda traziam custos, a visão moderna apresenta a inspeção e a manutenção como atividades estratégicas para aumentar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, evitar as paradas não planejadas, agregar valor ao processo e reduzir custos. Os profissionais de manutenção e inspeção de equipamentos, cientes dos riscos envolvidos na operação dos vasos de pressão, devem utilizar todas as técnicas e recursos disponíveis para mantê-los sempre em condições de realizar com plenitude as atividades para as quais foram projetados. Deste modo é possível aumentar a confiabilidade operacional, estender a vida útil dos equipamentos e minimizar a possibilidade de ocorrência de falhas.

Diversas técnicas e métodos são utilizados para a inspeção e monitoração do estado de integridade de equipamentos industriais. A escolha da técnica mais adequada deve ser realizada em função dos mecanismos de danos atuantes, dos tipos de defeitos que se deseja detectar e do material de fabricação do equipamento submetido à inspeção. Uma técnica amplamente utilizada para a confirmação da estanqueidade e integridade dos vasos de pressão é o teste hidrostático (TH). Por exigência do código de projeto do equipamento, o teste hidrostático é realizado ao término da fabricação do mesmo ou após a conclusão de um serviço de reparo ou alteração de projeto. Testes hidrostáticos também podem ser

realizados periodicamente para fins de confirmação de integridade caso seja legalmente exigido. No caso do Brasil, a norma regulamentadora do Ministério do Trabalho e do Emprego aplicada a caldeiras e vasos de pressão, NR-13, obriga que os vasos enquadrados em seu escopo sejam submetidos periodicamente a testes hidrostáticos.

Embora seja extensivamente utilizado em todo o mundo, há uma grande discussão entre os profissionais da área de inspeção de equipamentos sobre os reais benefícios da realização do TH como teste para avaliação de integridade de vasos de pressão. No Brasil, particularmente, por conta da exigência de realização de teste hidrostático periódico pela NR-13, os profissionais responsáveis pelos equipamentos são colocados frente a um dilema quando há suspeita de que a realização do teste será prejudicial ao equipamento, principalmente quando são detectados defeitos antes da realização do teste. Há diversas situações relatadas na literatura em que o teste hidrostático é ineficiente na reprovação de descontinuidades, deixando que elas permaneçam no equipamento, muitas vezes ampliadas pela condição mais severa de carregamento que é imposta

Já em 1985, NJO (1985) afirmava que o principal argumento contra a realização de testes hidrostáticos era o perigo da ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades (CSCD), sem que este fenômeno fosse percebido, o que levaria à redução da vida remanescente do equipamento, que é função da taxa de propagação do defeito e da diferença entre os tamanhos de defeitos inicialmente presentes no equipamento e do tamanho de defeito crítico, que define a falha.

Na literatura há diversos trabalhos relatando casos de fraturas frágeis e catastróficas durante a realização de testes hidrostáticos. Mais recentemente foram desenvolvidos diversos trabalhos tentando utilizar os conceitos da mecânica da fratura para quantificar os efeitos do teste hidrostático no crescimento subcrítico de descontinuidades em dutos, mas para o caso de vasos de pressão ainda há pouco material disponível.

Baseado na grande importância dos vasos de pressão como equipamentos de processo e na falta de consenso entre os profissionais de inspeção sobre a eficiência do TH enquanto teste de verificação de integridade, este trabalho tem como objetivo estudar as condições para ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades num vaso de pressão durante a realização de teste hidrostático através da utilização de procedimentos de adequação ao uso, verificando em que condições a aplicação do TH influenciaria no comportamento futuro do equipamento, causando CSCD e reduzindo sua vida remanescente.

O objeto de estudo deste trabalho é um vaso de pressão, com características típicas de um vaso de refinaria de petróleo, contendo defeitos em sua estrutura (em seu costado). São fornecidos todos os dados de fabricação do vaso, suas condições de operação e teste hidrostático, bem como propriedades do material de fabricação e características dos defeitos, como geometria, dimensão e localização.

O trabalho consiste, basicamente, de simulações realizadas com auxílio do programa crackwise®, baseadas no procedimento de análise de rasgamento dúctil da norma inglesa BS 7910 onde, a partir da variação de valores das profundidades das trincas, dos coeficientes de encruamento do material e da curva de tenacidade do material, serão quantificados os valores de extensão dúctil das trincas e analisadas as alterações nos diagramas de análise de falha gerados para as condições analisadas. Também são discutidos alguns dos possíveis efeitos causados pelo CSCD.

Na revisão bibliográfica, capítulo 2 do trabalho, são abordados os principais tópicos do estudo. No primeiro item destaca-se a importância dos vasos de pressão como equipamentos de processo e é feita uma breve introdução ao projeto destes equipamentos pelo código ASME. No segundo item são abordados os conceitos relacionados ao teste hidrostático, mostrando suas aplicações, limitações e a determinação da condição de teste para vasos de pressão. Na seqüência é feita uma revisão dos conceitos da mecânica da fratura, com ênfase na abordagem elasto-plástica, introduzindo o conceito da integral J. O quarto, e último item, por sua vez, apresenta conceitos de integridade estrutural, inspeção de equipamentos, técnicas de avaliação de integridade, metodologias de cálculo de vida remanescente e inspeção baseada em risco e, ainda, uma abordagem histórica das metodologias de análise da aceitabilidade de defeitos em estruturas, introduzindo os conceitos do Diagrama de Análise de Falha (FAD) e dos procedimentos de “fitness for service” BS 7910 e API 579/ASME FFS-1. No capítulo 3 apresenta-se o objeto de estudo e a metodologia utilizada no trabalho é detalhada. No capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações. No capítulo 5 é feita a discussão dos resultados. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões. No capítulo 7 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros e no capítulo 8 são apresentadas as referências bibliográficas.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vasos de Pressão

2.1.1 Definições

Genericamente o termo vasos de pressão designa qualquer recipiente estanque, independente de dimensões, tipo, finalidade ou formato, que seja capaz de conter fluidos pressurizados (TELLES, 1996). Numa abordagem mais adequada ao contexto deste trabalho, os vasos de pressão devem ser encarados como equipamentos industriais, capazes de resistir com segurança a uma determinada pressão onde materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas e/ou químicas. O código ASME – Boiler and Pressure Vessel Code (2004), define os vasos de pressão como sendo todos os reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidade, não sujeitos à chama, que contenham qualquer fluido em pressão manométrica igual ou superior a $1,02\text{kgf/cm}^2$ ou submetidos à pressão externa.

No âmbito das indústrias de processo, dentre as quais destacam-se as indústrias de petróleo, química, petroquímica, farmacêutica e de alimentos, os vasos de pressão constituem os equipamentos mais importantes. Possuem elevado custo unitário e podem representar até 60% do custo total de materiais e equipamentos de uma unidade de processo, sendo os itens de maior tamanho e peso. (TELLES, 1996)

2.1.2 Classificação dos Vasos de Pressão

Segundo TELLES (1996), de acordo com as finalidades a que se destinam, os vasos de pressão são classificados da seguinte maneira:

- Vasos sujeitos à chama: incluem as caldeiras e os fornos.
- Vasos não sujeitos à chama: vasos de armazenamento e de acumulação, torres de destilação fracionada, retificação e absorção, reatores diversos, esferas de armazenamento de gases e trocadores de calor, incluindo trocadores propriamente ditos, aquecedores, resfriadores, condensadores, refeedores e resfriadores a ar.

2.1.3 Aplicações dos Vasos de Pressão

Para TELLES (1996), os vasos de pressão destinam-se fundamentalmente a três aplicações básicas :

- 1) Armazenamento de gases sob pressão;
- 2) Processamento de gases e líquidos;
- 3) Acumulação intermediária de gases e líquidos em processos industriais.

A primeira das aplicações justifica-se pela necessidade de armazenar em pequeno volume grandes quantidades de produtos, já que o armazenamento de gases no estado gasoso é economicamente inviável. A segunda aplicação é uma exigência da termodinâmica, já que numerosos processos envolvendo transformações físicas e reações químicas precisam ser efetuados em ambientes pressurizados. A terceira é uma necessidade das indústrias para realização dos processos de forma mais simples e competitiva, evitando desperdício de energia com compressões e descompressões desnecessárias, estabilizando a operação e compensando variações transitórias de vazão e nível.

2.1.4 Principais Componentes de um Vaso de Pressão

Os principais componentes de um vaso de pressão são:

- **O corpo** – Também chamado de Casco ou Costado, pode ser cilíndrico (forma mais comum), esférico, cônico ou uma combinação destas geometrias.
- **Os Tampos** - Podem ser dos tipos semi-elípticos, torisféricos, semi-esféricos, cônicos, torocônicos e planos.
- **Bocais** – Aberturas feitas no costado para ligação com tubulações de entrada e saída de produto, instalação de válvulas, instrumentos, drenos e respiros.
- **Peças internas** – Grades, bandejas, distribuidores, defletores, distribuidores de névoa, etc.
- **Acessórios externos** – Suportes, reforços de vácuo, anéis de suporte do isolamento térmico, chapas de ligação, cantoneiras entre outros.

2.1.5 Projeto de Vasos de Pressão

Os códigos de projeto estabelecem regras para o projeto e fabricação dos vasos de pressão, apresentando critérios de dimensionamento, fabricação, materiais a serem utilizados e exigências de testes e inspeção. Periodicamente são revisados e atualizados, incorporando novos tópicos e alterações em função do avanço tecnológico (FALCÃO, 2002).

Embora cada código adote critérios e metodologias próprias, a filosofia geral está baseada na limitação das tensões atuantes nas principais partes do equipamento a frações de uma propriedade de resistência mecânica do material, como o limite de escoamento, limite de resistência ou a deformação por fluência.

Os primeiros códigos baseavam-se em modelos geométricos bastante simples, associados a elevados coeficientes de segurança e só aproximavam-se das condições reais nas áreas do equipamento afastadas de mudanças geométricas, onde não há atuação de tensões secundárias nem concentração de tensões. A espessura de parede era calculada para suportar a máxima tensão atuante e exigia-se que o material possuísse ductilidade suficiente para acomodar tensões mais elevadas geradas em descontinuidades ou regiões de alteração geométrica. Essa é a filosofia da Divisão 1 do código ASME seção VIII, o mais utilizado no Brasil para projeto de vasos de pressão.

Os avanços nas teorias de análise de tensões e os conceitos da mecânica da fratura permitiram a adoção de uma nova abordagem para o projeto de vasos de pressão. Em oposição ao projeto convencional e suas soluções extremamente conservadoras, surge à abordagem do projeto alternativo, onde uma rigorosa e criteriosa análise de tensões faz-se necessária para permitir a adoção de maiores tensões de projeto. Essa abordagem considera em seus cálculos as geometrias e carregamentos não-convencionais, de tal forma que o dimensionamento seja dependente da análise e classificação das tensões atuantes em comparação com valores admissíveis (FALCÃO, 2002). As divisões 2 e 3 da seção VIII do código ASME adotam o projeto alternativo.

2.1.5.1 Tensões Admissíveis e Coeficientes de Segurança

TELLES (1996) define as tensões admissíveis como as tensões máximas utilizadas para o cálculo e dimensionamento das diversas partes de um vaso de pressão. As tensões admissíveis, evidentemente, são sempre menores que os valores do limite de resistência e limite de escoamento do material na temperatura considerada e são determinadas em

função do critério de cálculo, do tipo de carregamento, da segurança desejada e da temperatura de projeto. A relação entre os limites de resistência e escoamento e a tensão admissível é o que se chama coeficiente de segurança (TELLES, 1996). Para temperaturas elevadas, as tensões admissíveis são definidas em função do comportamento à fluência do material, considerando fatores como a taxa de deformação na temperatura considerada e o tempo estimado para a ocorrência da falha ou determinado valor de deformação.

2.1.6 O Código ASME

O código de projeto mais utilizado no Brasil é o código ASME (American Society of Mechanical Engineers), que é considerado bastante seguro, graças às considerações conservadoras e à adoção de elevados coeficientes de segurança. O código está organizado em seções e divisões que abordam diversos aspectos do projeto de caldeiras e vasos de pressão, incluindo o dimensionamento, a fabricação, materiais a serem utilizados, instalação, inspeção e controle de qualidade, recomendações para operação, testes, entre outros. A seção VIII do código ASME dedica-se, exclusivamente, aos aspectos de projeto e construção de vasos de pressão. Esta seção possui três divisões, cujas particularidades estão apresentadas nos tópicos a seguir.

2.1.6.1 ASME Seção VIII – Divisão 1

A divisão 1 representa o projeto convencional de vasos de pressão e aplica-se a equipamentos com pressão interna igual ou superior a $1,02 \text{ kgf/cm}^2$ e inferior a $211,0 \text{ kgf/cm}^2$, e com diâmetro interno maior ou igual a 6". As tensões admissíveis são estabelecidas com elevados fatores de segurança, o que limita as tensões atuantes em níveis bastante seguros e dispensa a realização de análises de tensões mais detalhadas. Avaliações complementares, como para os carregamentos em suportes, sapatas e pernas, ficam a critério do projetista. (DONATO, 2007^a)

Os possíveis critérios para estabelecimento das tensões admissíveis nesta divisão estão mostrados na tabela 1, para as faixas de temperatura acima e abaixo do regime de fluência.

Tabela 2.1 Critérios para determinação de tensões admissíveis no código ASME seção VIII
Divisão 1

Código de Projeto	Abaixo da faixa de fluência	Acima da faixa de fluência
ASME VIII – Divisão 1	$S_r / 3,5$ (na temperatura de projeto)	100% da tensão média que provoca uma velocidade de deformação de 0,01% em 1000h;
	$(2/3) S_y$ (na temperatura de projeto)	67% da tensão média que provoca ruptura após 100.000h; 80% da tensão mínima que provoca ruptura após 100.000h.

2.1.6.2 ASME Seção VIII – Divisão 2

A Divisão 2 aborda o chamado projeto alternativo para vasos de pressão. Esta divisão estabelece regras mais severas para a seleção de materiais e métodos de cálculos para a análise de tensões, permitindo a redução dos coeficientes de segurança e, conseqüentemente, aumento das tensões admissíveis. Para tal, são exigidas melhorias geométricas para restrição dos pontos de concentração de tensões, aumentam-se as exigências quanto à qualificação dos procedimentos de soldagem, à eficiência da junta soldada e à extensão da inspeção. Na Divisão 2 não há limites para a pressão de projeto do vaso. (CARVALHO, 2008)

Os possíveis critérios para estabelecimento das tensões admissíveis nesta divisão estão mostrados na tabela 2.

Tabela 2.2 Critérios para determinação de tensões admissíveis no código ASME seção VIII
Divisão 2

Código de Projeto	Abaixo da faixa de fluência	Acima da faixa de fluência
ASME VIII – Divisão 2	$S_r / 2,4$ (na temperatura de projeto)	Até 2007 não existiam critérios para a região de comportamento à fluência.
	$(2/3) S_y$ (na temperatura de projeto)	Em 2007 passam a existir critérios semelhantes aos da divisão 1.

2.1.6.3 ASME Seção VIII – Divisão 3

A Divisão 3 da seção VIII do código ASME está voltada para equipamentos projetados para operar em pressões superiores a 703 kgf/cm^2 . Muito parecida com a Divisão 2, diferencia-se pelo maior rigor na análise e classificação das tensões e avaliação de fadiga (FALCÃO, 2002). A utilização de materiais ainda está restrita a poucas especificações e, adicionalmente, podem ser realizadas avaliações de mecânica da fratura e projetos utilizando tensões residuais favoráveis devida à deformação plástica nas paredes como, por exemplo, a auto-fretagem. (DONATO, 2007^a)

2.1.7 Categorias de Tensões Atuantes nos Vasos de Pressão

2.1.7.1 Tensões Primárias (P)

Segundo TELLES (1996), as tensões primárias são aquelas causadas por esforços mecânicos permanentes, que se desenvolvem no material para satisfazer as condições de equilíbrio estático em relação aos diversos carregamentos atuantes, podendo ser normais ou cisalhantes. As tensões primárias normais podem ser de membrana ou flexão. A tensão de membrana, devido à pressão interna, é sempre de tração, já que o elemento da parede do vaso tende a aumentar de dimensões. As tensões de flexão aparecem porque o raio de curvatura da parede aumenta como consequência da deformação diametral decorrente da pressão interna. A tensão de flexão tem um valor variável ao longo da espessura da parede, sendo nula no centróide da parede. Em relação à pressão interna essa tensão é máxima de tração na superfície interna e máxima de compressão na superfície externa. As tensões de flexão são tanto maiores quanto maior for a espessura da parede.

As tensões primárias são sempre proporcionais às cargas das quais se originam. Supondo que as cargas aumentem indefinidamente, as tensões também aumentarão, podendo levar à falha do equipamento. A principal característica das tensões primárias é não ser auto-limitante, o que significa que enquanto o carregamento estiver sendo aplicado, a tensão continua atuando, não sendo aliviada por deformação. Caso estas tensões excedam o limite de escoamento do material, poderão ocorrer deformações excessivas ou colapso plástico. (TELLES, 1996)

No cálculo da espessura de vasos de pressão são consideradas, basicamente, as tensões primárias de membrana circunferenciais e longitudinais causadas pela pressão interna, sendo desprezadas as tensões radiais. As tensões circunferenciais são aquelas que tendem a romper o vaso segundo a sua geratriz, quando este estiver sob pressão interna e,

por serem numericamente o dobro das tensões longitudinais, são mais críticas que estas, que tendem a romper o vaso segundo a sua seção transversal (CARVALHO, 2008).

2.1.7.2 Tensões Secundárias (Q)

Segundo TELLES (1996), as tensões secundárias tem origem em restrições geométricas existentes no próprio vaso ou em estruturas solidárias a ele, e também de tensões causadas por dilatações diferenciais, não sendo, portanto, resultado de carregamentos atuantes sobre o material. Surgem em regiões de transição de formato ou de espessura, bem como em todas as partes do vaso que não estejam livres para sofrer deformação ou dilatação. A principal característica das tensões secundárias é ser auto-limitante, ou seja, pequenas deformações plásticas locais reduzem estas tensões, de tal modo que o valor máximo que podem atingir é o limite de escoamento do material. Caso haja um carregamento mais elevado, haverá maior deformação e a tensão secundária máxima permanecerá com o mesmo valor. Este fato explica o porquê das tensões secundárias serem incapazes de causar colapso plástico do equipamento. (TELLES, 1996)

As normas de projeto fazem uma série de exigências quanto a detalhes construtivos dos vasos de pressão no sentido de atenuar transições de forma e de espessura, com o objetivo de minimizar o valor destas tensões. Descontinuidades planares localizadas em regiões de tensões secundárias estão sujeitas a um nível de tensões diferenciado podendo, inclusive, evoluir durante a pressurização. (DONATO, 2007^b)

2.1.7.3 Tensões de Pico

Para TELLES (1996), as tensões de pico (*tensões localizadas máximas ou peak stress*) representam os valores máximos das tensões atuantes em regiões limitadas do equipamento devido à concentração de tensões causada por descontinuidades geométricas, tais como defeitos de soldagem e regiões de transição de formato. Embora possam atingir valores elevados, não costumam ser perigosas, por atuar regiões muito limitadas do equipamento, causando deformações desprezíveis. Apesar disso é necessário evitar valores muito elevados destas tensões porque podem dar origem a trincas por fadiga ou por corrosão sob tensão, assim como iniciar uma fratura frágil no vaso.

A figura 2.1 ilustra, esquematicamente, as regiões onde atuam as tensões primárias e secundárias num vaso de pressão.

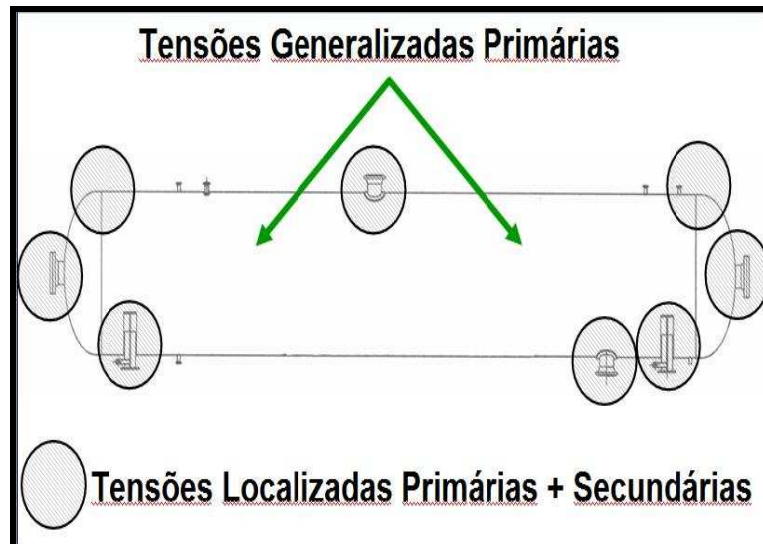


Figura 2.1 Categorias das tensões atuantes em um vaso de pressão.

Fonte: DONATO 2007^b

2.2 Teste Hidrostático

2.2.1 Definições

Segundo FOULDS et al (2004) o teste hidrostático (TH) é o meio mais utilizado para assegurar a adequação ao uso de componentes pressurizados. Em geral o teste consiste na pressurização do componente com um líquido até um nível de pressão estabelecido com base nas condições de projeto, a chamada pressão de teste hidrostático (P_{TH}). Tem por principal finalidade a detecção de possíveis vazamentos, falhas ou defeitos em soldas, roscas, partes mandriladas e em outras ligações no próprio vaso ou em seus acessórios internos e externos (TELLES, 1996). Em geral a água é utilizada como fluido de teste devido à sua grande disponibilidade nas unidades industriais e à pequena compressibilidade. Além disso, em caso de acidente, não é tóxica, nem inflamável, de modo que o vazamento seria menos agressivo ao ambiente e às pessoas envolvidas na execução do teste. No entanto, vale ressaltar que o lançamento de água no ambiente durante o TH é indesejável, visto que a água utilizada no teste é considerada contaminada (KIEFNER, 2000).

2.2.2 Ocasões de Aplicação de Testes Hidrostáticos :

Em geral, THs são aplicados, por exigência do código de projeto, ao término da fabricação do equipamento e após a realização de reparos ou alterações em que houver realização de soldagem. Dependendo da legislação do país, também são aplicados periodicamente como meio para aferição de integridade e atendimento de requisição legal.

No Brasil, a realização de THs periódicos em vasos de pressão é um requisito legal obrigatório, descrito pela norma regulamentadora NR-13, que estabelece regras compulsórias para o projeto, operação, inspeção e manutenção de caldeiras e vasos de pressão instalados em unidades industriais, incluindo navios e plataformas de exploração e produção de petróleo, e outros estabelecimentos públicos e privados, como hotéis, hospitais e restaurantes. (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 1995)

2.2.3 Teste Hidrostático na Fabricação de Vasos de Pressão

Por exigência dos códigos de projeto, são executados THs logo após o término da fabricação dos vasos de pressão. Segundo DONATO (2007^b), o TH de fábrica, ou TH inicial, tem como objetivo verificar a integridade e a ausência de vazamentos, servindo como um atestado de conformidade, que define a responsabilidade do fabricante no caso de falha futura do equipamento. O autor também destaca que é possível a ocorrência de rearranjo e alívio de tensões residuais de soldagem em pontos de alterações geométricas e descontinuidades, onde a ocorrência de pequenos escoamentos localizados reduziria o nível de tensões residuais da estrutura podendo, às vezes, introduzir, em pequenas áreas, tensões residuais compressivas. Esse fenômeno é extremamente benéfico e constitui uma grande vantagem do TH inicial, já que diversos mecanismos de danos atuantes em vasos de pressão estão baseados na presença de tensões residuais, como a corrosão sob tensão, por exemplo. FORMBY (1985) complementa, ressaltando que o TH pode colaborar para o retardo do crescimento de trincas por fadiga

Segundo PEREIRA (2007) os THs iniciais também podem promover o arredondamento da ponta de defeitos remanescentes na estrutura. Esse fenômeno, conhecido como “blunting”, cega a ponta da trinca, reduzindo a concentração de tensões na ponta da descontinuidade, exigindo que um carregamento mais elevado seja imposto para que ocorra uma nova propagação, sendo, também, um fenômeno benéfico à estrutura.

Segundo DONATO (2007^b), o TH de fábrica não avalia completamente a qualidade de fabricação do equipamento, já que diversos defeitos não são solicitados e permanecem inalterados na estrutura. Como exemplo, o autor cita um bocal com uma trinca de fabricação na solda de ligação do pescoço com o costado do equipamento “sobrevivendo” ao teste hidrostático.

2.2.4 Teste Hidrostático periódico de vasos de pressão

Embora bastante contestada pelos possíveis efeitos nocivos e pela necessidade de parada dos equipamentos, a realização de testes hidrostáticos periódicos em vasos de pressão é uma prática bastante difundida no mundo. No Brasil a realização de testes hidrostáticos periódicos em vasos de pressão constitui um requisito legal obrigatório para os vasos de pressão enquadrados no anexo III da NR-13, norma de segurança do Ministério do Trabalho e Emprego, cujo principal objetivo é garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores e da comunidade.

A NR-13 estabelece as frequências de realização dos testes em função das categorias dos vasos de pressão, que são determinadas em função do produto PV, pressão (kPa) x volume(m³) do vaso, e da classe do fluido contido no equipamento. Por ser uma norma de segurança, a NR-13 não estabelece critérios para determinação das pressões de teste, nem procedimentos para a realização do mesmo, ficando a determinação das condições de teste a critério dos Profissionais Habilitados (PHs). (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 1995)

Para empresas que possuam um sistema certificado de Serviço Próprio de Inspeção de Equipamento (SPIE) certificado, a NR-13 permite que os prazos máximos estabelecidos para a inspeção e a realização do TH sejam ampliados. O SPIE tem como função o gerenciamento das atividades de inspeção incluindo o controle e registro das condições físicas dos equipamentos estáticos de uma unidade industrial, visando assegurar condições seguras de operação.

O grande desenvolvimento das técnicas de inspeção de equipamentos verificado nos últimos tempos não são considerados na NR-13, que de forma inadequada, exige a realização de inspeção interna e teste hidrostático periódico, desconsiderando a possibilidade de avaliar de forma segura a integridade do equipamento através das diversas técnicas de ensaios não-intrusivos. Este fato gera diversos conflitos nos grupos de inspeção de equipamentos e não representa o interesse das empresas, que em função da necessidade de cumprimento dos prazos estabelecidos pela norma, se vê obrigada a parar a produção periodicamente.

Estão previstas na NR-13 algumas situações em que o TH periódico pode ser dispensado. Em seu item 13.10.3.5 são apresentadas algumas razões técnicas que inviabilizam o TH. São elas:

- Resistência estrutural da fundação ou a sustentação do vaso incompatível com o peso da água que seria usada no teste;
- Efeito prejudicial do fluido de teste a elementos internos do vaso;
- Impossibilidade técnica de purga e secagem do sistema;
- Existência de revestimento interno (exceto pintura, clad ou lining);
- Influência prejudicial do teste sobre defeitos subcríticos.

A última situação descrita, particularmente, gera grande polêmica entre os profissionais da área de inspeção de equipamentos, já que não há um critério objetivo para estabelecer o que, de fato, a norma considera como defeito subcrítico. PEREIRA (2004) verificou que, embora seja permitida a não realização do TH quando houver a possibilidade de propagação subcrítica de defeitos, os profissionais não costumam fazer uso desta permissão, exatamente por não saber o que considerar como defeito subcrítico, já que a maioria, se não todas as estruturas e equipamentos, possuem defeitos, que caso não se comportem de forma crítica, comportar-se-ão de maneira subcrítica.

2.2.5 Procedimentos para a Realização de Teste Hidrostático

A realização de teste hidrostático é um evento perigoso, de modo que as condições de teste devem ser determinadas privilegiando a segurança do equipamento e das pessoas envolvidas, minimizando as chances de ocorrer um acidente.

Segundo CARVALHO (2008), para o caso do TH de fábrica, as condições de teste devem ser determinadas em função das exigências do código de projeto e definidas, claramente, entre fabricante e usuário. No caso dos THs periódicos realizados no Brasil, a definição das condições de teste é uma atribuição do Profissional Habilitado (PH), que possui competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento de operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no país. (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 1995)

As duas principais variáveis a serem definidas são a pressão e a temperatura de teste.

Quanto ao fluido, pode-se dizer que a água é o fluido padrão, sendo utilizada na maioria absoluta dos testes hidrostáticos. Em algumas situações exige-se o controle do teor de cloretos da água, principalmente quando se tratar de vasos que possuam componentes ou sejam fabricados em aços inoxidáveis austeníticos da série 300, com o objetivo de minimizar a possibilidade de ocorrência de corrosão sob tensão ou por pites. Após o teste o vaso deve ser completamente drenado e seco. (API 510, 2006)

2.2.5.1 A Temperatura de Teste Hidrostático

A temperatura de teste, por sua vez, deve ser selecionada de modo compatível com a temperatura de projeto do equipamento com o objetivo de evitar a ocorrência de fratura frágil durante a realização do teste. Para equipamentos com espessura de parede maior ou igual a 2", o ASME exige que a temperatura do metal seja mantida a pelo menos 17°C acima da temperatura mínima de projeto ou, no mínimo, 15°C, o que for maior. Caso o equipamento tenha espessura de parede menor que 2", a temperatura do metal deve ser mantida a pelo menos 6°C acima da temperatura mínima de projeto ou, no mínimo, 15°C, o que for maior. (API 510, 2006)

Estas medidas devem ser tomadas porque, em temperatura ambiente, aços carbono, baixa liga e ferríticos podem estar susceptíveis à fratura frágil. Atenção especial deve ser dada aos aços baixa-liga, especialmente ao 2 ¼ Cr-1 Mo, porque são susceptíveis a fragilização ao revenido.

Um recurso muito utilizado para minimizar a probabilidade de fratura frágil é a realização do teste em temperaturas superiores à temperatura ambiente, com aquecimento da água para aumentar a tenacidade. No entanto, o API não recomenda que a temperatura de teste exceda 120°F (50°C), exceto se houver informações sobre características de fragilidade do material do vaso, indicando que uma temperatura de teste elevada é necessária. (API 510, 2006)

2.2.5.2 A Pressão de Teste Hidrostático:

Segundo DONATO (2007^a), o valor da pressão de TH é definido em função da consideração dos seguintes aspectos:

- Código e norma de projeto;
- Código de inspeção em serviços aplicáveis;

- Relação entre as condições de projeto e condições de operação;
- Potencial de risco e localização do vaso na unidade industrial;
- Histórico de resultados das inspeções de segurança internas e externas anteriores;
- Histórico dos resultados de testes de pressão anteriores;
- Possibilidade da existência de defeitos subcríticos;
- Avaliação da PMTA na condição atual do equipamento.

Pressão do TH de Fábrica :

O parágrafo UG-99 do ASME seção VIII estabelece que a pressão de teste hidrostático padrão deve ser, em cada ponto do vaso, igual ou superior ao valor calculado pelas equações 2.1 ou 2.2, conforme indicado.

$$P_{TH} \geq 1,5 \times PMTA \times (Sf/Sq) , \text{ para vasos fabricados antes de 1998} \quad (2.1)$$

$$P_{TH} \geq 1,3 \times PMTA \times (Sf/Sq) , \text{ para vasos fabricados depois de 1998} \quad (2.2)$$

Onde:

PMTA = Pressão Máxima de Trabalho Admissível

Sf = Tensão Admissível do Material na Temperatura de Teste

Sq = Tensão Admissível do Material na Temperatura de Operação

P_{TH} = Pressão de Teste Hidrostático

O valor determinado por esta expressão é o mínimo estabelecido pelo código, que não limita a pressão de teste. O ponto de referência para determinação da pressão é o topo do vaso. Outra questão importante é que para a condição de teste hidrostático, a tensão máxima atuando na parede de um vaso de pressão pode atingir 80% do limite de escoamento do material na temperatura ambiente, nas partes pressurizadas. (DONATO 2007^a). Segundo DONATO (2007^b), é conveniente que a pressão do teste hidrostático de fábrica seja a mais elevada possível, compatível com a segurança da parte mais fraca do equipamento, capaz de identificar falhas no controle de qualidade executado pelo fabricante.

Pressão de Testes Periódicos para Atendimento a NR-13

No caso de testes periódicos realizados no Brasil, não há imposição alguma por parte da NR-13 quanto às condições de teste. A norma deixa a critério dos PHs o estabelecimento de todas as variáveis. Segundo CARVALHO (2008), em muitas ocasiões os PHs acabam definindo condições de testes periódicos iguais aquelas especificadas para o teste de fábrica. O autor destaca que essa definição pode ser inadequada, uma vez que desconsidera que o equipamento já foi submetido a determinado tempo de operação, com provável desgaste de suas dimensões, que devem ser considerados na definição das condições de teste.

2.2.5 Falhas de Vasos de Pressão Durante a Realização de Testes Hidrostáticos

KLETZ (2005), em livro que trata basicamente de desastres envolvendo equipamentos das indústrias química, petroquímica e refinarias, alertou para o fato de que os testes são sempre realizados para detectar falhas e ressaltou que “se tivéssemos certeza de que o equipamento não falharia, não precisaríamos testá-lo”. O autor afirmou que embora, felizmente, sejam raras, grande parte das falhas em vasos de pressão registradas ocorreu durante a realização de testes hidrostáticos. CHALLENGER et al (1995) verificaram em pesquisa envolvendo a falha de 66 vasos de pressão, que 26% delas ocorreram durante THs.

O teste hidrostático simula uma condição de carregamento mais severa que a condição de operação, o que evidentemente envolve um certo risco. Há diversos relatos de falhas catastróficas ocorridas durante o TH inicial, que levaram à destruição completa do equipamento e, em alguns casos, mortes. As três principais causas de falhas frágeis durante o TH são as seguintes:

- Controle de qualidade deficiente ou inexistente, que não identifica descontinuidades de tamanho crítico, capazes de propagar de modo instável durante o TH;
- Presença de tensões que não estavam previstas, como tensões residuais de soldagem;
- Fluido de teste em temperatura inferior à recomendada, que causa redução da tenacidade à fratura dos materiais usados na fabricação dos vasos.

A presença de um destes três fatores, ou a combinação deles, pode levar o vaso de pressão a falhar durante o primeiro carregamento.

Segundo TELLES (1996), antigamente, a grande preocupação dos engenheiros quando na realização de THs de fábrica ficava por conta da ocorrência de fratura frágil dos equipamentos em virtude da utilização de métodos de ENDs menos precisos na detecção de descontinuidades, da pior qualidade dos materiais utilizados e das grandes espessuras, fatores que levam os materiais a trabalhar em baixos patamares de tenacidade, elevando a probabilidade de fratura frágil. Com o avanço tecnológico, os fatores descritos acima foram substancialmente melhorados. FREIRE (2007) afirma que a ocorrência de fratura frágil com materiais modernos tem probabilidade mais restrita, devido à maior tenacidade que estes materiais apresentam. Podem ocorrer em situações específicas sob baixas temperaturas, quando em partidas ou paradas de equipamentos são aplicadas combinações de temperatura e pressão inadequadas ou quando ocorre vazamento com resfriamento localizado.

A redução das espessuras, aumento das tensões admissíveis e da tenacidade à fratura, possibilitaram a ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades (CSCD). Nestes casos, o carregamento devido à pressão de teste hidrostático pode fazer com que descontinuidades de tamanho inferior ao tamanho crítico cresçam sem causar falha ou vazamento imediato e permaneçam, perigosamente, na estrutura, muitas vezes sem serem notadas pelos responsáveis, reduzindo a margem de segurança representada pela diferença entre o tamanho de defeito crítico e o tamanho de defeito existente, com possibilidade de ocorrência, no futuro, de rupturas catastróficas, vazamentos e outras falhas. Este fenômeno vem gerando grande discussão em torno da aplicabilidade, dos benefícios e malefícios da utilização do TH como ferramenta de inspeção e avaliação de integridade de vasos de pressão (PEREIRA, 2004).

Quando equipamentos fabricados com materiais de baixa tenacidade são submetidos ao teste hidrostático, é possível estabelecer o tamanho de defeito capaz de sobreviver ao nível de pressão imposto pelo teste (TEIXEIRA, 2003). Defeitos que superem o tamanho máximo estabelecido para o nível de pressão do teste e tenacidade do material levarão o equipamento a falhar de forma frágil, com crescimento instável da trinca. A figura 2.2 mostra uma curva pressão x tamanho de defeito, estabelecida para determinado valor de tenacidade, que relaciona de modo esquemático os tamanhos de defeito crítico para condições de operação(a_s) e teste hidrostático(a_{TH}). A medida que a

pressão aumenta, diminui o tamanho crítico de defeito. O princípio por trás do TH está baseado no fato de que o tamanho de defeito crítico no nível de pressão do teste (a_{TH}) é inferior ao tamanho de defeito crítico para o nível de pressão em condições normais de operação (a_s). Dessa forma acreditava-se que a sobrevivência ao TH garantia ausência de defeitos cujo tamanho fosse superior a (a_{TH}) e representava uma prova irrefutável da integridade do equipamento e da sua aptidão em resistir a condições normais de operação.

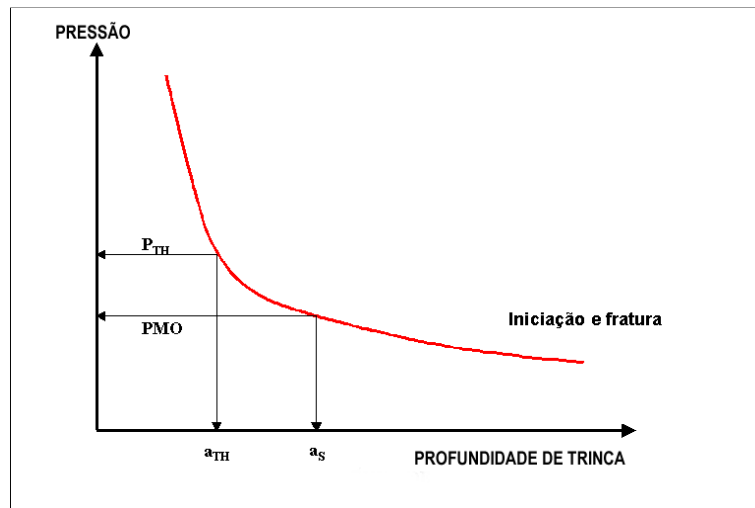


Figura 2.2 Gráfico de pressão x profundidade de trinca, relacionando os tamanhos críticos de defeito nas condições de operação (a_s) e teste hidrostático (a_{TH}).

Fonte: TEIXEIRA 2003

A curva da figura 2.2, no entanto, não representa o comportamento à fratura de materiais dúcteis, que apresentam razoável tenacidade à fratura. No caso destes materiais, há um crescimento estável da trinca antes que a instabilidade seja alcançada. Este fato explica a possibilidade de ocorrência de crescimento subcrítico de discontinuidades durante a realização de testes hidrostáticos, já que a maioria dos materiais utilizados nas estruturas de engenharia, incluindo aqueles utilizados na fabricação de vasos de pressão, enquadra-se nesta categoria. O estabelecimento do tamanho máximo de defeito para estes casos é mais complexo, exigindo a utilização de cálculos e procedimentos mais refinados. A falha nestes casos não é frágil, podendo ocorrer por colapso plástico ou fratura dúctil. A figura 2.3 ilustra o comportamento de materiais dúcteis frente às condições de operação e teste hidrostático para determinado valor de tenacidade. Aplicada uma pressão de TH tal que sejam superados os valores de iniciação para determinado tamanho de defeito, este crescerá de maneira estável até alcançar um valor a_D , superior ao valor a_T (tamanho de defeito máximo após extensão dúctil) e inferior ao valor de a_s (tamanho de defeito que

causa a fratura dúctil na máxima condição de operação) Caso seja superado o valor de fratura, então ocorrerá a falha dúctil.

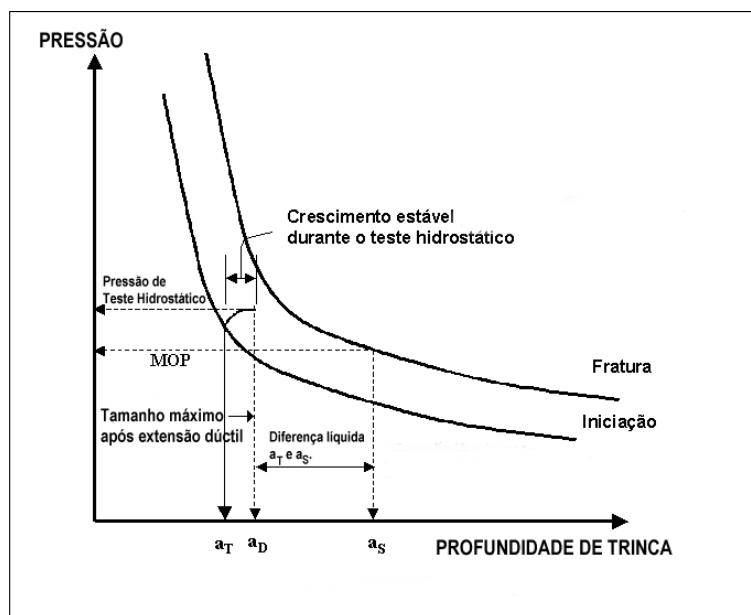


Figura 2.3 Gráfico de pressão x profundidade de defeito para materiais de alta tenacidade, mostrando a ocorrência de crescimento subcrítico em função do Teste Hidrostático.

Fonte: TEIXEIRA 2003

Quando entram em operação, logo após o TH de fábrica, considera-se que os equipamentos encontram-se em conformidade com as exigências do código de projeto, respeitando os critérios de aprovação e reprovação de descontinuidades, níveis de desvios geométricos e outros quesitos. Após a entrada em operação, os equipamentos podem ser submetidos a um único ou a uma combinação de mecanismos de danos, e as premissas adotadas para a realização do TH inicial deixam de ser válidas. Já não há um equipamento novo para ser testado e sim um equipamento, que em função das condições operacionais as quais foi submetido, incluindo a pressão e a temperatura operação, os fluidos armazenados e os ciclos de carregamento, podem apresentar trincas, perda de espessura por corrosão localizada ou generalizada e alteração de propriedades mecânicas, como a perda de tenacidade à fratura (fragilização) e perda de resistência à tração (PEREIRA, 2004).

Segundo DONATO (2007^b), o principal objetivo do TH periódico é reconfirmar a estanqueidade do equipamento e garantir sua integridade estrutural, certificando que o mesmo está qualificado para continuar atuando em suas condições normais de operação. O autor ressalta que os THs periódicos não possuem qualquer função estrutural, já que todas as deformações e rearranjos de tensões ocorreram no TH de fábrica. Novas deformações só

ocorreriam caso o TH periódico fosse realizado em pressões superiores a do TH de fábrica, o que não é recomendado.

Apesar destas evidências, segundo PEREIRA (2004) é comum nas indústrias de petróleo, química e petroquímica, a realização de THs periódicos nas mesmas condições em que são realizados os THs de fábrica, desconsiderando a degradação ocorrida durante a operação do equipamento e os possíveis efeitos da sobrepressão. O autor também alerta para o fato de que nestas indústrias não é comum a prática de mapear as descontinuidades antes da realização do TH e efetuar uma verificação posterior ao teste através de ENDS, determinando se as mesmas manifestaram qualquer crescimento. Caso a prática de mapeamento, antes e depois do TH, fosse corrente, seria possível identificar a real situação do equipamento, atestar a viabilidade da execução do teste e a efetividade do mesmo enquanto ferramenta de avaliação de integridade.

FOULDS (2004) verificou que nos Estados Unidos, diversas empresas optam por realizar THs nas paradas apenas como meio de evitar falhas e vazamentos nas partidas, e selecionam a pressão e temperatura dos testes, guiadas pelo objetivo de minimizar esforços e despesas associados com pressões e temperaturas elevadas. Muitas vezes, para evitar inconvenientes como, por exemplo, a exigência da retirada ou travamento das PSVs, as empresas costumam adotar pressões de TH iguais ou menores do que a pressão normal de operação dos equipamentos, abrindo mão dos potenciais benefícios da utilização de pressões de teste maiores que as pressões de operação, que incluem uma mais rigorosa identificação de defeitos que falhariam no serviço subsequente e cegamento plástico da ponta das trincas (blunting), que reduz substancialmente as taxas de crescimento de trincas no futuro. No entanto, KIEFNER (2000) alerta que, quando excessivamente conservativo, o TH periódico pode ser um método de avaliação ineficiente, deixando que permaneçam na estrutura defeitos que seriam detectados por ENDS e que podem crescer subcriticamente, causando falhas durante serviço.

Em geral, THs são realizados em temperaturas próximas de 20°C, embora grande parte dos equipamentos atue em temperaturas mais elevadas. As tensões de operação e projeto para os componentes que trabalham em temperaturas elevadas, por exemplo, são de 2 a 3 vezes menores do que as tensões permitidas pelo código de projeto para a temperatura ambiente, e de 6 a 10 vezes menores do que o limite de escoamento na temperatura ambiente. Para FOULDS (2004), isso comprova que aplicar o TH na pressão de operação, sem a correção das tensões admissíveis nas condições de fria e quente

(Sf/Sq), significa submeter o equipamento a uma pequena fração da carga que o material pode receber, exceto se houver presença de defeitos muito grandes na estrutura. Em casos onde a inspeção em serviço indicar o crescimento de trincas, o risco de falha durante o TH é maior, devendo nesses casos, a pressão de teste ser selecionada com base em rigoroso critério de mecânica da fratura.

No que diz respeito à efetividade do TH na detecção de defeitos em dutos, KIEFNER (2000) afirma que a relação entre a pressão de teste e a pressão de operação é a medida adotada para medir a eficiência. Segundo o autor, quanto maior for esta razão, mais eficiente será o TH. Para vasos de pressão esta afirmação não é completamente verdadeira já que, em função da maior complexidade geométrica destes equipamentos, a distribuição de tensões não é tão uniforme quanto no caso de dutos. Desse modo algumas regiões serão submetidas a sobrepressão enquanto outras estarão sendo pouco tensionadas. KIEFNER (2000) também afirma que para materiais mais modernos, com maior tenacidade, é aceitável a realização de THs com sobrepressão até que se alcance o limite de escoamento real do material. Esse princípio é adotado na metodologia do Stress-Test, teste de alta pressão realizado em dutos de alta tenacidade, no qual acredita-se, que em função da elevada sobrecarga, o número e o tamanho de defeitos remanescente será extremamente reduzido, aumentando a margem de segurança do equipamento (HIPPERT, 2008). No entanto, é possível a ocorrência do fenômeno de reversão de pressão, caracterizado por fazer com que ocorra, durante a operação, o crescimento de defeitos anteriormente estáveis, mesmo em pressões bem mais baixas, o que é muito freqüente nos dutos de maior tenacidade (TEIXEIRA, 2003).

Diversos autores realizaram estudos tentando avaliar possíveis benefícios e limitações da utilização do TH para a detecção de trincas em dutos, causadas por diversos mecanismos de dano. KATZ (2005), por exemplo, chegou à conclusão de que é melhor utilizar técnicas de inspeção para detectar as trincas e, em seguida, realizar análises com procedimentos de “fitness for service” como a BS 7910 e o API-579. Segundo KIEFNER (2000) o TH pode deixar para trás defeitos que seriam detectados com ferramentas de inspeção, métodos de ENDS. O autor também afirma que a integridade demonstrada pelo TH é válida apenas por um período de tempo curto, quando há a presença de mecanismos de crescimento de trinca, como fadiga, por exemplo.

2.3 Mecânica da Fratura

2.3.1 Introdução

Os projetos convencionais baseiam-se na resistência dos materiais e consideram, basicamente, o carregamento aplicado e a resistência mecânica do material para determinar se um material está adequado para a aplicação (HIPPERT, 2004).

De fato, a abordagem da resistência dos materiais considera o material como um meio contínuo e isento de defeitos, ignorando a presença de heterogeneidades que podem causar a concentração de tensões e levar à fratura com carregamentos bastante inferiores à sua resistência mecânica (STROHAECKER, 1999). Por isso, segundo BASTIAN (1989), a mecânica da fratura apresenta-se como uma abordagem mais adequada para o estudo dos materiais de engenharia reais, que contém em sua estrutura diversas descontinuidades, não sendo nem isotrópicos nem homogêneos.

A figura 2.4 apresenta uma comparação entre o enfoque tradicional da resistência dos materiais e o enfoque da mecânica da fratura quanto às variáveis envolvidas nas análises. Como pode ser observado, a mecânica da fratura possui três importantes variáveis: Em analogia à abordagem tradicional da resistência dos materiais, pode-se dizer que a tenacidade é a variável que substitui a resistência como propriedade mais importante do material, sendo ela uma medida da resistência do material à propagação das trincas (HIPPERT, 2004). O carregamento, por sua vez, é definido de diversas formas, consideradas forças motrizes para a fratura (K, CTOD ou J), e a variável adicional, não contemplada pela abordagem tradicional, é o tamanho de defeito (ANDERSON, 1995).

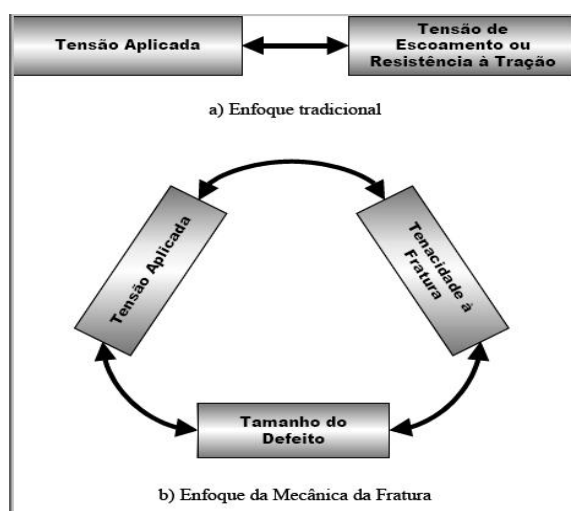


Figura 2.4 Variáveis envolvidas nas análises de resistência dos materiais e mecânica da fratura. Fonte: TARNOWSKI 2003.

2.3.2 Definição

A mecânica da fratura é a ciência que estuda as estruturas que contêm descontinuidades tipo trincas, fornecendo conceitos e equações para determinar se um defeito pode ou não, levar a estrutura à falha catastrófica, e em que condições de carregamento a falha ocorreria (STROHAECKER, 1999). A aplicação de seus conceitos resulta em maior segurança na tomada de decisões quanto à operação, necessidade de reparo ou substituição de equipamentos. Estas decisões, por conseguinte, podem representar aumento de confiabilidade, segurança, lucro e produtividade nas atividades industriais, podendo, também, servir como critério na seleção de materiais.

Os capítulos seguintes detalham com maior profundidade os principais conceitos por detrás das 2 principais teorias da mecânica da fratura: a Mecânica da Fratura Linear-Elástica (MFLE) e a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP).

2.3.3 A Mecânica da Fratura Linear-Elástica (MFLE)

A mecânica da fratura linear-elástica é normalmente utilizada em situações onde a falha ocorre ainda no regime linear-elástico, com pouca ou nenhuma deformação precedendo a fratura. Esta situação é comum para os materiais de elevada resistência mecânica, ligas de resistência moderada quando aplicadas em espessuras elevadas, e ainda, para materiais sujeitos a algum tipo de fragilização ou transição dúctil-frágil. Nestas condições pode-se alcançar um estado triaxial de tensões (estado de deformação plana), que possibilita a ocorrência de fratura frágil. Para BASTIAN (1989), a aplicação da MFLE é recomendada quando o tamanho da zona plástica na ponta da trinca for pequeno em relação ao tamanho da trinca, inexistente ou caso se estenda por regiões muito pequenas em relação às dimensões da estrutura que contém o defeito.

No enfoque da MFLE, existem 2 critérios fundamentais: O critério de Energia e o critério do Fator de Intensidade de Tensões.

2.3.3.1 O Critério de Energia

A primeira abordagem quantitativa tentando relacionar a tensão de fratura e o tamanho de defeito foi realizada por Griffith em 1920, invocando a primeira lei da termodinâmica para formular a teoria da fratura baseada num simples balanço de energia. De acordo com essa teoria, um defeito torna-se instável, e assim a fratura ocorre, quando a energia de deformação liberada como resultado do incremento do tamanho da trinca é

suficiente para superar a energia superficial do material. O modelo de Griffith previu corretamente a relação entre a resistência e o tamanho de defeito em espécimes de vidro, mas não apresentou sucesso na descrição do comportamento dos metais. Por considerar que o trabalho para a fratura decorria exclusivamente da energia superficial do material, a abordagem de Griffith era aplicável apenas a sólidos idealmente frágeis. Além disso, a abordagem de Griffith exige a manipulação de grandezas cuja determinação experimental não é simples, como a energia superficial do material, o que dificulta a aplicação desta abordagem em engenharia e como dado de projeto (ANDERSON, 1995).

Griffith foi o primeiro a tentar propor um critério de energia para a fratura, mas quem de fato foi responsável pela primeira versão desta abordagem na mecânica da fratura foi Irwin. A teoria de Griffith subestimava severamente a resistência à fratura dos metais. Sendo assim, Irwin e Orowan, de forma independente, modificaram a expressão obtida por Griffith, tentando considerar a estreita zona de material deformado na ponta do defeito, para que a mesma pudesse ser aplicada a materiais capazes de sofrer escoamento plástico, considerando o trabalho plástico por unidade de área de superfície criada. Irwin então definiu a taxa de liberação de energia elástica (G), como a variação da energia potencial com a área da trinca para um material linear-elástico, ou seja, uma medida de energia disponível para um incremento na extensão da trinca, força motriz para a fratura. No momento da fratura, $G=G_{IC}$, (o subscrito I indica o modo de carregamento I, de abertura da trinca), taxa de liberação de energia crítica, que pode ser encarada como uma medida da tenacidade do material. O crescimento da trinca pode ocorrer de maneira estável ou instável, dependendo de como G varia com o tamanho da trinca.

Para uma trinca de comprimento $2a$ numa placa infinita submetida à tração uniaxial, conforme mostrado na figura 2.5, a taxa de liberação de energia (G) é dada pela equação 2.3, onde E é o módulo de elasticidade do material, σ é a tensão aplicada e a é a metade do comprimento da trinca.

$$\boxed{G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E}} \quad (2.3)$$

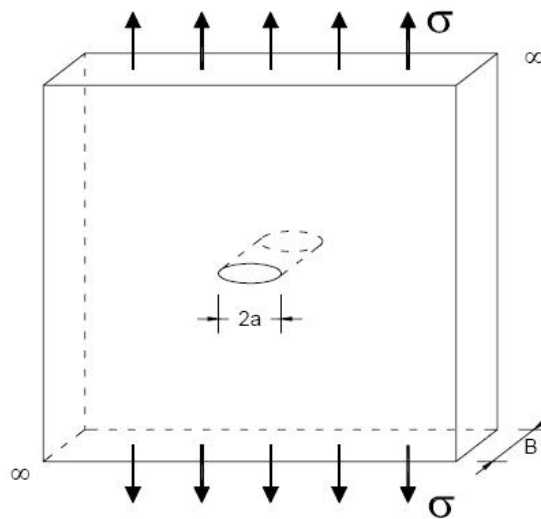


Figura 2.5 Esquema de uma placa infinita, com uma trinca passante, sendo tracionada uniaxialmente. Fonte: ÁVILA 2005

Sendo G_{IC} um valor de tenacidade à fratura, é possível calcular combinações de tensões e tamanhos de defeito críticos que levariam a estrutura à falha. Para este caso, a tensão crítica varia com $1/\sqrt{a}$.

2.3.3.2 O Fator de intensidade de tensões

Considerando um elemento próximo da ponta da trinca de um material linear-elástico, cada componente de tensão é proporcional a uma simples constante K_I . Essa constante, chamada fator de intensidade de tensões caracteriza completamente as condições da ponta da trinca de um material linear-elástico. K_I pode ser determinado pela equação 2.4, onde σ é a tensão aplicada, Y é um parâmetro relacionado à geometria do componente, e a é o tamanho do defeito.

$$\boxed{K_I = \sigma \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (2.4)$$

Assumindo que o material falha localmente numa combinação crítica de tensão e deformação, a fratura deve ocorrer numa intensidade de tensões crítica, K_{IC} , que representa uma medida de tenacidade à fratura do material. A falha ocorrerá quando $K_I = K_{IC}$, sendo K_I a força motriz para a fratura e K_{IC} uma medida da resistência do material à propagação de trincas (ANDERSON 1995). Se K_I é conhecido, a distribuição de tensões na ponta da trinca pode ser determinada pelas equações da figura 2.6 (TARNOWSKI 2003).

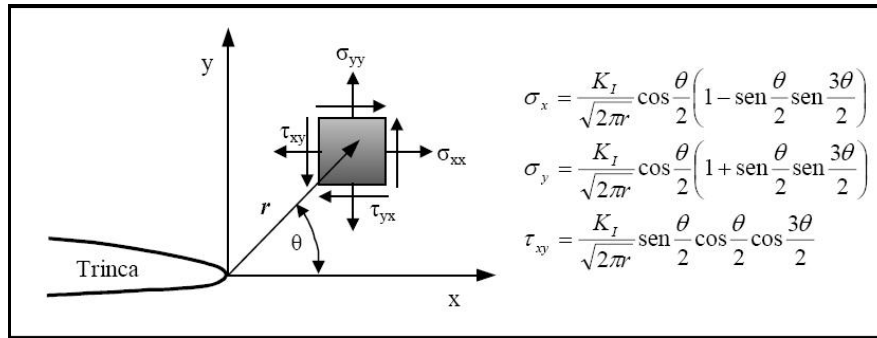


Figura 2.6 Equações para determinação da distribuição de tensões na ponta da trinca
Fonte: TARNOWSKI 2003

Existe uma relação de equivalência entre G_{IC} e K_{IC} , de modo que os critérios de energia e intensidade de tensões são igualmente válidos para um material linear-elástico. Esta relação é dada pela equação 2.5, onde $E' = E$ (para tensão plana) ou $E' = 1 - \nu^2$ (para deformação plana).

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (2.5)$$

2.3.3.3 Plasticidade na ponta da trinca

A distribuição de tensões descrita de acordo com as equações da figura 2.6, apresenta uma singularidade na região da ponta da trinca quando r tende a zero. Nessa condição, a tensão local aumenta substancialmente, de maneira que tenderia a um valor infinito, como está representado na figura 2.7. No caso de materiais que apresentam certa deformação na ponta da trinca, esta distribuição não reflete a realidade, já que quando o valor da tensão alcança o limite de escoamento do material, ocorre uma deformação plástica localizada, que causa um relaxamento das tensões na ponta da trinca e as soluções lineares deixam de ser válidas.

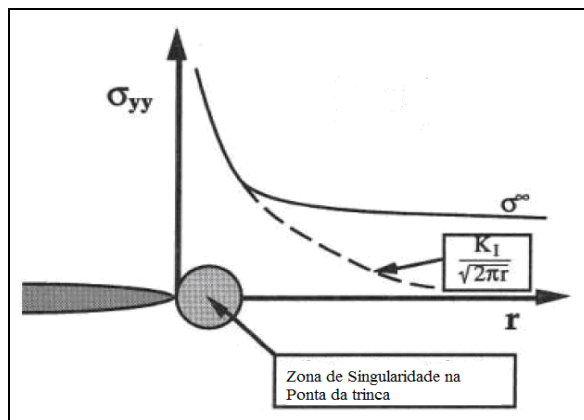


Figura 2.7 Zona de singularidade na ponta da trinca.
Fonte: ANDERSON 1995.

Para correção dos efeitos causados pela plastificação da ponta da trinca, foram propostos alguns modelos para estimativa do tamanho da zona plástica, que consideram um comprimento de trinca efetivo maior do que o comprimento real, com objetivo de reduzir o efeito da zona plástica no campo de tensões. A região em que esses modelos são aplicáveis é conhecida como zona de dominância K.

Segundo BASTIAN (1989), o modelo de Irwin é bastante utilizado para a estimativa do tamanho da zona plástica na ponta de trincas. Neste modelo, Irwin define o tamanho da zona plástica como sendo a distância da ponta da trinca na qual a tensão atuante não excede o limite de escoamento do material e que corresponde a $2r_y$, sendo r_y o raio da zona plástica na ponta da trinca. Através das equações de r_y para os estados plano de tensão e plano de deformação, 2.6 (a) e (b), é possível mostrar que o tamanho da zona plástica na ponta da trinca em corpos de prova no estado plano de deformação é menor do que no estado plano de tensão, devido à inibição da deformação na ponta do defeito.

$$\boxed{r_y = \frac{1}{2\pi} x \left(\frac{K_I}{\sigma_{LE}} \right)^2} \Rightarrow \text{Estado plano de tensão} \quad (2.6) \text{ (a)}$$

$$\boxed{r_y = \frac{1}{6\pi} x \left(\frac{K_I}{\sigma_{LE}} \right)^2} \Rightarrow \text{Estado plano de deformação} \quad (2.6) \text{ (b)}$$

$$r_p = 2 r_y$$

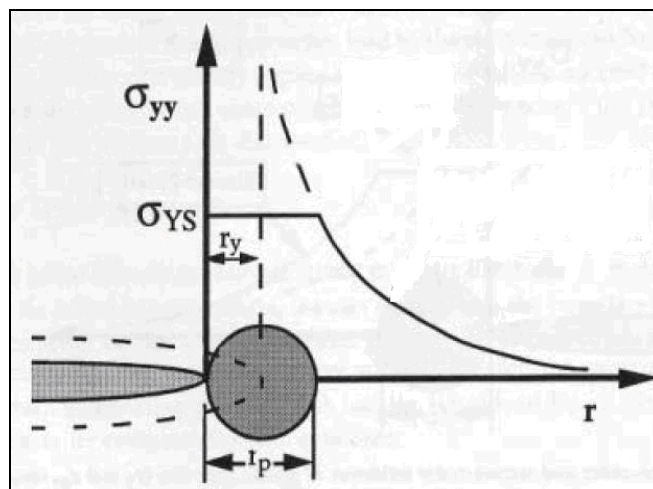


Figura 2.8 Correção da plasticidade na ponta da trinca proposta por Irwin.

Fonte ANDERSON 1995.

Segundo BASTIAN (1989), a espessura atua como fator fragilizante, já que o aumento de espessura de um componente pode levá-lo a um estado plano de deformação (triaxial de tensões) e menor valor de tenacidade à fratura. Estudos empíricos mostraram que a espessura mínima necessária para garantir um estado plano de deformação deve atender à condição descrita na equação 2.7, onde B_0 é a espessura mínima para se garantir um Estado Plano de Deformação (EPD).

$$B_0 \geq 2,5x \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{LE}} \right)^2 \quad (2.7)$$

Quando um corpo de prova é ensaiado em estado de deformação plana, é obtido um valor crítico de K_I , ou seja, K_{IC} , que representa a tenacidade à fratura do material em deformação plana. Esse valor de K_{IC} é uma propriedade do material para a temperatura do ensaio e velocidade do carregamento do corpo de prova. Maiores valores de K são possíveis quando os ensaios são realizados em tensão plana, conforme mostrado pela figura 2.9. Nesse caso, representam-se os valores críticos por K_C , sem a utilização do subscrito I.

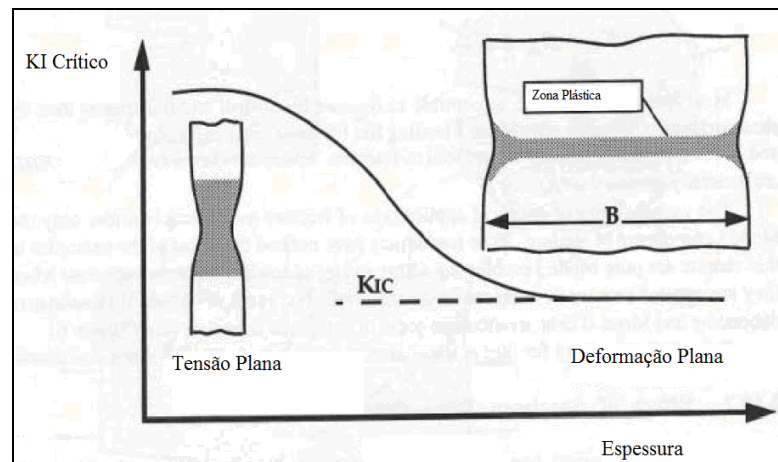


Figura 2.9 Efeito da espessura do corpo de prova sobre a tenacidade à fratura do material. Fonte: ANDERSON 1995.

2.3.4 A Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

A maioria dos componentes mecânicos, equipamentos e estruturas são fabricados com ligas metálicas de baixa e média resistência mecânica e razoável tenacidade à fratura, caso dos aços estruturais de baixo carbono, utilizados na construção de tubulações, vasos de pressão, pontes, viadutos, navios, etc. Com a redução da resistência mecânica e aumento da tenacidade, o tamanho da zona plástica na ponta da trinca pode aumentar significativamente, de modo que as condições para utilização da MFLE deixam de ser

válidas. A compreensão do comportamento a fratura destes componentes faz-se à luz da mecânica da fratura elasto-plástica, através dos seus dois principais métodos: o CTOD e a Integral J.

2.3.4.1 A Metodologia do CTOD (Crack Tip Opening Displacement)

A base conceitual do método CTOD (deslocamento na abertura da ponta da trinca) foi desenvolvida através das hipóteses propostas de maneira independente por Wells, Cottrell e Bareblat, de que na presença de elevada plasticidade ocorre uma movimentação das faces da trinca antes do processo de fratura e que esta abertura da ponta da trinca era uma medida da tenacidade do material. Wells verificou que a deformação que ocorria na ponta do defeito, cegava a trinca, e que o grau de cegamento aumentava com o aumento da tenacidade do material. A propagação da trinca tem início quando um valor crítico de abertura da trinca é alcançado. Esse valor, simbolizado por δ_c , é uma medida de tenacidade à fratura do material (ANDERSON, 1995). A figura 2.10 mostra um desenho esquemático representando o CTOD.

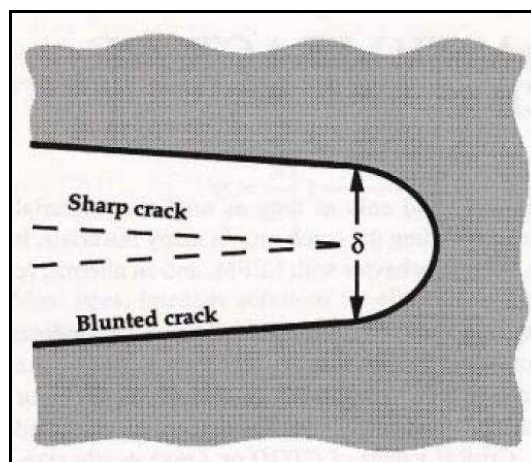


Figura 2.10 Crack tip opening displacement (CTOD).
Fonte: ANDERSON 1995.

Em seu artigo original Wells realizou uma análise que relacionava o CTOD com o fator de intensidade de tensões, K , no limite de deformação em pequena escala. Em seu modelo, Wells utilizou uma chapa infinita contendo uma trinca plana vazante de comprimento $2a$, submetida a uma tensão trativa constante. Utilizando uma equação desenvolvida para o cálculo do afastamento entre as faces da trinca de materiais elásticos, chegou a relação apresentada na equação 2.8, provando que para o caso de deformação em pequena escala, há equivalência entre a MFLE e o método do CTOD (BASTIAN, 1989).

$$\delta = \frac{K_I^2}{\sigma_{LE} \cdot E} = \frac{G}{\sigma_{LE}} \quad (2.8)$$

2.3.4.2 A Metodologia da Integral J

A Integral J é o outro enfoque da mecânica da fratura elasto-plástica para a avaliação da propagação de trincas. Segundo BASTIAN (1989), trata-se de uma abordagem energética, puramente mecânica, que não considera aspectos metalúrgicos e microestruturais, que foi proposta inicialmente por J.R. Rice em 1968. Rice mostrou que a taxa de liberação de energia, J, poderia ser escrita como uma integral de linha independente do caminho, calculada no plano normal à trinca, no entorno do defeito, conforme mostrado pela figura 2.11. Também foi mostrado por Hutchinson (1968), Rice e Rosengren (1968) que J caracteriza a distribuição de tensões e deformações na ponta da trinca de materiais não lineares. Dessa forma, a integral J pode ser vista tanto como um parâmetro de energia como parâmetro de intensidade de tensões. De fato, J é uma versão mais geral da taxa de liberação de energia, G, definida para a mecânica da fratura linear-elástica. Para o caso específico de um material linear-elástico, $J=G$ (ANDERSON 1995).

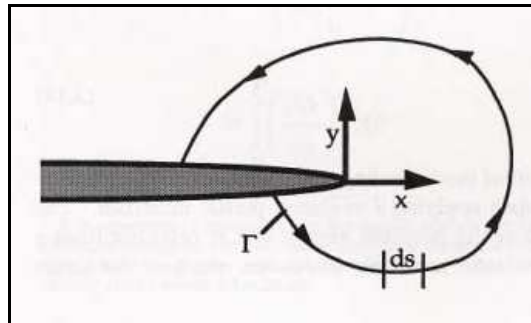


Figura 2.11 Contorno arbitrário ao redor da trinca, usado na determinação da integral J.
Fonte: ANDERSON 1995.

Para definir J como o parâmetro que caracteriza as condições de carregamento na ponta da trinca, Hutchinson, Rice e Rosengren utilizaram a equação de Ramberg-Osgood, equação 2.9, que descreve a relação tensão-deformação do material, e mostraram que J descreve de maneira única o campo de tensões e deformações na ponta da trinca de um material não-linear elástico (SILVA 1998). Nesta equação, σ_0 é a tensão de referência e ϵ_0 é deformação elástica associada a σ_0 . α e n são parâmetros determinados através de ensaios de tração. O valor de n , expoente de encruamento, pode ser obtido através de um ensaio de tração convencional, sendo seu valor representado pela inclinação da curva

tensão-deformação verdadeira em escala bilogarítmica. Segundo HIPPERT (2004), valores típicos de n variam de 3 a 5 para materiais com boa capacidade de encruamento até 20, para materiais pouco encruáveis. Materiais de vasos de pressão, em geral, apresentam boa capacidade de encruamento. Por outro lado, os materiais mais modernos, principalmente aqueles utilizados na fabricação dos dutos, apresentam valores de n mais elevados.

$$\boxed{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n} \quad (2.9)$$

Com a utilização de métodos numéricos, SHIH mostrou que existe uma relação de equivalência entre J e o CTOD, sendo ambos capazes de caracterizar as condições de propagação de defeitos em materiais (ANDERSON 1995). A integral J , no entanto, oferece uma vantagem sobre o CTOD que é o fato de poder ser estimada a partir de métodos numéricos, como o método de elementos finitos, onde as soluções são facilmente determinadas, inclusive para geometrias complexas (BISWAS, 1994, apud SILVA 1998)

2.3.4.3 O Cálculo de J

A maior parte das avaliações de trincas ocorre no regime elasto-plástico, já que a maioria dos materiais utilizados nas estruturas e equipamentos apresenta razoável tenacidade à fratura e, geralmente, são empregados em espessuras insuficientes para gerar um Estado Plano de Deformação (EPD). Segundo TEIXEIRA (2003), a escolha de J é útil para análises de engenharia devido à disponibilidade de equações para diferentes materiais e diversas geometrias

O cálculo de J como força motriz para fratura é realizado pela divisão de J em duas componentes: uma componente elástica, J_e , e uma componente plástica, J_p , como mostrado na equação 2.10. A figura 2.12 mostra os valores de J em função do carregamento aplicado e a relação entre as componentes plástica e elástica na composição do J total. Pode-se perceber que no início do carregamento predomina a componente elástica J_e . Com o aumento do carregamento a componente plástica passa a predominar, sendo esta contribuição plástica em função do expoente de encruamento. (TEIXEIRA 2003)

$$J = J_e + J_p \quad (2.10)$$

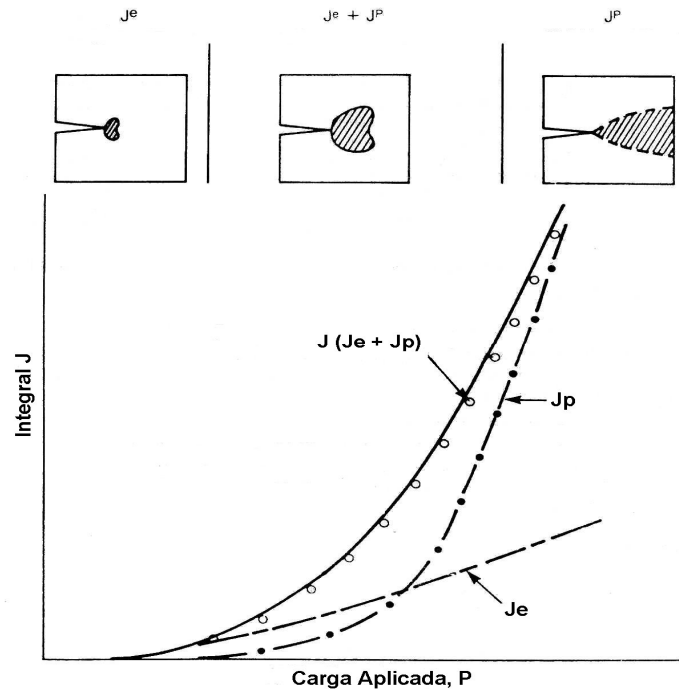


Figura 2.12 Relação entre as componentes J_e e J_p na formação do J total em função da carga aplicada. Fonte: TEIXEIRA 2003

Para cada configuração ou situação estudada, haverá uma formulação para o cálculo de J , considerando fatores como a geometria da estrutura, o tamanho e a geometria da trinca, os carregamentos atuantes, a tenacidade à fratura e as propriedades mecânicas do material, principalmente o limite de escoamento e o expoente de encruamento. A componente elástica, J_e , é calculada de acordo com as equações 2.11 (a) e (b), mostradas abaixo, e J_p é calculada através de expressões de maior complexidade, que são função das geometrias do componente e da trinca, do carregamento aplicado, do limite de escoamento e dos parâmetros de encruamento do material, que estão listadas em handbooks e livros.

Como foi citado anteriormente, dentro do regime linear-elástico, J e G são equivalentes. Desse modo, também é possível estabelecer uma relação entre J e K .

$$J=G = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E}, \text{ para condições de deformação plana} \quad (2.11) \text{ (a)}$$

$$J=G = \frac{K^2}{E}, \text{ para condições de tensão plana (G não é válido neste caso)} \quad (2.11) \text{ (b)}$$

2.3.4.4 Curvas de Resistência J-R

Materiais dúcteis e frágeis apresentam características bastante diversas em relação aos seus comportamentos à fratura. Em geral, materiais dúcteis exibem crescimento de trinca lento e estável, com a presença de deformação plástica considerável na ponta do defeito. O aumento da zona plastificada na ponta da trinca e o encruamento do material exigem a elevação das forças externas para que o crescimento estável de trinca continue (ANDERSON, 1995).

As curvas de resistência J-R, relacionam o parâmetro de tenacidade e força motriz para a fratura, J, com a extensão da trinca, Δa . Para os metais, as curvas J-R são crescentes, indicando que é necessário elevar continuamente o J aplicado para manter o crescimento estável da trinca, devido ao encruamento que ocorre na ponta do defeito elevando a resistência à propagação. A figura 2.13 exibe uma curva J-R típica de materiais dúcteis e as etapas de evolução de um defeito. Inicialmente, como pode ser observado, o material apresenta deformação plástica localizada, com arredondamento da ponta da trinca. Esse arredondamento gera aumento de resistência ao crescimento e, nesse trecho, a curva apresenta grande inclinação e comportamento linear, que se estende até J_{IC} , valor de tenacidade que representa a resistência ao início de propagação estável de trinca. Com o aumento no valor de J, o material falha, na ponta da trinca, havendo crescimento do defeito. As principais variáveis que influenciam o comportamento plástico a frente da trinca são a geometria, tanto do componente quanto do defeito, as propriedades de encruamento do material e as condições de carregamento (ANDERSON 1995).

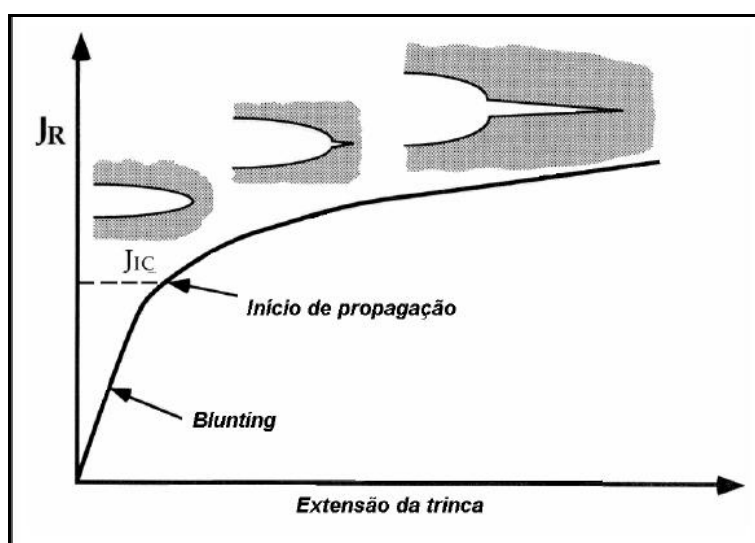


Figura 2.13 Curva J-R e etapas de evolução da trinca. Fonte: HIPPERT 2004

Segundo HIPPERT (2004), a partir de J_{IC} , com a ocorrência da extensão dúctil da trinca, o material passa a responder de diferentes maneiras, influenciado pelo estado de tensões na ponta do defeito e pelas características de encruamento do material, o que resulta em curvas R com inclinações diferentes, como mostra a figura 2.14.

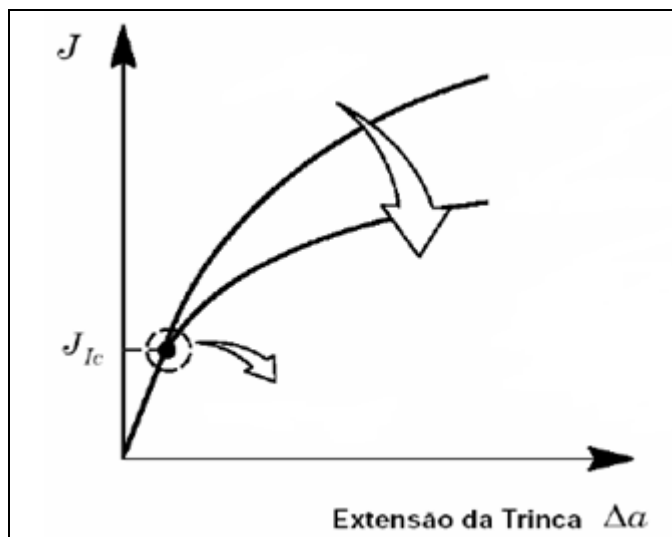


Figura 2.14 Alteração da curva R a partir de J_{IC} , em função da diferença do expoente de encruamento do material. Adaptação de HIPPERT 2004

2.3.4.4 A Integral J como critério de fratura

Inicialmente a curva J-R era fundamentalmente utilizada para determinação do parâmetro J_{IC} , que representa a energia necessária para iniciar a propagação estável de uma trinca, ou seja, início da extensão da frente da trinca. A definição de J_{IC} através da curva J-R pode ocorrer de forma relativamente arbitrária, analogamente aos 0,2% considerados na determinação do limite de escoamento numa curva tensão-deformação (SILVA, 1998). No entanto, segundo TARPANI (1997), utilizar a curva J-R completa é muito mais adequado, por permitir uma interpretação mais detalhada do comportamento do material diante do crescimento da trinca. HIPPERT (2004), observou que adotar J_{IC} como critério de tenacidade à fratura é excessivamente conservador, por desconsiderar que ainda há uma reserva de resistência proporcionada pelo aumento de resistência do material com o crescimento da trinca e redução da restrição geométrica, proporcionando um “ganho de tenacidade”.

As condições que governam a estabilidade do crescimento de trinca em materiais elasto-plásticos são virtualmente idênticas às apresentadas para o caso dos materiais elásticos. A instabilidade ocorre quando a curva de força motriz para a fratura é tangente à

curva R. Sendo a inclinação da curva R representada pelo módulo de rasgamento (tearing modulus), T_R , calculado através da equação 2.12 (a), é conveniente expressar a força motriz em termos de um módulo de rasgamento aplicado T_{app} (Applied tearing modulus), calculado pela equação 2.12 (b) (ANDERSON 1995). Um material com uma curva R mais inclinada é menos propenso a sofrer propagação instável de trinca. (TEIXEIRA 2003)

As condições durante crescimento estável de trinca podem ser expressas como:

- $J_{ap} \leq J_{Ic}$ ou $T_{app} < T_R$

Já as condições para crescimento instável de trinca podem ser representadas por:

- $T_{app} > T_R$, onde :

$$T_R = \frac{E}{\sigma_0^2} \frac{dJ_R}{da} \quad (2.12) (a)$$

$$T_{app} = \frac{E}{\sigma_0^2} \left(\frac{dJ}{da} \right)_{\Delta_T} \quad (2.12) (b)$$

sendo σ_0 a média aritmética entre a tensão de escoamento e a do limite de resistência.

2.4 Avaliação de integridade estrutural de vasos de pressão

2.4.1 Mecanismos de danos e envelhecimento dos vasos de pressão

A maioria dos equipamentos e componentes estruturais, incluindo os vasos de pressão, são projetados para uma vida útil finita, considerando que em condições normais de operação estarão expostos a taxas de degradação constantes ao longo de toda sua utilização. A degradação do componente leva à redução ou perda de funcionalidades e exige medidas preventivas ou corretivas para evitar falhas e acidentes, e manter a confiabilidade do equipamento em níveis aceitáveis.

Segundo LAFRAIA (2001), a Confiabilidade define a probabilidade de que um equipamento ou sistema, funcionando dentro dos limites operacionais especificados no projeto, não falhe durante um intervalo de tempo conhecido. Uma das finalidades da análise de confiabilidade seria definir a margem de segurança utilizada, já que no projeto convencional os coeficientes de segurança são definidos arbitrariamente, por não haver conhecimento de todas as variáveis do projeto. Quando as condições operacionais e a

agressividade do meio são muito alteradas em relação ao que foi considerado no projeto, a confiabilidade pode ser comprometida.

Aumentar a confiabilidade é possível, desde que se atue nas causas básicas dos problemas. Para isso, deve-se conhecer os mecanismos de danos atuantes nos equipamentos e atuar na minimização de seus efeitos. Deve-se fazer uso dos históricos de manutenção e inspeção de equipamentos e determinar os fatores críticos a serem considerados para a manutenibilidade. Somente dessa forma será possível atuar nas possíveis origens de falha, sejam elas problemas de projeto, fabricação ou operação.

Pode-se dizer que, em geral, os vasos de pressão estão sujeitos aos seguintes mecanismos de falha: (DONATO 2007^a)

1. deformação elástica excessiva, incluindo instabilidade elástica;
2. deformação plástica excessiva;
3. fratura frágil;
4. deformação e tensões a altas temperaturas (fluência /creep);
5. Instabilidade plástica (Colapso incremental);
6. Fadiga de baixo ciclo;
7. Corrosão sob tensão;
8. Corrosão-fadiga;

Um equipamento submetido a um único, ou a uma combinação destes mecanismos, apresentará, ao longo do tempo, diversos efeitos de degradação em sua estrutura, sendo os mais significativos a perda de tenacidade, perda de espessura por corrosão localizada ou generalizada, o surgimento e crescimento de trincas.

Todos os mecanismos de danos expostos acima estão associados às condições de operação dos equipamentos. No entanto, a fabricação, muitas vezes, é a responsável pela introdução dos defeitos, que por falha do controle de qualidade do fabricante não são identificados e reparados, permanecendo, perigosamente, na estrutura. Os defeitos oriundos dos processos de soldagem, principalmente as trincas, são os principais vilões na fabricação dos vasos de pressão. A presença de trincas em vasos de pressão é um sinal preocupante, de maneira que os códigos de projeto e inspeção são extremamente rigorosos quanto aos critérios de aceitação destes defeitos. Trincas superficiais, particularmente,

devem ser vistas com cuidado especial, já que são indicativos de uma, ou mais, das seguintes situações:

- Qualidade ruim de soldagem/construção;
- Métodos de inspeção ruins no momento da construção;
- Tensões superiores à tensão de projeto;
- Corrosão sob tensão, fadiga, corrosão fadiga, etc.

(BS7910, 2005) e (RASTOGI, 2006)

2.4.2 Códigos de Projeto x Defeitos.

Os códigos de projeto não consideram o fato de que os equipamentos degradam-se durante o serviço e não admitem a presença algumas descontinuidades/danos devidas à degradação ou à fabricação original que podem ser encontradas em inspeções posteriores, como, por exemplo, trincas (ANDERSON, 2000). Para DONATO (2007^c), os critérios de aceitação dos códigos de projeto são definidos arbitrariamente e, no caso de equipamentos novos, apenas comparam as dimensões das descontinuidades encontradas com os valores limites adotados. O autor relata que os códigos de vasos de pressão não reconhecem danos como a redução de espessura localizada causada por processos corrosivos, desvios de forma relacionados a ciclos térmicos, entre outros efeitos de degradação. Os mecanismos de danos considerados estão restritos à corrosão uniforme, fratura frágil, fadiga e fluência, de tal forma que o código considera que evita estes danos por estabelecer sobresspesura de corrosão, seleção de materiais criteriosa, exigências de testes de qualidade e dimensionamento à fadiga (DONATO 2007^b).

O fato, é que muitas das ocorrências consideradas inaceitáveis pelos códigos de projeto são, na verdade, irrelevantes para a integridade do equipamento, podendo permanecer no equipamento sem a necessidade de realização de reparos.

2.4.3 Reparos

Os reparos são operações que visam recolocar os equipamentos em condições de operar de maneira segura nas condições para as quais foram projetados, atendendo aos requisitos do código de projeto, admitindo um determinado risco, que caracteriza a diferença entre um equipamento novo e um equipamento que sofreu reparo. A experiência, no entanto, já provou que reparar defeitos em estruturas utilizando operações de soldagem,

pode introduzir novos defeitos, muitas vezes mais críticos do que os originais. Em muitos casos, as operações de reparo são desnecessárias, sendo mais seguro conviver com os defeitos, identificando sua expansão e monitorando seus efeitos.

2.4.4 Avaliação de Integridade: Definição

Para CARVALHO (2008), uma avaliação de integridade estrutural consiste na utilização de técnicas que permitam determinar o estágio de degradação em que um equipamento se encontra, com objetivo de prever o comportamento futuro do componente, indicando, caso existam, necessidades de inspeção, monitoração, reparo, substituição ou reforço. A avaliação inclui atividades de levantamento de dados sobre as condições físicas reais dos equipamentos em análise, através de uma inspeção detalhada, planejada a partir de informações colhidas em inspeções anteriores, nos históricos de manutenção, inspeção e operação, além da análise do histórico de equipamentos que operem em condições semelhantes e em análises complementares de tensões, flexibilidade e vibrações. A avaliação de integridade também permite a definição das áreas críticas de determinado equipamento, de maneira a concentrar os esforços de inspeção nestes locais, reduzindo o custo e o tempo de inspeção

Com os resultados destas avaliações, é possível estabelecer e aplicar ações para o controle e a redução das taxas de degradação, de modo a aumentar a vida útil do componente, considerando fatores econômicos e de segurança.

2.4.5 Técnicas e Métodos para avaliação de Integridade Estrutural e Cálculo da Vida Remanescente de Vasos de Pressão

As atividades de avaliação de integridade são multidisciplinares, envolvendo profissionais de inspeção de equipamentos e ensaios não destrutivos, mecânica da fratura, análise de tensões, mecanismos de deterioração, entre outros.

Os grupos de inspeção de equipamentos são responsáveis por identificar a presença de danos acumulados e estabelecer a cinética dos processos de deterioração atuantes num equipamento, de modo a estipular, com antecedência, o momento e a extensão para as intervenções de manutenção preventiva, assim como, especificar medidas que anulem ou atenuem suas taxas de progressão do dano, além de instituir programas de avaliação de integridade e estimativa de vida remanescente. Para isso fazem uso de Ensaios não-destrutivos (ENDs), que são ensaios realizados em materiais e equipamentos com o intuito

de verificar a existência de descontinuidades. Utilizam princípios físicos definidos, sem alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, nem interferir no uso posterior, dos objetos inspecionados

Os planos de inspeção são os instrumentos de controle e acompanhamento de integridade de estrutural dos vasos de pressão. Em geral, a técnica de inspeção deve ser selecionada em função do mecanismo de dano atuante e do tipo e tamanho de defeito que se deseja detectar. Entre as principais técnicas de END utilizadas pode-se citar: Ensaio visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, correntes parasitas, radiografia, ultrassom (incluindo técnicas como a medição de espessura, o ToFD e o Phased Array), termografia e a emissão acústica. A confiabilidade e efetividade dos planos de inspeção é função da probabilidade de detecção (POD) das técnicas utilizadas e do nível de amostragem. Os valores de POD das técnicas devem ser conhecidos e analisados, pois determinarão a confiabilidade do plano de inspeção aplicado (ECKSTEIN, 2009).

Em algumas situações é preciso utilizar ensaios destrutivos para que se obtenha dados reais sobre o equipamento que contém o defeito. Geralmente estes ensaios exigem a retirada de amostras ou corpos de prova do próprio equipamento, gerando amostras mais representativas e dados de propriedades mecânicas mais próximos da realidade. Podem ser realizados ensaios de tração, corrosão, metalografia e mecânica da fratura (CTOD).

Também é de fundamental importância a determinação do nível de tensões atuantes na estrutura em análise. Dessa forma, pode-se evitar que os efeitos da presença de trincas sejam superestimados ou subestimados. A análise de tensões pode ser realizada por métodos analíticos, numéricos ou experimentais. Dentre estas, destaca-se o método dos elementos finitos que pode ser aplicado para geometrias complexas através de métodos numéricos de aproximação incorporados em programas de computador. Métodos de medição experimental de tensões, podem ser utilizados para aferir e confirmar os dados obtidos com as outras metodologias. As técnicas de medição mais utilizadas são a extensometria, com uso de strain gauges, e a fotoelasticidade. (LAFRAIA, 2001)

2.4.5.1 Avaliação da Vida Remanescente

Segundo LAFRAIA (2001) os projetistas estimam a vida útil dos equipamentos de modo bastante conservador, considerando que eles serão submetidos ao longo de todo o tempo aos valores máximos das variáveis operacionais que influenciam a vida útil, como temperatura e nível de tensões. Obviamente estes valores limites não são observados ao

longo de todo o tempo de operação do equipamento. Conhecendo as condições operacionais realmente enfrentadas pelos equipamentos e os estágios de deterioração em que eles se encontram, pode-se avaliar a vida remanescente do equipamento, evitando a substituição precoce do equipamento e desperdícios de mão-de-obra e materiais.

Por isso, diversas técnicas e métodos de avaliação de vida remanescente foram desenvolvidos, e permitem que os mesmos continuem operando após o vencimento de sua vida útil, considerando um risco aceitável,

Utilizando conceitos estatísticos, pode-se estimar a probabilidade de falha dos equipamentos. LAFRAIA (2001) diz que as variáveis determinantes para a condição de falha não são determinísticas, de modo que os resultados fornecidos pelas avaliações de vida remanescente devem ser probabilísticos. O autor ressalta que é comum a adoção de valores determinísticos extremamente pessimistas e conservadores para algumas variáveis, cujos resultados tendem a fornecer probabilidades de falha muito superiores e distantes da condição real do equipamento. LAFRAIA afirma que utilizando métodos probabilísticos, que considerem as incertezas dos dados, é possível acompanhar a evolução das probabilidades de falha e dos riscos associados, permitindo a tomada de decisão sobre a substituição do equipamento. A figura 2.15 mostra um exemplo esquemático da diferença entre vidas remanescentes (tempo de operação(T_f)) estimadas para situações otimistas e pessimistas, onde são considerados diferentes tamanhos de defeitos iniciais(A_i) e tamanhos de defeitos críticos(A_c).

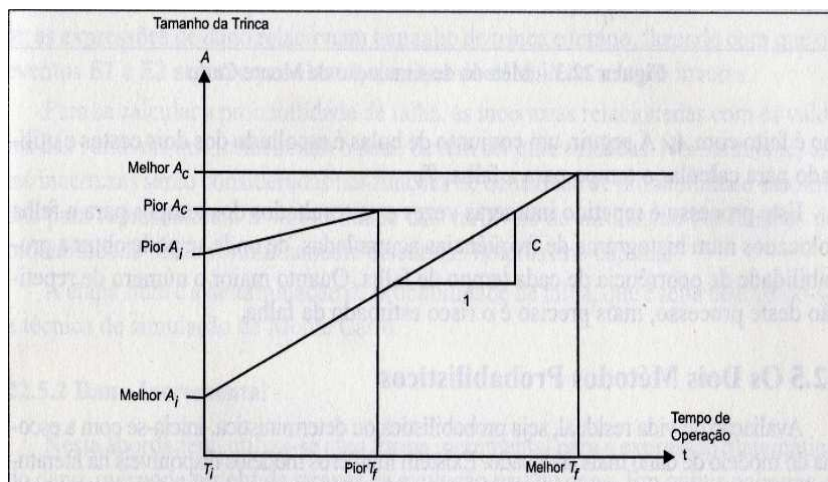


Figura 2.15 Diferença entre os tempos de operação estimados para situações otimistas e pessimistas na avaliação de integridade estrutural. Fonte: LAFRAIA 2001.

Para LAFRAIA (2001), a determinação da vida remanescente envolve a identificação dos mecanismos de dano atuantes no equipamento e a seleção de um modelo para evolução do dano. Segundo o autor, estes modelos estão, fundamentalmente, baseados em duas metodologias: a do dano total e do dano incremental.

No método do dano total são utilizadas expressões que descrevem a taxa de evolução do dano, relacionando a velocidade de evolução do dano com o tempo total para ocorrência da falha ou a variação do tamanho da trinca em função do tempo. Esse método é bastante utilizado para mecanismos de dano como fadiga, fluência e CST. Para o cálculo das probabilidades de falha, as incertezas relacionadas às variáveis devem ser quantificadas nas funções de densidade de probabilidade, representando a variabilidade dos valores, como no caso da figura 2.16 que ilustra a variabilidade na distribuição dos valores de tenacidade à fratura. (LAFRAIA 2001)

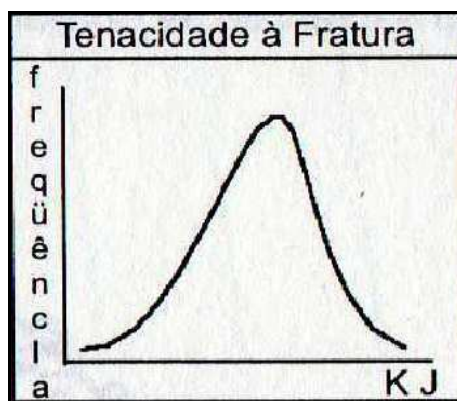


Figura 2.16 Variabilidade na distribuição dos valores de tenacidade à fratura.

Fonte: LAFRAIA 2001.

Já no método do dano incremental, determina-se a vida remanescente a partir de extrapolações de dados reais da evolução dos danos, que são obtidos durante as inspeções, não existindo para estes casos equações que descrevam as taxas de evolução dos danos. Este método é aplicável na determinação da vida remanescente de equipamentos sujeitos à corrosão uniforme. (LAFRAIA 2001)

2.4.5.2 Análise de probabilidade de falha e vida remanescente de um vaso de pressão

De posse dos dados de propriedades mecânicas do material de fabricação do equipamento, análises das tensões atuantes e dos resultados e informações das inspeções, como a presença de defeitos, suas dimensões e localizações, recorre-se a análises

estatísticas para determinar a distribuição de defeitos no equipamento, conforme apresentado figura 2.17, e a probabilidade de existência de defeitos de tamanho igual ou superior ao tamanho crítico, calculado através da mecânica da fratura. Para o cálculo da probabilidade de falha, utilizando a curva de distribuição de tamanhos de defeitos, basta calcular a área abaixo da curva e a direita do valor de tamanho crítico de defeito. A confiabilidade, por sua vez, é dada por um menos a probabilidade de falha, ou seja, $\text{Confiabilidade} = 1 - \text{PoF}$.

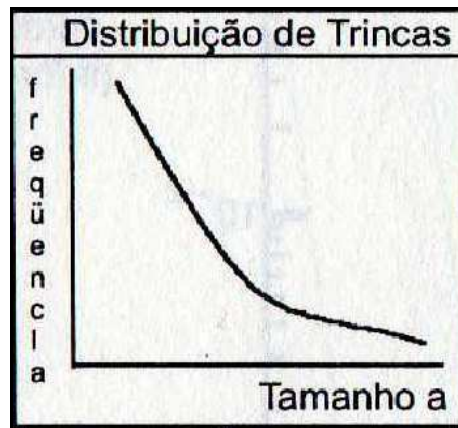


Figura 2.17 Curva de distribuição de tamanhos de defeitos.

Fonte: LAFRAIA 2001

De posse dos tamanhos de defeitos obtidos pela inspeção e conhecendo as equações que representam a evolução do dano no tempo, pode-se calcular a vida remanescente do equipamento, representada pelo tempo ou número de ciclos necessários para que seja alcançada a dimensão crítica do defeito. Também é possível calcular o tamanho de cada uma das trincas ao longo do tempo e aplicar uma distribuição estatística, determinando a probabilidade de falha. (LAFRAIA 2001) A figura 2.18 mostra que em casos onde há mecanismos de danos que levem ao crescimento de trinca ao longo do tempo, a probabilidade de falha também aumenta com o tempo. A figura 2.19 mostra exemplos de estimativas de probabilidade de falha em função do tempo e das pressões atuantes, para casos de fadiga e CST, respectivamente.



Figura 2.18 Gráfico da probabilidade de falha em função do tempo.
Fonte: LAFRAIA 2001

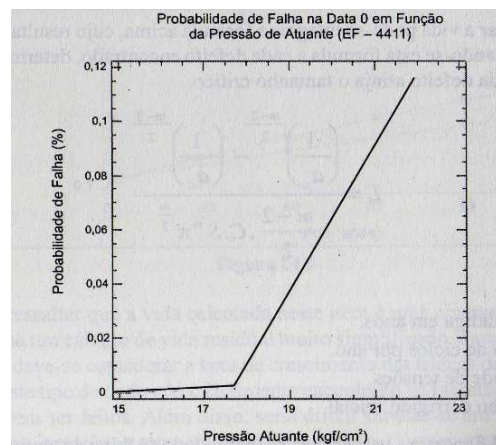
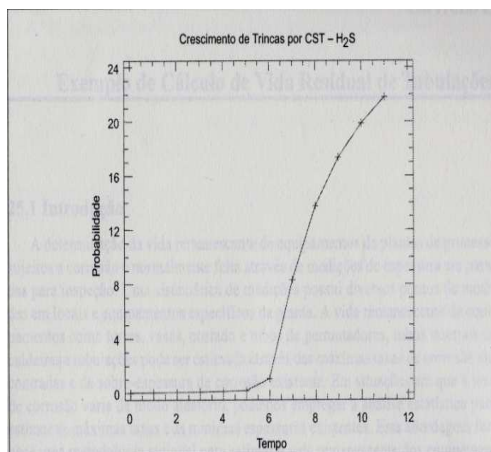


Figura 2.19 Gráficos de estimativa de probabilidade de falha em função do tempo (a) e da pressão atuante no equipamento (b).

Fonte: LAFRAIA 2001

Os valores de vida remanescente são extremamente dependentes das leis de crescimento utilizadas nos cálculos. Por isso, deve-se adotar equações e parâmetros que representem o mais fielmente possível os mecanismos de crescimento da trinca. A figura 2.20 mostra um gráfico de crescimento de trinca em função do tempo, que permitiria a determinação das leis de crescimento do defeito ao longo do tempo.

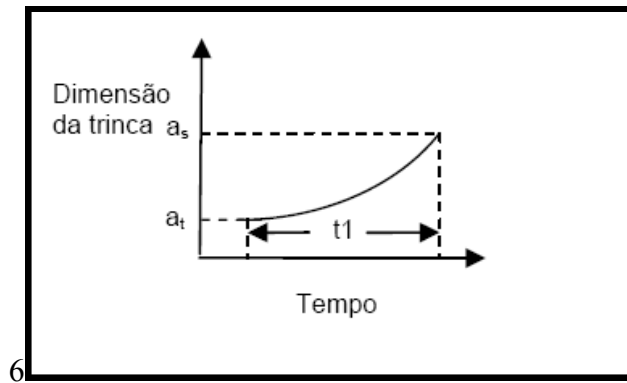


Figura 2.20 Exemplo de comportamento de crescimento de defeito em função do tempo.
Fonte: PEREIRA 2009

2.4.6 A Inspeção Baseada em Risco (IBR)

Como foi dito anteriormente, os equipamentos industriais, geralmente, contém muitos defeitos; mas, felizmente, a grande maioria destes é inofensiva. Sendo assim, a tarefa dos grupos de inspeção é encontrar aqueles poucos defeitos capazes de causar uma falha, respeitando prazos e a política de custos

Segundo LAFRAIA (2001), a inspeção Baseada em Risco (IBR), apresentada nos documentos API RP 580 e API STD 581, é uma metodologia integrada que considera e evidencia o risco como guia nas decisões de inspeção e manutenção de equipamentos, gerenciando o risco pelo estabelecimento de planos de inspeção coerentes com os mecanismos de danos atuantes em cada equipamento e permitindo a utilização do histórico operacional do equipamento para atualização do risco. É considerada *integrada* porque envolve processos qualitativos e quantitativos para combinação tanto da probabilidade quanto da consequência das falhas no intuito de estabelecer os equipamentos que devem receber inspeção e manutenção prioritariamente.

O primeiro passo na aplicação da metodologia RBI consiste na classificação qualitativa do risco das unidades de processo, ou segmentos delas, utilizando a matriz de risco mostrada na figura 2.21.

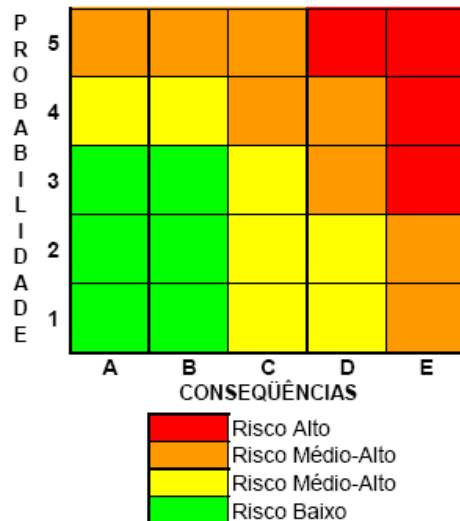


Figura 2.21 Matriz de risco do programa de Inspeção Baseada em Risco (IBR).

Fonte: ECKSTEIN 2002

Cada unidade de processo ou equipamento deve ser classificado em termos de probabilidade potencial (1 a 5) e de consequência potencial (A a E). Combinando estas classificações, enquadra-se o equipamento ou unidade em algum dos 25 elementos da matriz de risco. Esta análise considera, além de fatores de inspeção, o projeto do equipamento e os registros de manutenção, além de inúmeras questões gerenciais que possam interferir na integridade mecânica e na segurança de uma unidade de processo.

Para cada equipamento, a análise fornecerá uma classificação para o nível de inspeção que deve ser utilizado. Há três níveis de inspeção:

- Plano mínimo de inspeção;
- Manutenção do nível atual de inspeção;
- Nível otimizado de inspeção.

LAFRAIA (2001) afirma que fundamentados nos resultados da análise, podem ser alterados a frequência de inspeção, os métodos, ferramentas e testes utilizados, bem como o escopo, a qualidade e a extensão da inspeção. A análise pode ainda, sugerir a utilização de técnicas globais de inspeção como a termografia e a emissão acústica, que permitem o acompanhamento do dano em serviço. A medida que são realizadas inspeções, a ordem de prioridades é alterada, fazendo da inspeção um processo dinâmico, onde a percepção de risco é sempre alterada à medida que novas inspeções e alterações no plano de inspeção são realizadas.

Aplicando de forma adequada um programa de inspeção de risco, as unidades industriais estarão otimizando os recursos de inspeção, de tal forma que pode-se alcançar o menor risco possível, com o menor custo. Para tal, os recursos devem ser transferidos dos equipamentos de baixo risco, ou seja, aqueles menos afetados por mecanismos de danos, que operam em condições operacionais menos severas e que são inspecionados em frequência muito maior do que a necessária na visão da IBR, para os equipamentos de maior risco, que segundo a metodologia podem estar recebendo atenção, em termos de inspeção, inferior à necessária. O usuário também pode reduzir o risco através da instalação de sistemas de segurança, sistemas de detecção de vazamentos, válvulas de segurança e outros dispositivos que possam minimizar as conseqüências no caso de ocorrência de algum sinistro.

A NR-13, norma regulamentadora já citada anteriormente, utiliza uma metodologia para determinação do risco na operação de vasos de pressão, onde apenas as conseqüências das falhas são levadas em consideração, ignorando os mecanismos de danos atuantes nos equipamentos, as variações nas taxas de dano, as mudanças nas condições operacionais e também os níveis de inspeção adotados. Segundo ECKSTEIN (2002) a NR-13 adota um conceito de risco “estático”, caracterizado apenas pelas condições de projeto do equipamento, ignorando a taxa de acúmulo de danos. Assim, o autor considera que a IBR é mais adequada para determinar o risco de equipamentos em serviço, pois apresenta, em relação à NR-13, a vantagem de indicar um risco que se altera com o tempo, sendo função dos danos presentes e dos planos de inspeção aplicados.

ECKSTEIN (2002) ressalta que a aplicação da metodologia da IBR abriria espaço para a flexibilização dos prazos de inspeção e realização de THs periódicos, reduzindo o ônus das empresas devido às paradas das unidades e redução da desvantagem das empresas brasileiras em relação às norte americanas, européias e do Oriente Médio, que já estão implementando as metodologias de IBR. Para PINTO (2008), a implementação desta metodologia aqui no Brasil não invalidaria a NR-13. As inspeções podem continuar sendo conduzidas de acordo com o estabelecido por esta norma, mas de forma otimizada, buscando um maior nível de segurança para os equipamentos de alto risco.

2.4.7 Mecânica da fratura aplicada às estruturas

Quando uma estrutura é avaliada com base nos conceitos na mecânica da fratura, há três variáveis que devem ser consideradas: tensões atuantes, tamanho de defeito e tenacidade do material. O conhecimento de duas destas variáveis é necessário para que a

terceira seja calculada. Grande número de relações matemáticas estão disponíveis para tentar quantificar os valores críticos para estas variáveis, mas essas abordagens são adequadas apenas em situações especiais (ANDERSON, 1995).

Caso seja válida, a análise pela MFLE torna-se praticamente direta se houver disponível alguma solução de K para a geometria de interesse. Soluções para fatores de intensidade de tensões são obtidas de muitas fontes como handbooks, literatura publicada, experimentos e análises numéricas. É comum encontrar uma solução de K para uma geometria que é similar a da estrutura de interesse. Quando uma solução de K não está disponível, a mesma pode ser obtida por experimentos ou numericamente.

2.4.7.1 A curva de projeto CTOD

A curva de projeto CTOD é uma relação semi-empírica que permite relacionar para uma estrutura a tensão aplicada com uma trinca admissível. Foi aprimorada em 1971 por Burdekin e Dawes, baseados em experimentos com chapas largas realizados no TWI (The Welding Institute) e fundamentados na idéia que Wells originalmente propôs, de que a deformação global variava linearmente com a abertura da ponta da trinca em condições de large scale yielding (deformação em grande escala).

Conhecidas as razões de tensão ou deformação impostas, determina-se o CTOD adimensional e, a partir deste, pode-se determinar o tamanho de trinca passante admissível na estrutura. O CTOD adimensional é então plotado no gráfico contra a deformação na fratura, normalizada pela deformação elástica (ANDERSON 1995). Através da curva de projeto é possível estipular o tamanho de defeito permissível para um determinado carregamento, caracterizar a tensão admissível em uma estrutura cujo tamanho de defeito presente é conhecido e ainda utilizá-la como parâmetro para a seleção de materiais em aplicações específicas (STROHAECKER 1999). Se o ponto estiver acima da curva de projeto, a estrutura é considerada segura.

A curva de projeto, mostrada na figura 2.22, é bastante conservadora, já que as equações de Burdekin e Dawes incluem um fator de segurança de 2 para o tamanho de trinca. É possível, inclusive, considerar tensões residuais e concentradores de tensão. Todavia, ela não correlaciona combinações críticas das variáveis deformação (tensão), tenacidade à fratura e tamanho de defeito.

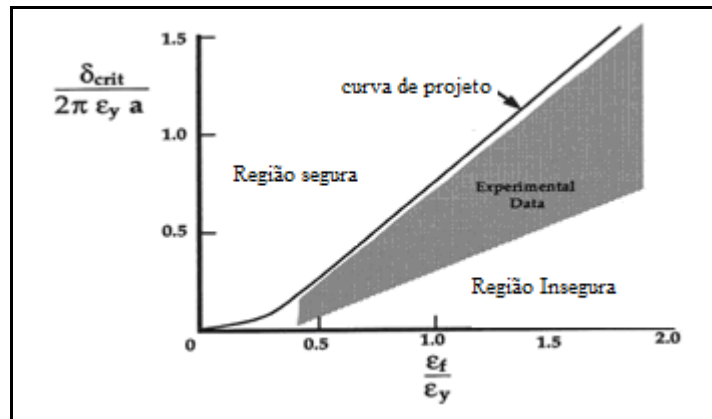


Figura 2.22 A curva de projeto CTOD

Fonte: ANDERSON 1995

2.4.7.2 Diagrama de Análise de Falha (FAD)

Estruturas feitas de materiais com tenacidade elevada podem não ser susceptíveis à fratura frágil, mas podem falhar por colapso plástico caso sejam sobrecarregadas. A curva de projeto não explicita a possibilidade de colapso plástico e pode não ser conservativa caso uma avaliação de colapso não seja realizada separadamente.

Downling & Townley, e também Harrison, introduziram o conceito do diagrama de análise de falha FAD (do inglês Failure Analysis Diagram), que descreve a interação entre fratura e colapso plástico (ANDERSON 1995) O primeiro diagrama FAD foi proposto por Dugdale, através da solução para um problema de estado plano de tensões de uma trinca em uma chapa infinita com material elástico perfeitamente plástico e sujeita à tração, pela introdução do conceito do fator de intensidade de tensões efetivo, que faz a correção dos efeitos de plasticidade na ponta da trinca.

Os principais parâmetros para estabelecimento do diagrama FAD são as razões $K_r = K_I / K_{mat}$ e $L_r = \sigma / \sigma_{ref}$, que relacionam os fatores de intensidade de tensões e as tensões aplicadas, com os seus respectivos valores críticos para o material analisado, sendo plotada então, uma curva que define as regiões segura e insegura do diagrama. Se a tenacidade do material for muito grande, poderá ocorrer colapso plástico quando S_r for maior que 1. Um material frágil vai falhar quando $K_r = 1$. Em casos intermediários, colapso e fratura interagem, ocorrendo a fratura dúctil, com K_r e S_r menores que 1. Todos os pontos dentro do diagrama são considerados seguros e pontos fora do diagrama são considerados inseguros (ANDERSON, 1995) (HIPPERT, 2004).

Segundo HIPPERT (2004), embora pareça banal, a utilização do diagrama FAD deve ser realizada com certa cautela, principalmente na determinação dos valores de K_r e L_r , que é a etapa crítica na análise de integridade baseada em diagramas FAD. Segundo o autor, os procedimentos de avaliação possuem diferentes formulações em função do nível de análise e diversas considerações devem ser feitas para a determinação de diversos parâmetros utilizados nas fórmulas, o que pode levar a diferentes resultados em função do nível de análise e do procedimento utilizado.

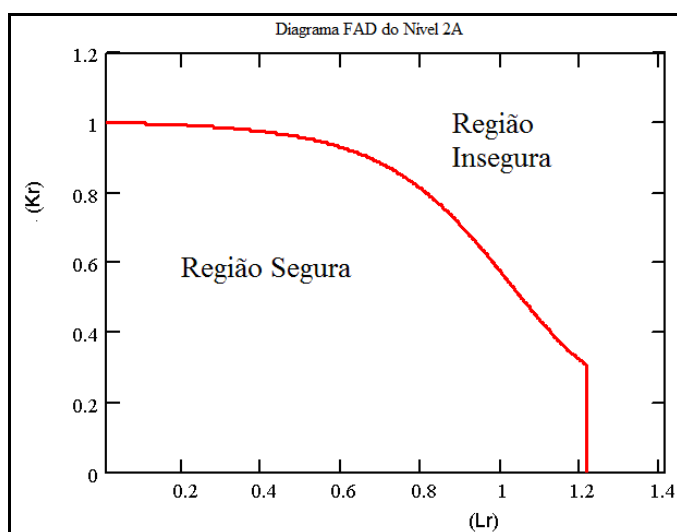


Figura 2.23 Exemplo de um diagrama FAD

2.4.7.3 A abordagem da adequação ao uso (fitness for service)

As análises de *fitness for service* ou adequação ao uso, como são conhecidas no Brasil, são avaliações quantitativas de engenharia, realizadas para demonstrar a integridade estrutural de um componente contendo um defeito ou dano (API 579 2007), sendo possível quantificar os riscos associados à operação de equipamentos contendo defeitos.

As avaliações consistem de métodos analíticos para avaliar defeitos e danos e, normalmente, requerem uma abordagem multidisciplinar contendo o seguinte:

- Conhecimento do mecanismo de dano e do comportamento do material;
- Conhecimento das condições de operação do passado e do futuro e interações com o pessoal de operação;
- Ensaios não destrutivos (localização e dimensionamento do defeito);
- Propriedades do material (efeitos do ambiente);

- Análise de tensões (geralmente análise por elementos finitos);
- Análise de dados (modelos de engenharia). (RASTOGI, 2006^b)
-

O produto de uma avaliação de FFS é uma decisão, tomada pelo responsável pela análise, de operar, alterar, reparar, monitorar ou substituir o equipamento em julgamento (RASTOGI, 2006^b). Também é possível definir, orientações sobre intervalos de inspeção futuros, novas condições seguras de operação para estruturas que contém defeitos, ou até mesmo estender a vida útil de equipamentos, o que mostra a importância econômica deste tipo de avaliação.

Para assegurar a integridade dos equipamentos, os responsáveis devem estar preparados tanto para detectar como para avaliar a significância dos defeitos existentes nas estruturas através dos procedimentos e métodos adequados. Nos últimos 45 anos houve grande desenvolvimento dos métodos de fitness for service para avaliação da significância destes defeitos (RASTOGI, 2006). Um exemplo do grande potencial econômico dos métodos de FFS: COOTE et al(apud STROHAECKER, 1999) , analisaram defeitos em tubulações e concluíram que os requisitos de qualificação de soldagem eram extremamente conservadores, mesmo nas situações mais críticas. Ao analisar um gasoduto, os autores concluíram que com a aplicação dos conceitos de adequação ao uso apenas 18 dos 650 defeitos detectados necessitavam de reparo, o que possibilitou uma economia de milhões de dólares (STROHAECKER, 1999). Há grande polêmica com relação a este assunto. Diversos autores já indicaram ser um absurdo a intolerância dos códigos a certos defeitos, bem como o conservadorismo dos requisitos de qualificação e soldagem. É fato conhecido das pessoas envolvidas no ramo das indústrias de processo que os equipamentos contém defeitos, que felizmente, em ampla maioria, são inócuos, podendo permanecer no equipamento sem causar problemas futuras e sem que seja necessário assumir o risco que advém da realização de reparos e a possibilidade de inserção e geração de novos defeitos

A seguir, serão apresentados alguns dos procedimentos de adequação ao uso mais utilizados atualmente nas indústrias de petróleo e gás, nuclear, química e de energia.

2.4.7.3.1 O Método R6

Em 1976 o CEGB (Central Electricity Generating Board), na Grã-Bretanha, incorporou o FAD a uma metodologia de análise de fratura, que tornou-se conhecida como R6. Nesta metodologia, o fator de intensidade de tensões total é obtido pela soma das componentes das tensões primária e secundária, e para cálculo do S_r , basta considerar as tensões primárias. Vale ressaltar que K_I é a intensidade de tensões da MFLE e não inclui correções de plasticidade. Efeitos de plasticidade são levados em conta na construção do FAD, já que este considera as análises de fratura e colapso plástico. Uma versão revisada do documento R6 publicada em 1980 oferece orientações práticas sobre como aplicar a metodologia strip yield FAD a estruturas reais. (ANDERSON, 1995)

O procedimento R6 recomenda que a tenacidade à fratura do material avaliado, enquanto dado de entrada para análise, seja obtida através de ensaio do material de acordo com a norma ASTM E399 ou norma equivalente da British Standard. Quando não for possível obter experimentalmente um valor de K_{IC} válido, pode-se medir o J_{IC} do material e converter essa tenacidade a um K_{Ic} equivalente.

2.4.7.3.2 PD 6493

Durante a década de 1970, a British Standard Institution organizou um comitê para que fosse elaborado um procedimento técnico capaz de substituir os códigos de projeto na avaliação de defeitos de soldagem. Em 1980 foi então lançado o PD 6493, que incorporava a curva de projeto de CTOD e permitia a avaliação de defeitos com relação à fratura frágil e fadiga, tratando a falha por colapso plástico de modo secundário. Esse documento permitia a análise de defeitos de várias formas, relacionando-os com defeitos passantes equivalentes. O defeito equivalente passante era aquele que produzia o mesmo fator de intensidade de tensões quando carregado com a mesma tensão apresentada pela estrutura com trinca superficial, ou seja, uma espécie de medida generalizada da severidade do defeito. Em 1991 foi lançada uma segunda versão do PD 6493, na qual a principal alteração foi a incorporação da metodologia FAD, que permitia a análise de fraturas frágeis e dúcteis e já havia sido introduzida, com sucesso, na metodologia R6 (ANDERSON, 1995),(HIPPERT, 2004).

CHALLENGER et al (1995) investigaram 8 falhas ocorridas em vasos de pressão utilizando o PD 6493. Os dados utilizados nas análises foram retirados dos relatórios de investigação de falha produzidos na época dos acidentes. As análises foram realizadas com a ajuda de 2 programas de computador desenvolvidos pelo TWI: Crackwise e PC6493. Os

autores concluíram que os procedimentos de avaliação PD6493 demonstraram-se seguros para todas as análises, prevendo a ocorrência das falhas. Esse sucesso, entretanto, era fruto do elevado grau de conservadorismo do procedimento e da exigência de utilização de dados extremamente confiáveis na análise. No entanto, estes resultados já sinalizavam que os procedimentos de adequação ao uso seriam ferramentas valiosas na verificação e avaliação de integridade dos equipamentos industriais, merecendo por tanto esforços para o aprimoramento dos métodos, reduzindo o conservadorismo e ampliando o escopo de defeitos e mecanismos de danos passíveis de avaliações.

2.4.7.3.3 BS 7910

O sucesso do PD 6493 fez com que o mesmo fosse revisado e ganhasse status de norma técnica no ano 1999, sendo então publicada a BS 7910 – Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.

A BS 7910 está dividida em 10 seções e 21 anexos. As seções 1 a 6 descrevem as informações requeridas para a avaliação, como as características e dimensões dos defeitos, carregamentos aplicados e propriedades dos materiais. As seções 7 a 10 fornecem os procedimentos para a avaliação de fratura, fadiga, defeitos sob condições de fluência e outros modos de falha, respectivamente. Os anexos contêm procedimentos informativos e normativos para o trato de diversas situações, como estabelecimento de fatores de segurança, fatores de intensidade de tensões, correlações para determinação da tenacidade através de ensaio Charpy e informações como perfis de distribuições de tensões em juntas soldadas, perfil de resistência em soldas, dados de tenacidade dos materiais, categorização de trincas, entre outros. Estas informações são mantidas num nível de estado da arte, sendo um dos recursos mais úteis da BS 7910. Também são fornecidos procedimentos para avaliação de crescimento de trinca por fadiga baseado em fatores qualitativos e cálculo do crescimento de trinca, além de um procedimento simples para avaliação de defeitos em temperaturas elevadas e corrosão, com alerta na avaliação adicional caso os resultados iniciais não fossem favoráveis.

A BS 7910 aborda os seguintes modos de falha:

- Fratura e colapso plástico
- Fadiga
- Fluência e Fluência-fadiga

- Vazamentos em vasos.
- Corrosão e/ou erosão
- Trincamento assistido pelo meio
- Falha por Instabilidade (Buckling)

São cobertos pelo escopo do documento defeitos planares, não planares e imperfeições de forma. (RASTOGI, 2006) Para cada defeito ou tipo de defeito deve-se considerar os seguintes pontos:

- Modos potenciais de falha
- Possíveis mecanismos de dano levando a degradação de propriedades ou crescimento subcrítico de trinca

A seção 7 é a mais utilizada e a mais importante para a realização deste trabalho, por tratar da avaliação de resistência à fratura. Engloba três níveis de análise baseados, principalmente, no conceito do diagrama de análise de falha FAD. Com o FAD determinado, verifica-se a posição do ponto de trabalho, determinando se o defeito é crítico ou não. Pontos de trabalho localizados fora do diagrama FAD indicam condições inseguras de operação. Nesse caso, os responsáveis pela análise devem indicar a realização de um reparo ou efetuar uma nova análise, menos conservadora, na tentativa de aprovar o defeito. (RASTOGI, 2006)

- a) O nível 1 é o procedimento mais simples e conservador, aplicado, preliminarmente, quando as informações sobre as propriedades dos materiais são limitadas ou pouco confiáveis, fornecendo apenas uma visão geral do problema. Esse nível não exige que a avaliação seja realizada por profissional especialista e com larga experiência. Há dois tipos de análise nível 1: na análise nível 1A utiliza-se o diagrama FAD, verificando a posição do ponto de trabalho e identificando se a condição é segura ou insegura. Já no nível 1B, não há utilização do diagrama FAD. Através do anexo N, determina-se a dimensão limite do defeito, uma dimensão de defeito equivalente a , definida como metade do comprimento de uma trinca passante em uma placa infinita sujeita a um carregamento remoto. Para trincas com geometria diferentes de uma trinca passante, deve-se utilizar as figuras N1 e N2 da BS 7910 para a obtenção de dimensões equivalentes. Determina-se a dimensão limite do defeito através do anexo N e compara-se este valor com o tamanho de defeito detectado na

inspeção. O método está baseado na determinação de defeitos equivalentes passantes, de tal modo que para defeitos não passantes deve-se utilizar as figuras N1 e N2 do anexo N para obtenção de dimensões equivalentes e possibilitar a comparação. A figura 2.24 apresenta um exemplo de diagrama FAD de nível 1, com suas características típicas.

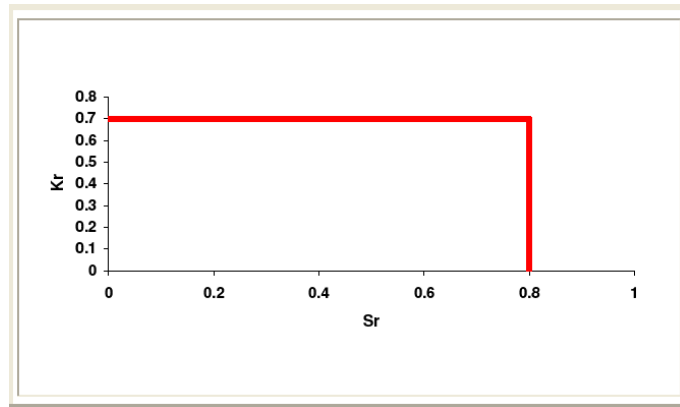


Figura 2.24 Exemplo de diagrama FAD de nível 1 da BS 7910 (2005)

- b) O nível 2 é o nível padrão de análise normalmente adotado pelas empresas. Utilizado quando os dados de tenacidade do material (K_{IC} , δ_{IC} , J_{IC}) são conhecidos. A análise de nível 2 estima a interação entre deformação e fratura, sendo o tipo de avaliação mais utilizado. Apresenta duas vertentes: as análises 2A e 2B. A análise 2A é caracterizada pela utilização de um diagrama FAD genérico, enquanto a 2B utiliza um diagrama FAD específico para o material a ser analisado, construído a partir das propriedades de tensão-deformação do material, com utilização da relação de Ramberg-Osgood. A figura 2.25 apresenta um diagrama FAD de nível 2 e suas principais características.

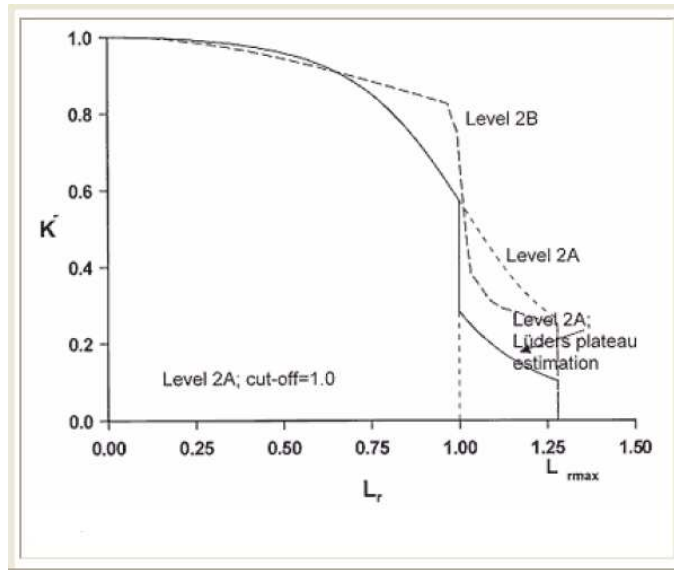


Figura 2.25 Exemplo de diagrama FAD de nível 2 da BS 7910 (2005)

c) O nível 3 é a avaliação mais criteriosa, apropriada para materiais dúcteis, pois permite que seja realizada uma análise de resistência ao rasgamento (cisalhamento dúctil), envolvendo cálculos dos efeitos de plasticidade. De maneira análoga ao nível 2, no nível 3 há duas(três) subdivisões, os níveis 3A, 3B e 3C, onde são utilizados diagramas FAD genérico, específico para o material e baseado em J, respectivamente. Os pontos de trabalho são obtidos progressivamente à medida que a descontinuidade cresce, sendo necessário conhecer a curva de resistência do material (J-R). No caso da análise de materiais dúcteis, a resistência à fratura aumenta com a propagação da descontinuidade, como já foi mostrado no capítulo de mecânica da fratura. Desse modo, é possível que descontinuidades consideradas inaceitáveis pelo nível 2 possam evoluir para condições aceitáveis numa avaliação nível 3. A figura 2.26 ilustra o locus de avaliação e evolução de defeitos por rasgamento dúctil e apresenta um típico diagrama FAD de nível 3.

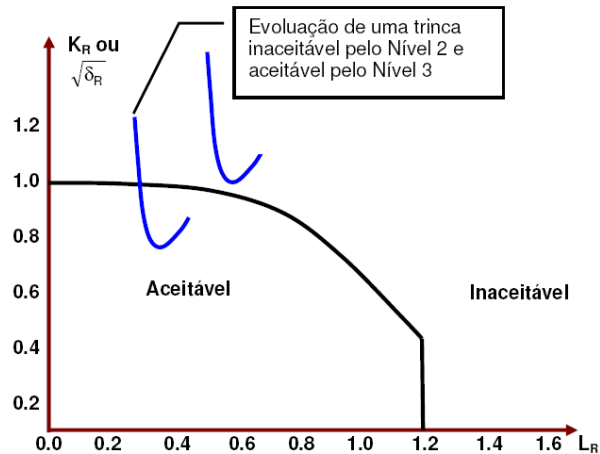


Figura 2.26 Exemplo de diagrama FAD nível 3 e a evolução de defeitos por rasgamento dúctil. Fonte: DONATO

A escolha do nível de análise a ser utilizado depende do material envolvido, das informações disponíveis e do nível de conservadorismo requerido

Danos e crescimento subcrítico de descontinuidade podem ser afetados pelo próprio material, características de projeto, níveis de tensão, tempo, carregamento cíclico, composição e concentração dos fluidos de processo e aditivos, taxas de fluxo, temperaturas de operação, ambiente externo, etc

Para a realização da avaliação de um defeito conhecido, o procedimento recomenda a seguinte seqüência de análise: (BS 7910, 2005)

- a) Identificar o tipo de defeito => Planar, não-planar ou a forma apresentada;
- b) Estabelecer os dados essenciais, relevantes para a estrutura particular;
- c) Determinar o tamanho do defeito;
- d) Avaliar os possíveis mecanismos de danos e as taxas de danos;
- e) Determinar o tamanho limite do defeito para os modos finais de fratura;
- f) Baseado na taxa de dano, avaliar se o defeito cresceria até seu tamanho limite dentro da vida remanescente da estrutura ou no intervalo de inspeção em serviço, através de crescimento subcrítico de trinca;
- g) Avaliar as conseqüências da falha;
- h) Execução de análises de sensibilidade;
- i) Caso o defeito cresça até o tamanho crítico calculado, incluindo fatores de segurança apropriados, é considerado aceitável. Idealmente os fatores de segurança

devem ser levados em conta tanto na avaliação do defeito quanto nas consequências da falha.

Abaixo estão os dados e informações considerados essenciais para a análise: (BS 7910, 2005)

- a) natureza, posição e orientação do defeito;
- b) Geometria estrutural e da solda, procedimento de fabricação;
- c) Tensões (pressão, térmica, residual ou resultante de qualquer outro tipo de carregamento mecânico) e temperaturas, incluindo transientes;
- d) Limite de escoamento ou 0,2% de resistência, resistência à tração e módulo de elasticidade (em certos casos, uma curva completa de tensão de engenharia/deformação é requerida);
- e) Dados de corrosão-fadiga, fadiga S-N e de propagação de trinca;
- f) Dados de tenacidade à fratura (K_{IC} , J ou CTOD) – Em certos casos a tenacidade à fratura podem ser estimadas a partir de dados de ensaio Charpy;
- g) Dados de fluência, propagação de trinca por fluência e fluência-fadiga.
- h) Dados de bulk corrosion e trincamento por corrosão sob tensão (K_{ISCC}).

Os dados essenciais obviamente dependem do tipo de análise a ser realizada e dos mecanismos de danos atuantes. A lista acima, evidentemente, reflete uma idéia geral das informações requeridas para a realização de uma avaliação segura e consistente.

Inspeção é um aspecto essencial na avaliação de adequação ao uso. As técnicas de END utilizadas para a avaliação do defeito devem ser escolhidas para proporcionar a informação requerida para um grau de acurácia aceitável. Tal informação deve incluir alguns dos seguintes itens:

- a) comprimento do defeito
- b) altura / profundidade do defeito
- c) posição do defeito
- d) orientação do defeito com relação à direção da tensão principal
- e) se a seção transversal do defeito é planar ou não-planar.

Aspectos relativos à distribuição de tensões a serem consideradas na avaliação também são extremamente importantes e merecem todo cuidado na análise. O anexo C da

BS 7910 fornece orientações sobre aspectos específicos da avaliação de vasos de pressão e tubulações. Avaliação específica para vasos de pressão será detalhada na Metodologia do trabalho. (BS 7910, 2005)

2.4.7.3.4 API 579-I / ASME FFS-I

O ímpeto para o desenvolvimento de uma norma de adequação ao uso que pudesse ser referência para os códigos API de inspeção (API 510, API 570, API 653), foi fornecido por um projeto *multicliente* (JIP- *Joint Industry Project*) que foi administrado pelo Materials Properties Council (MPC), cuja meta era garantir a segurança das plantas das indústrias de processo.

O ponto de partida para o desenvolvimento dessa nova norma foi uma grande revisão das normas internacionais de *fitness for service* existentes, realizada pelos membros do MPC JIP e iniciada em 1991. Naquele momento, existiam muitos métodos criados dentro das empresas (company-based), direcionados aos seus problemas específicos, mas que não abordavam toda a complexidade dos problemas e não eram capazes de usar toda a tecnologia existente. Estava clara a necessidade de uma nova norma, mais genérica, que pudesse ser adotada por todas as companhias e ganhar aceitação nas jurisdições locais dos EUA. Os resultados deste trabalho foram documentados num relatório, que mais tarde transformou-se no comitê de equipamentos de refino (CRE). Adotado, em termos, pelo grupo tarefa API CRE FFS, foi criado então a prática recomendada API RP 579. (ANDERSON 2000) Reconhecendo a oportunidade de evitar duplicações e conflitos com normas paralelas, ASME e API formaram um comitê de FFS em 2001, para desenvolver e manter uma norma de FFS para equipamentos largamente operados/utilizados nas indústrias de geração de energia, processo e fabricação. Nasceu assim, em 2007, o API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service. (API 579 2007)

Embora não existisse, até aquele momento, uma norma simples e compreensível não existisse, a tecnologia contida nas diversas normas corporativas existentes englobava a análise de muitos tipos de defeitos. Boa parte dessas metodologias foram incorporadas ao API 579 e, em muitos casos, elas foram significativamente melhoradas. Em alguns casos, onde a tecnologia não foi diretamente incorporada ao API 579, os membros do grupo tarefa API CRE FFS consideraram que abordagens alternativas seriam mais adequadas para uso de usuários mais avançados. O nível 3 do API 579 / ASME FFS-I permite o uso de metodologias alternativas para análises de adequação ao uso. Na secção 9 do

documento, que cobre análise de defeitos tipo trincas, há referências ao R6, à BS 7910, ao SAQ/FoU-Report 96/08, ao WES 2805 e à metodologia EPRI J-integral.

Os principais objetivos do API 579 são: garantir a segurança das instalações, dos trabalhadores da planta e da população do entorno, fornecer procedimentos técnicos para avaliações de adequação ao uso, garantir que diferentes fornecedores de serviço encontrem previsões de vida remanescente consistentes e ajudar a otimizar a manutenção e operação dos equipamentos e estruturas existentes, para manter a disponibilidade de plantas antigas e aumentar a viabilidade econômica de longo-prazo. Os procedimentos de análise do API 579 podem ser usados em avaliações de adequação ao uso ou reclassificações de equipamentos projetados em diversos códigos e normas internacionais. Uma avaliação de adequação ao uso, como já foi dito anteriormente, consiste numa análise de engenharia para determinar se o equipamento está em condições de integridade adequadas para continuar operando.

O documento é altamente estruturado, projetado para facilitar o uso do profissional e propiciar melhorias futuras e modificações. A seção 1 cobre a introdução e o escopo. A seção 2 apresenta uma visão geral da metodologia. Da seção 3 até a seção 13, estão apresentados os procedimentos de avaliação de adequação ao uso organizado por mecanismos de dano. A lista de defeitos e danos abordados atualmente pelo documento é a seguinte: fratura frágil, perda de metal/espessura generalizada, perda de metal/espessura localizada, corrosão por pites, blisters e outros danos por hidrogênio, desalinhamento em soldas e distorções, defeitos tipo trincas, operação em alta temperatura e fluência, danos por fogo, avaliação de entalhes, cavidades, ranhuras e combinações destes, além de laminações. Uma série de apêndices é disponibilizada, contendo informações técnicas que podem ser usadas em todas as seções do documento. A maior parte da informação dos apêndices cobre técnicas de análise de tensões, dados de propriedades dos materiais e outras informações pertinentes que são requeridas para a avaliação. A abordagem consistente para o tratamento do dano e os procedimentos de avaliação associados facilitam o uso do documento, de tal modo que um profissional familiarizado com uma seção, não terá qualquer problema em utilizar uma outra, devido a sua estrutura comum.

A seção 9 (*Assessment of crack like flaws*) é a mais importante e a mais utilizada, pois trata da avaliação de defeitos tipo trincas em equipamentos pressurizados utilizando a metodologia do diagrama FAD. São disponibilizados três níveis de avaliação para defeito ou tipo de dano. Em geral, cada nível de análise proporciona um balanço entre

conservadorismo e a quantidade de informações requeridas para a análise, habilidade ou perícia do profissional que realizará a tarefa e a complexidade das análises realizadas.

O nível 1 proporciona o critério mais conservativo, podendo ser utilizado com mínima quantidade de inspeção e informação sobre o equipamento. Nesse nível de análise, calcula-se, de acordo com o procedimento, o tamanho máximo de defeito admissível e compara-se o resultado com o tamanho do defeito existente, obtido mediante inspeção por END. Se o defeito existente for menor que o calculado, o componente está em condição aceitável para continuar operando. Caso o componente não esteja adequado pelos requisitos da análise nível 1, podem ser realizadas análises de nível 2 ou nível 3.

O nível 2 proporciona uma análise mais detalhada, produzindo resultados menos conservativos que os de nível 1. Cálculos mais detalhados são utilizados e a análise deve ser feita por profissional com conhecimento e experiência na realização de análises de FFS. Assim como no caso de outros proeminentes procedimentos de análise, como o R6 e a BS 7910, a metodologia do diagrama de análise de falha (FAD) é a base da avaliação de defeitos. São plotados num diagrama a razão de tenacidade K_r e a razão de carregamento L_r . A curva FAD representa os pontos de falha previstos. Se o ponto de avaliação estiver dentro da curva, o defeito é considerado aceitável.

As definições de K_r e L_r do API 579 são parecidas às presentes no R6 e na BS 7910, contendo pequenas alterações. No cálculo de K_r , por exemplo, o R6 e a BS 7910 apresentavam para efeito de consideração dos efeitos de plasticidade devido às tensões secundárias um fator ρ . No API 579 aparece um fator Φ para ajuste de plasticidade, que multiplica o fator de intensidade de tensões devido às tensões secundárias (K_{st}). ρ e Φ são formulações derivadas da mesma análise. No entanto, a formulação do fator ρ implica que a tenacidade seja dependente da formação da zona plástica, o que não possui qualquer base teórica. No caso da definição do L_r , embora a equação apresentada pelo API 579 seja idêntica à apresentada pelo R6 e pela BS 7910, o API propõe uma definição alternativa para a tensão de referência.

O nível 2 de análise utiliza fatores de segurança parciais sobre a tenacidade, o tamanho de defeito e a tensão, de modo que o usuário pode selecionar a confiança/segurança alvo e realizar análises determinísticas. A figura 2.27 apresenta um diagrama FAD típico de uma avaliação de nível 2 do API 579.

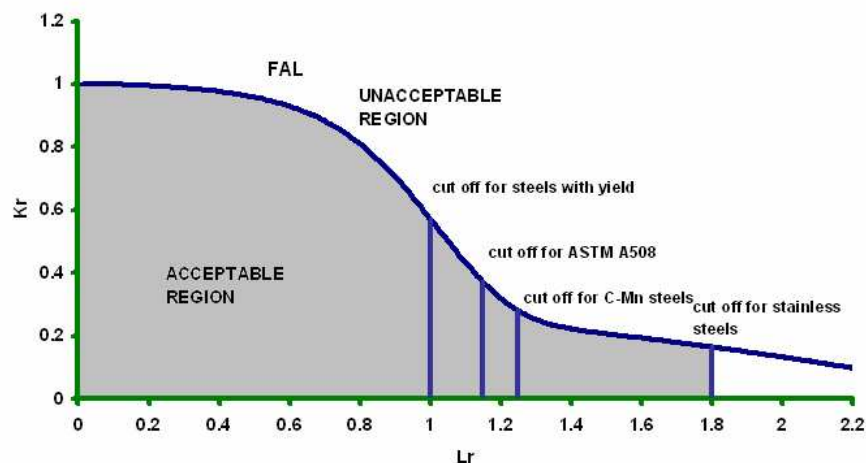


Figura 2.27 Exemplo de diagrama FAD nível 2 do API 579

O nível 3 é o nível de análise mais complexo, exigindo inspeção mais detalhada, rigorosa e precisa, e informações mais precisas sobre o equipamento. Recomenda-se que a avaliação seja baseada em técnicas de análise numérica como por exemplo, o método de elementos finitos.

A avaliação nível 3 é a que provê melhor estimativa de integridade estrutural de um componente contendo dano. Além disso esse nível de avaliação é exigido quando é possível ocorrer crescimento subcrítico de descontinuidade (CSCD) em operação futura. O nível 3 fornece ao usuário uma quantidade substancial de flexibilidade, oferecendo 5 opções de avaliação:

- Método A – Semelhante ao nível 2 de avaliação com uso de fatores de segurança parciais ou uma análise probabilística
- Método B – FAD específico para o material, similar à opção 2 do R6
- Método C – FAD baseado em J, obtido através de análise elasto-plástica de elementos finitos, similar à opção 3 do R6.
- Método D – Avaliação de rasgamento dúctil
- Método E – Uso de procedimento de avaliação reconhecido, como R6 ou BS 7910

Se os resultados da avaliação de FFS indicarem que o equipamento não tem condições de continuar operando nas condições atuais, o API 579 provê métodos para reclassificar o componente. Esses métodos de cálculo permitem estimar uma pressão, ou temperatura, máxima permitida reduzida, de modo que o equipamento possa operar em novas condições seguras de operação.

3.0 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Para investigar as condições de ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades durante a realização de THs em vasos de pressão, analisar a influência de algumas propriedades dos materiais na ocorrência deste fenômeno e avaliar os efeitos da ocorrência deste fenômeno, este trabalho foi baseado num cenário arbitrado, composto por um vaso de pressão cilíndrico, típico de refinaria de petróleo, contendo uma descontinuidade de características conhecidas, que é então submetido a um teste hidrostático conforme estabelecido em seu código de projeto. Com base nos procedimentos apresentados no nível 3 da norma inglesa BS 7910 para análise de rasgamento dúctil e através da utilização do software crackwise®, que incorpora integralmente os procedimentos desta norma, foi possível realizar diversas simulações da situação proposta, alterando os valores de profundidade de defeito, da tenacidade à fratura e do expoente de encruamento do material, analisando a resposta do defeito frente ao carregamento imposto pelo TH e avaliando sua estabilidade através de diagramas FAD.

Nos tópicos seguintes serão apresentados, em maior detalhe, o equipamento objeto de estudo, as características e faixa de dimensões dos defeitos utilizados nas análises, as variáveis avaliadas, o procedimento de análise de rasgamento dúctil da BS 7910 e o software crackwise® utilizado para realizar as simulações.

3.2 O equipamento objeto de estudo

O primeiro passo para a composição do cenário foi a determinação do equipamento adotado para a realização dos estudos. Para aumentar a abrangência e aplicabilidade do trabalho, foi selecionado um vaso de pressão típico de refinaria de petróleo, com características e dimensões que podem ser comumente encontradas numa planta de processamento. Os dados do equipamento encontram-se na tabela 3.1:

Tabela 3.1 Dados do equipamento utilizado no estudo

Equipamento : Vaso de Pressão	Características e variáveis
Código de projeto	ASME Seção VIII – Divisão 1 (após 1998)
Material de fabricação	Aço carbono – ASTM SA 516 gr 60
Comprimento	L = 6.000 mm
Raio Interno	r = 1.000 mm
Espessura de parede	t = 25 mm
Pressão máxima de trabalho admissível	PMTA = 26 kgf/cm ²
Pressão de Teste Hidrostático	P _{TH} = 33,8 kgf/cm ²
Temperatura de operação	T = 25°C

A tensão primária de membrana devida ao teste hidrostático é de 135 MPa. Não foram consideradas tensões primárias de flexão nem tensões térmicas. O fator de concentração de tensões para as tensões primárias de membrana foi considerado igual a 1. Como o equipamento não passou por tratamento térmico pós-soldagem, as tensões residuais de soldagem (Q_m) admitidas nas simulações são de valor igual à tensão de escoamento do material na temperatura ambiente (σ_y), de acordo com a tabela 3.2, conforme recomendado pela BS 7910.

Tabela 3.2 Valores de tensões residuais de soldagem recomendados pela BS 7910.

	Sem TTAT	Com TTAT
Trincas transversais ao cordão de solda	$Q_m = \sigma_y$	$Q_m = 30\% \sigma_y$
Trincas paralelas ao cordão de solda	$Q_m = \sigma_y$	$Q_m = 20\% \sigma_y$

3.3 A presença de defeitos no equipamento.

Sendo o objetivo deste trabalho avaliar a possibilidade de crescimento subcrítico de descontinuidades, estas deveriam fazer parte do cenário criado para o estudo, sendo caracterizadas e dimensionadas para possibilitar a realização da análise de rasgamento.

Considerou-se, então, a presença de uma trinca superficial, localizada na parte interna do equipamento. Avaliações de criticidade preliminares mostraram que para a proposta deste trabalho, que considera a presença de trincas superficiais, a partir de determinado comprimento mínimo a profundidade da trinca torna-se a dimensão crítica para a fratura, com o comprimento da mesma ocupando papel secundário. Deste modo optou-se por manter, em todas as simulações, o comprimento da trinca constante e igual a 100mm. Foram utilizados os valores de 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 20mm de profundidade de trinca e a cada simulação foi dimensionada a extensão da trinca na direção da profundidade.

Foram realizadas análises de criticidade nos níveis 2 e 3 da BS 7910 para cada uma das situações avaliadas, determinando os tamanhos críticos de defeito para cada par (tenacidade, expoente de encruamento), sendo possível então caracterizar a resposta dos defeitos à aplicação do TH sob as seguintes formas: cegamento da ponta da descontinuidade (blunting), crescimento subcrítico de descontinuidade (CSCD) ou crescimento crítico (falha).

3.4 Dados de tenacidade e propriedades mecânicas.

Em ambiente industrial, os profissionais de inspeção deparam-se com a falta de dados confiáveis de tenacidade à fratura dos materiais empregados na fabricação dos equipamentos. Em geral, há disponibilidade de dados de ensaio de impacto Charpy oriundos dos registros originais de fabricação dos equipamentos e estes são correlacionados a valores de tenacidade (K, J, CTOD), ou, alternativamente, são adotados valores *lower-bound* ou *cut-offs* típicos, para manter certo conservadorismo na análise. Essa alternativa, no entanto, leva a resultados muito pessimistas, limitando a aplicação das análises, por não representar as condições reais dos equipamentos.


Assim como diversas outras propriedades dos materiais, a tenacidade também está sujeita a variações aleatórias, de modo que a utilização de valores determinísticos não reflete a realidade, por haver, de fato, uma distribuição de valores daquela propriedade, ao longo do equipamento. Segundo LAFRAIA (2001), em situações onde o crescimento da

trinca seja predominante, as variações de tenacidade são de menor importância. Por outro lado, em casos onde crescimentos muito pequenos de trinca podem ocasionar a falha, as variações de tenacidade são de primordial importância. Comumente assume-se que valores de tenacidade como K_{IC} e J_{IC} assumem distribuições do tipo normal ou Weibull, sendo os parâmetros determinados por ensaios. Deve-se salientar também, o fato de que a tenacidade pode variar com o tempo, como no caso de equipamentos sujeitos a meios contendo hidrogênio, expostos à radiação ou submetidos a mecanismos de dano que causem fragilização, como por exemplo materiais que sofrem fragilização ao revenido.

Para a proposta deste trabalho e por exigência do procedimento da BS 7910 para a análise de rasgamento dúctil, a tenacidade à fratura é requerida na forma de uma curva de resistência CTOD ou J . Como citado nos objetivos, este trabalho adotará uma curva J-R baseada na lei de potência empírica apresentada pela BS 7910, que relaciona a extensão da trinca com o parâmetro J pela equação 3.11, onde a resistência ao rasgamento é definida como uma função da quantidade de extensão da trinca (Δa). A adoção dessa relação e definição de seus parâmetros permite que o software crackwise® trace a curva J-R do material. Os valores da constante C e do coeficiente n adotados no estudo foram retirados da tabela F.10, do apêndice F do ASME FFS I/API 579, e representam valores típicos para a classe de materiais empregada no equipamento em estudo para espessuras de 1", conforme mostrado na tabela 3.3.

$$J = C \cdot \Delta a^n \quad (3.11)$$

Tabela 3.3 Valores dos parâmetros das curvas J-R de resistência ao rasgamento dúctil [ASME FFS I / API 579]



Material	Temperature (°F)	Thickness (in)	J_T (in-lb/in ²)	C_T (in-lb/in ²)	n_T	Reference
Generic CS-1	550	1.0	350	1808	0.277	99
Generic CS-2	550	1.0	600	2563	0.274	99
Generic CS-3	550	1.0	1050	5400	0.344	99
T 304 SS	75	1.0	6500	32758	0.519	99
Generic SS/SMAW	550	1.0	990	6033	0.391	99
Generic SS/SAW	550	1.0	650	4448	0.431	99
A508 Cl3	550	1.378	446	3443	0.329	99
A106 Gr B (NPS 8 inch Pipe)	120	0.54	2900	13008	0.334	99
TP 304 SS (NPS 4 inch pipe)	75	0.34	8000	33642	0.435	99

Notes:

- The values in this table represent typical values for the stated temperature and wall thickness, actual values should be used when available.
- The equation for the J-R curve is:

$$J_T = C_T (\Delta a)^{n_T}$$

Para maior abrangência do estudo e avaliação mais consistente da influência da variação de tenacidade na extensão da trinca, o valor original de C foi modificado para gerar duas novas curvas de tenacidade, sendo a primeira delas com valor da constante C 50% superior ao valor original e a outra com valor de C 50% inferior ao original. Dessa forma, a análise dos defeitos será realizada em três diferentes condições de tenacidade (menor tenacidade, tenacidade média e maior tenacidade), permitindo uma análise comparativa entre as situações. Cabe ressaltar que as unidades mencionadas na tabela acima encontram-se no sistema inglês de unidades enquanto que neste trabalho foi realizado com unidades no sistema internacional de unidades. A tabela 3.4 apresenta os valores dos parâmetros adotados para gerar as curvas J-R. A direção de rasgamento adotada foi a da profundidade da trinca, sendo adotado valor de rasgamento mínimo (*minimum tearing*) igual a zero e o valor de rasgamento máximo (*maximum tearing*) igual a 1,0mm. Crescimentos de trinca superiores a 1,0mm não foram quantificados.

Tabela 3.4 Parâmetros usados para levantamento das curvas J-R.

Material	C [kJ/m ²]	n_T
Menor tenacidade	64,62	0,277
Tenacidade média	129,24	0,277
Maior tenacidade	193,86	0,277

Para a construção de um diagrama FAD específico, característico da análise no nível 3B, é necessário entrar com dados relativos ao comportamento da curva tensão-deformação do material, geralmente obtidos através da relação de Ramberg-Osgood, já citada na revisão bibliográfica. Em casos reais, estes valores são obtidos mediante ensaio de tração. Um dos parâmetros importantes para a definição do comportamento do material é o seu expoente de encruamento (n). Para este estudo, foram adotados três valores de n : $n=5$; $n=10$ e $n=20$. A variação deste parâmetro eleva a abrangência do trabalho, permitindo a avaliação da influência do expoente de encruamento do material (n) na resposta da trinca ao carregamento imposto pelo TH seja na quantificação do crescimento subcrítico ou na estabilidade do defeito conforme posição do lócus no FAD, cuja curva é alterada em função deste parâmetro.

No que diz respeito a propriedades mecânicas, os dados obtidos para o aço SA 516 gr 60 e utilizados nas análises estão apresentados na tabela 3.5:

Tabela 3.5 Propriedades mecânicas do aço SA 516 Gr 60

Tensão limite de escoamento	LE = 220 MPa
Limite de resistência à tração	LR = 414 MPa
Módulo de elasticidade	E = 207.000 MPa
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,3$
Tensões residuais de soldagem	220 MPa

Os dados de entrada e informações utilizadas são típicos e coerentes com valores reais. Uma avaliação completa exigiria novos ensaios, análises de tensões, inspeções adicionais e trabalhos metalúrgicos para geração de dados mais adequados e confiáveis. Obter dados relevantes e confiáveis pode ser difícil, principalmente valores de tenacidade, por isso a variação desse parâmetro se faz necessária e enriquece a análise.

3.5 O procedimento de análise de rasgamento dúctil da BS 7910

O nível 3 da norma BS 7910 (*tearing analysis*) estabelece métodos para análise de rasgamento dúctil, sendo aplicável a materiais que apresentam valores de tenacidade que possibilitem o crescimento estável de trinca antes da fratura. Ao contrário do nível 2, que considera o parâmetro J_{IC} como critério de fratura, no nível 3 considera-se o aumento de resistência do material à medida que a trinca avança, de tal modo que defeitos que apresentem pequenas propagações, inaceitáveis pelo nível 2, podem ser considerados

aceitáveis pelo nível 3. Esta reserva de tenacidade é devida a diversos fenômenos que ocorrem em virtude da deformação na ponta do defeito, dentre os quais, o encruamento é o principal. Por isso, é fundamental a disponibilidade de dados de tenacidade representados por curvas J-R completas e de dados precisos do comportamento tensão-deformação do material para verificação dos expoentes de encruamento.

A análise de rasgamento dúctil resulta na plotagem de um lócus de pontos de avaliação, no qual pontos consecutivos são obtidos progressivamente a medida que a trinca cresce. Caso o ponto ou parte do lócus repouse dentro da área delimitada pelos eixos do diagrama e pela linha do FAD, a chamada região segura, o defeito é considerado aceitável (B); caso contrário, o defeito é inaceitável (C). Utilizando este procedimento também é possível quantificar o quanto uma trinca cresce, de modo estável, até alcançar a estabilidade, quando o lócus entra na região segura do diagrama FAD (A), ou seja, é possível quantificar seu crescimento subcrítico ao ser submetida a um carregamento. A figura 3.1 exibe os possíveis cenários de uma análise de rasgamento dúctil baseada nos procedimentos da BS 7910.

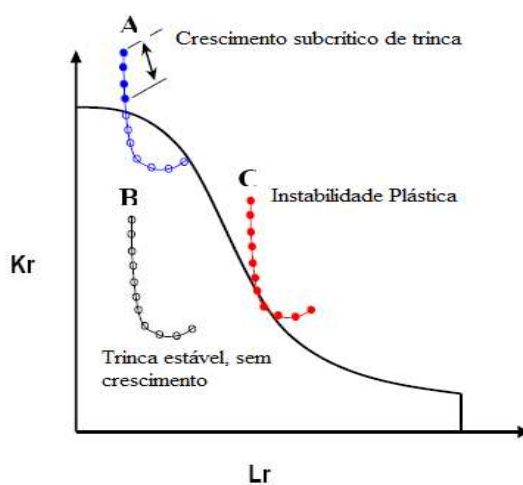


Figura 3.1 Possíveis resultados de uma análise de rasgamento dúctil.

O nível 3 é o procedimento de avaliação menos conservador. Neste nível de análise não há fatores de segurança intrínsecos. Todavia, fatores de segurança parciais podem ser incluídos. A norma recomenda que análises de sensibilidade sejam realizadas com relação a tamanhos de defeito, carregamentos e propriedades do material, antes que a decisão final quanto à aceitação seja tomada.

O procedimento de análise nível 3 utilizado neste trabalho para determinar o crescimento da trinca (Δa), envolveu a geração de diversas curvas de avaliação no diagrama FAD, geradas pelo crackwise através de uma análise de sensibilidade para a faixa

de valores de profundidades de trinca adotada no estudo. Para cada tamanho de descontinuidade o lócus pode representar defeito inócuo, onde todo o comprimento repousa no interior da região segura, defeito que cresce de modo subcrítico, onde apenas parte do lócus está dentro do FAD ou defeitos críticos, onde todo o lócus está fora do FAD, na região insegura, conforme mostrado na figura 3.1.

O diagrama FAD nível 3B é determinado através do comportamento de tensão-deformação do material, utilizando as equações apresentadas pela BS 7910. Como a proposta do trabalho incluía a modificação dos FADs pela alteração do expoente de encruamento, que pode levar a alterações nos valores de crescimento de defeito e reposicionamento do lócus em relação à linha de avaliação do diagrama, fazendo com que os defeitos apresentem novas situações de criticidade ou aceitação

Os procedimentos para determinação das componentes de tensão, fatores relacionados são os mesmos descritos para o nível 2. Idem para tensões residuais. A determinação da tenacidade aplicada, das componentes de tensões e das tensões residuais é semelhante a do nível 2.

A análise de rasgamento dúctil deve ser realizada de acordo com o seguinte procedimento estabelecido pela BS 7910: (BS 7910 2005)

1. Definição do tamanho do defeito conhecido – a_0 (profundidade inicial da trinca)
2. Definição do K_{mat} ou δ_{mat} ; (tenacidade do material)
3. Definição de Δa_g (tearing máximo),que é o valor limite de extensão da trinca em será realizada a análise; neste estudo o tearing máximo adotado foi de 1,0mm
4. Se Δa_g for menor que 1mm, calcular L_r e K_r usando as equações pertinentes. K_I e σ_{ref} são calculados para um tamanho de defeito $a = a_0 + \Delta a_g$, incluindo fatores de segurança parciais na tensão e no tamanho de defeito, caso seja apropriado.

Plota-se todos os pares L_r e K_r como coordenadas de pontos do FAD para derivar o lócus de pontos de avaliação. Se o lócus estiver completamente fora da linha de avaliação, o defeito é inaceitável. Se ele cruza a linha de avaliação, poderá ocorrer algum rasgamento dúctil, todavia, é previsto que se estabilize e o defeito é aceitável.

Para os níveis 2 e 3 de análise, o levantamento da linha de avaliação do diagrama FAD é dado pelas equações 3.2 (a) e (b), de acordo com o seguinte:

a) Para $L_r < L_r \text{ max}$, temos:

$$\sqrt{\delta_r} \text{ or } K_r = \left(\frac{E\epsilon_{ref}}{L_r\sigma_Y} + \frac{L_r^3\sigma_Y}{2E\epsilon_{ref}} \right)^{-0.5} \quad (3.2) \text{ (a)}$$

b) Para $L_r > L_r \text{ max}$

$$\sqrt{\delta_r} \text{ ou } K_r = 0 \quad (3.2) \text{ (b)}$$

Para as análises dos níveis 2 e 3, K_I possui a forma genérica apresentada pela equação 3.3.

$$\boxed{K_I = Y\sigma^* \sqrt{\pi a}} \quad (3.3)$$

Onde $Y\sigma^*$, por sua vez, segundo a BS 7910, pode ser definido pela equação 3.4.

$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s \quad (3.4)$$

onde: $(Y\sigma)_p$ e $(Y\sigma)_s$, equações 3.5(a) e (b) representam as condições das tensões primárias e secundárias, respectivamente. Sendo:

$$(Y\sigma)_p = Mf_w [k_{tm} M_{km} M_m P_m + k_{tb} M_{kb} M_b \{P_b + (k_m - 1) P_m\}] \quad (3.5) \text{ (a)}$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b \quad (3.5) \text{ (b)}$$

As expressões para os fatores M , f_w , M_m e M_b são fornecidas em anexos da norma. M_{km} e M_{kb} são aplicados quando os defeitos estão localizados em regiões de concentração local de tensões. O anexo M da BS 7910 possui soluções específicas para várias geometrias, incluindo chapas planas, chapas curvadas, juntas soldadas e barras.

A razão de fratura K_r é calculada a partir da equação 3.6, onde ρ é o fator de correção de plasticidade, necessário para permitir a interação entre as contribuições das tensões primárias e secundárias.

$$\boxed{K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} + \rho} \quad (3.6)$$

A estimativa de L_r é dada pela equação 3.7, onde σ_{ref} é obtida através da adoção da solução apropriada para a tensão de referência, indicada no anexo P da BS 7910.

$$\boxed{L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y}} \quad (3.7)$$

No caso de defeitos superficiais ou internos, K_I deve ser calculado em alguns pontos ao longo da frente de trinca. O valor máximo de K_I frequentemente ocorre no ponto mais profundo das trincas superficiais. Da mesma forma, é possível que o K_{mat} varie ao longo da trinca, devido à falta de homogeneidade do material ou à variação do constraint.

Abaixo seguem as definições de alguns dos fatores utilizados para o cálculo da tenacidade aplicada.

Fator geométrico para tensões de membrana (M_m) = Fator de forma que é função de relações entre dimensões da trinca e componente e do tipo de defeito (superficial, interno).

Fatores de concentração de tensões (K_{tm} (membrana); K_{tb} (flexão)) = determinam o grau de intensificação de tensões de membrana e flexão, respectivamente, em relação a distribuição de tensões real na seção do componente. Os produtos $K_{tm} \cdot P_m$ e $K_{tb} \cdot P_b$ correspondem aos valores das tensões de pico atuantes.

Fatores de concentração de tensões na margem do cordão (M_{km} , M_{kb}) – nível 2 = Utilizados para defeitos localizados nas margens de cordões de solda, o apêndice M da BS 7910 apresenta fatores para incremento/aumento das tensões primárias.

Fator geométrico para tensões de flexão (M_b) nível 2 = Este fator é função de relações entre dimensões da trinca e do componente, além da tipo de defeito (superficial e interno).

σ_f “flow stress” é o valor médio entre a tensão de escoamento e o limite de resistência do material, até o máximo de $1,2 \sigma_y$.

A soluções adotadas neste trabalho para a determinação do fator de intensidade de tensões (tenacidade aplicada) estão demonstradas nos apêndices da BS 7910 e incorporadas ao software Crackwise, que melhor representam a configuração adotada no estudo:

- O fator de intensidade de tensões para defeitos axiais em cilindros (Chapas curvas) com correção da curvatura, de acordo com anexo M 4.2
- A solução para a tensão de referência adotada, de acordo com anexo P 4.3.1 para defeito axial em cilindros orientados axialmente.

3.6 Realização das simulações – O software Crackwise®

Para a realização das simulações apresentadas neste trabalho foi utilizado o software crackwise® em sua versão atual (4.1.5616.0). Desenvolvido pelo TWI (The

Welding Institute) para auxiliar a tomada de decisões por parte de engenheiros envolvidos com a análise de integridade de estruturas e equipamentos industriais, este software constitui uma aplicação automática e rigorosa dos procedimentos de avaliação de integridade especificados pela norma inglesa BS 7910: 2005 – *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*.

Utilizando o crackwise® é possível realizar análises de fratura, fadiga e fratura-fadiga combinadas. De maneira simples, podem ser obtidos valores críticos de tamanhos de defeitos e tensões, bem como propriedades do material como, por exemplo, valores e curvas de tenacidade. O software é dotado de um banco de dados com diversas configurações de defeitos para chapas planas, cascos, dutos, tubulações e barras, incluindo defeitos superficiais, internos e passantes. Também possui soluções para determinação de fatores de intensidade de tensões e tensões de referência, e permite a determinação das condições limites de projeto, operação e extensão da vida útil do componente avaliado. Há, também, ferramentas para correlação de tenacidade com valores de energia Charpy e cálculo de limite de escoamento.

Devem ser destacadas as opções para análise automática de sensibilidade dos parâmetros de entrada para cálculos de fratura, permitindo ao usuário avaliar as respostas às mudanças nas condições de projeto ou operação, e tolerâncias com relação ao seu efeito sobre os fatores de segurança relacionados. Também é possível a escolha entre o sistema inglês ou sistema internacional de unidades. Há ainda a possibilidade de exportar dados para o microsoft Excel e a geração de relatórios em PDF.

Os usuários também podem contar com suporte técnico do TWI, através de seus especialistas/experts. A utilização do crackwise® em suas versões atualizadas garante total adequação da aplicação da norma BS 7910, já que o TWI é membro do comitê desta norma e está empenhado em garantir que o produto seja completamente compatível com o código. Estudos internacionais mostraram que o crackwise® é o software industrial padrão para a realização de análises do tipo *fitness for service* / adequação ao uso, sendo rotineiramente utilizado em diversas indústrias para avaliações de vasos de pressão, dutos, estruturas offshore, tanques de armazenamento, navios, turbinas, aeronaves, prédios, pontes e outros equipamentos industriais.

As imagens expostas a seguir, apresentam, de forma simples, a sequência de telas/abas do programa crackwise® organizado para seguir uma sequência lógica de

inserção de dados, compatível com as recomendações da BS 7910. São feitos breves comentários sobre os dados fundamentais para a realização das análises.

A figura 3.2 mostra a tela de abertura do software, exibindo os campos para registro do programa, além de créditos e informações do TWI.

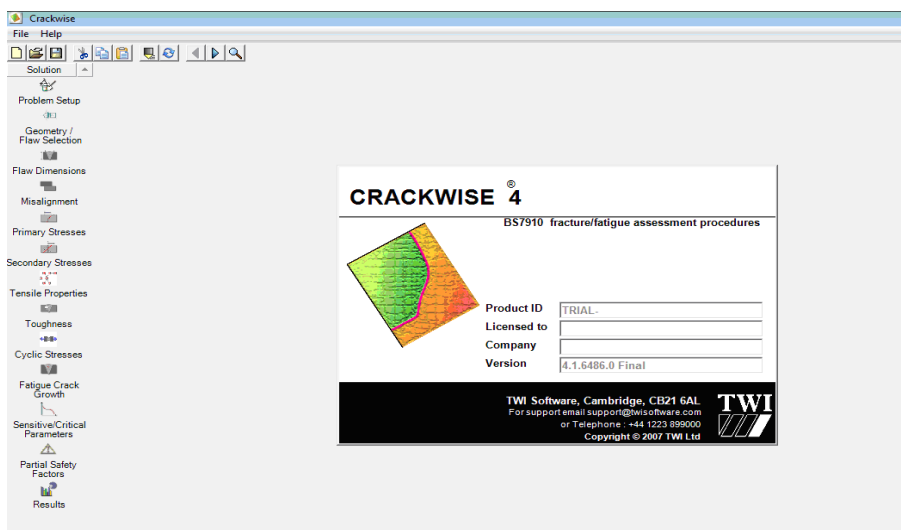


Figura 3.2 Tela de apresentação do software crackwise.

A primeira aba, mostrada na figura 3.3, é o ponto de partida da simulação. Nela são inseridos dados para organização do projeto como título, número, líder, data e comentários. Nesta etapa é selecionado o tipo de cálculo a ser realizado (fadiga, fratura ou fadiga-fratura), o nível da análise (1, 2 ou 3) e o sistema de unidades a ser adotado (SI ou US).

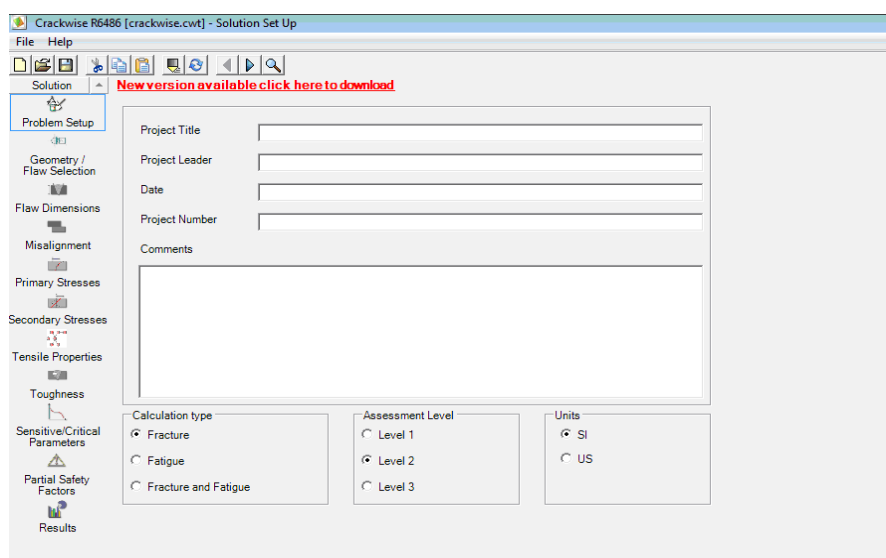


Figura 3.3 Primeira aba da interface do crackwise – Dados da análise.

Na etapa seguinte, dentro da aba Geometria e seleção de defeito (*Geometry/Flaw Selection*), mostrada na figura 3.4, devem ser definidos a geometria da estrutura a ser estudada e o tipo de defeito. Nesta etapa também são definidas as soluções a serem utilizadas para determinação do fator de intensidade de tensões e da tensão de referência.

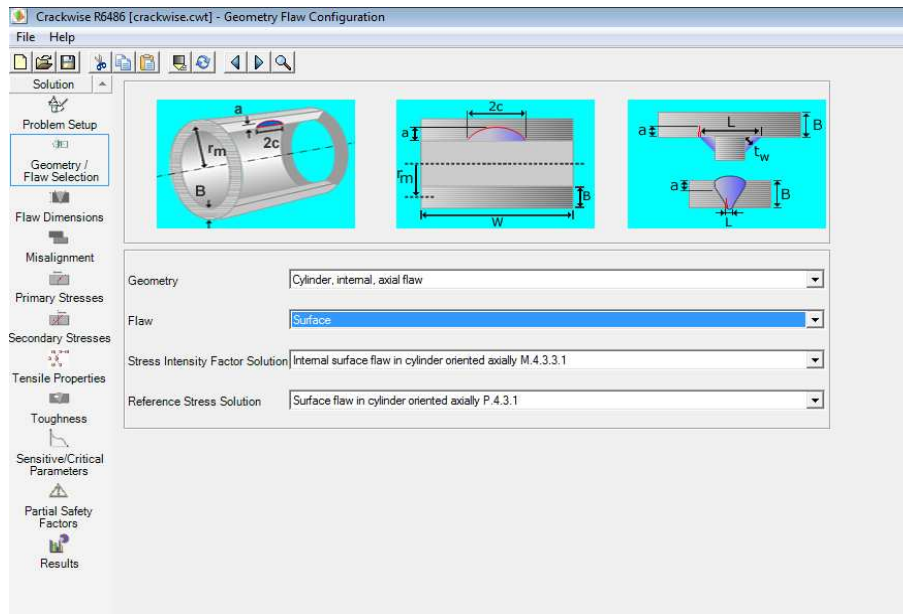


Figura 3.4 Seleção das geometrias da estrutura e do defeito.

A aba dimensões do defeito (*flaw dimensions*), mostrada na figura 3.5, compreende etapa de localização e dimensionamento do defeito, com possibilidade de localização do defeito próximo ou no interior de cordões de solda e aplicar fatores de segurança específicos para este caso.

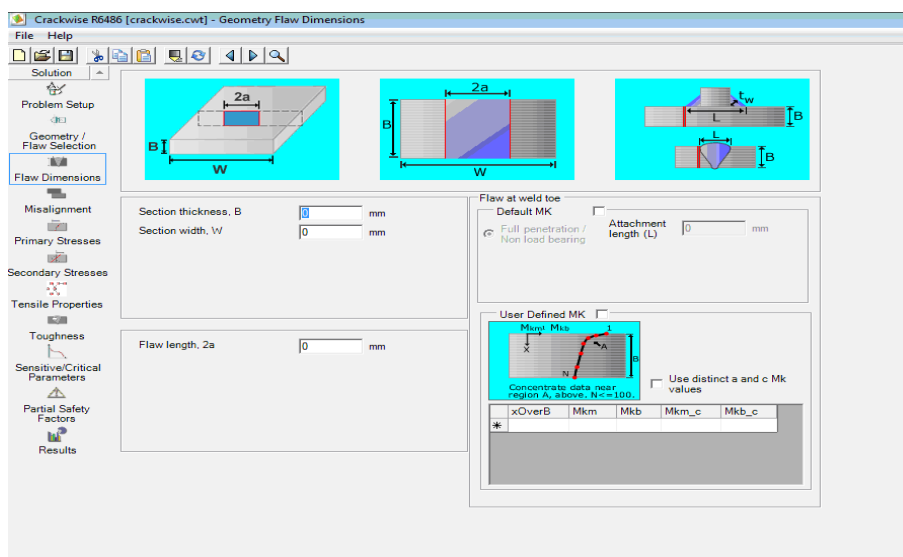


Figura 3.5 Aba para dimensionamento do defeito.

Os campos da aba desalinhamento (*misalignment*), mostrada na figura 3.6, estão destinados a informações a respeito de desalinhamentos e cálculo da razão de tensões para as situações de chapa plana, vasos e juntas cruciformes .

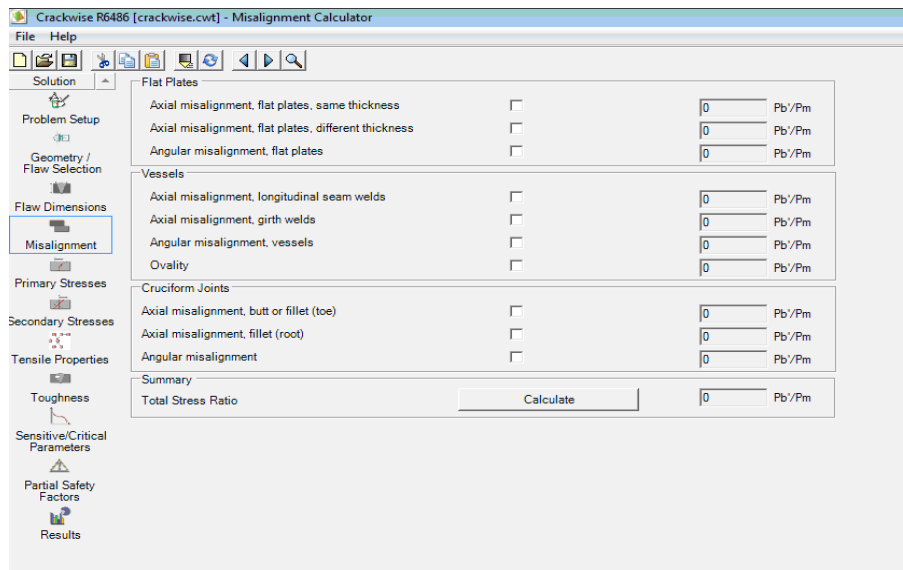


Figura 3.6 Aba para considerações e cálculos de desalinhamento.

Na aba tensões primárias (*primary stresses*), mostrada na figura 3.7, devem ser definidas as tensões primárias de membrana (P_m) e flexão (P_b) atuantes, além dos fatores de concentração de tensões, K_{tm} e K_{tb} , aplicáveis a tensões primárias e térmicas, respectivamente.

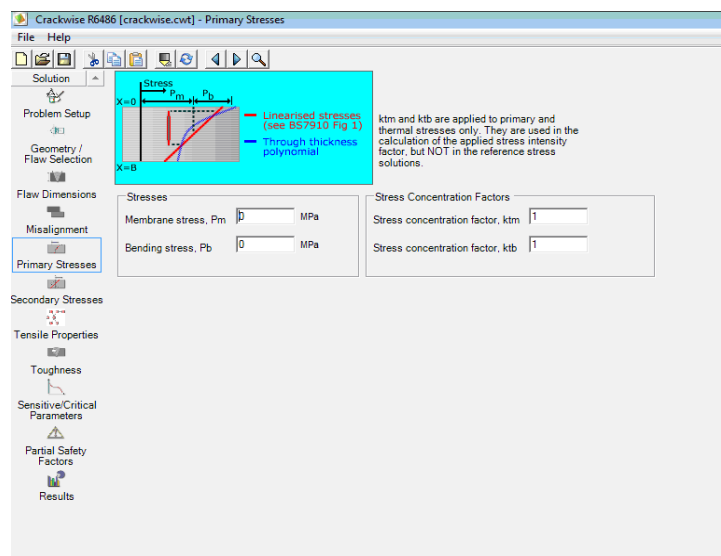


Figura 3.7 Aba para definições das tensões primárias atuantes do equipamento.

A aba tensões secundárias (*secondary stresses*), mostrada na figura 3.8, é extremamente importante. Trata da definição das tensões secundárias atuantes no equipamento. Em termos de tensões residuais de soldagem, estão disponíveis três condições para o material: Como soldado (“*as welded*”), termicamente tratado após soldagem (“*post heat treated*”) e tensões residuais conhecidas (*known residual stresses*), quando o usuário tiver acesso aos valores reais de tensões residuais. Para a determinação dos valores de tensões residuais de soldagem, a BS 7910 faz as recomendações apresentadas na tabela abaixo, já incorporadas ao software, que automaticamente aplica esta recomendação.

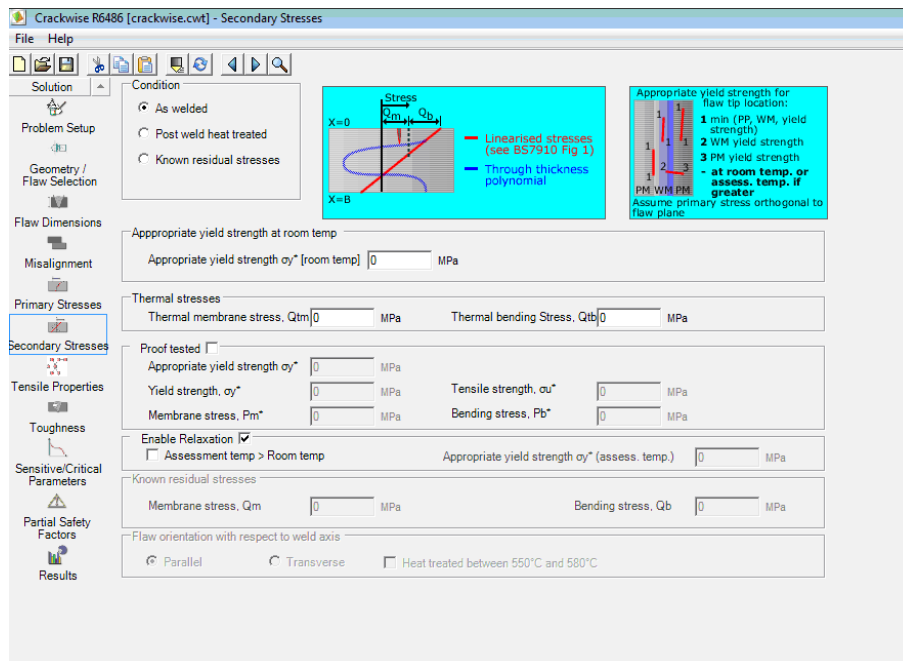


Figura 3.8 Aba para definição das tensões secundárias atuantes no equipamento.

Nesta aba também devem ser informadas as tensões térmicas de membrana e flexão, além do valor apropriado do limite de escoamento do material. O programa também pode considerar a realização de proof test para definição das tensões residuais. Basta para isso que o usuário informe as condições de realização do teste.

A aba propriedades de tração (*tensile properties*), mostrada na figura 3.9, está destinada às informações de propriedades mecânicas de tração do material. Devem ser informados dados como o limite de escoamento na temperatura de análise e na temperatura ambiente, o limite de resistência à tração na temperatura de avaliação, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Nesta aba também deve ser selecionado o tipo de FAD a ser utilizado. As opções são as seguintes: FAD nível 1, FAD genérico, FAD

específico para o material, FAD definido pelo usuário e FAD baseado na relação de Ramberg-Osgood. Para o caso de utilização da relação de Ramberg-Osgood, devem ser informados os valores dos parâmetros A, constante e n, expoente de encruamento. Esta etapa também permite que em caso de utilização da opção FAD definido pelo usuário, o Lr CUT-off seja estabelecido pelo próprio.

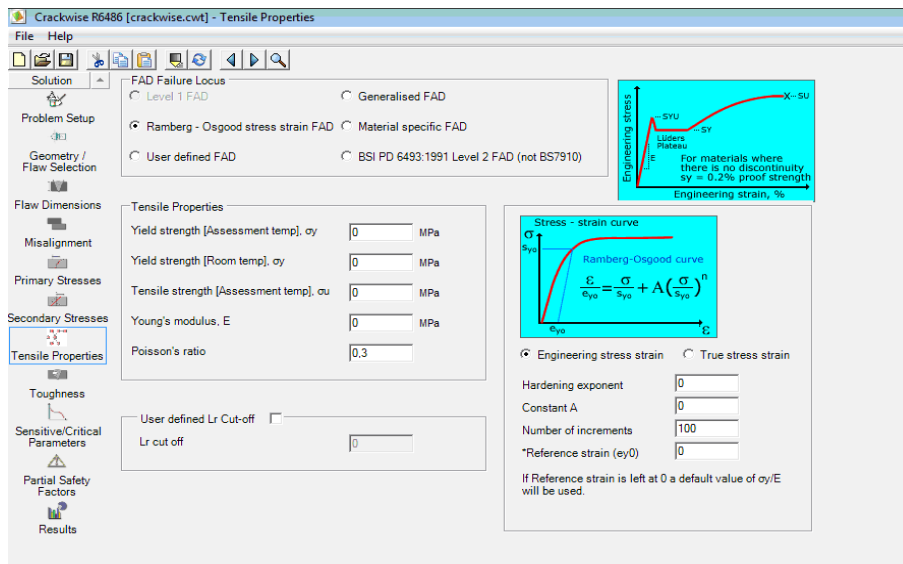


Figura 3.9 Aba das propriedades de tração do material do equipamento.

A aba tenacidade (*toughness*), mostrada na figura 3.10, está disponível para a seleção do parâmetro de tenacidade (K, CTOD ou J) a ser utilizado na análise. Podem ser definidos valores de K em função de ensaio Charpy e definidas opções de CTOD. Para o caso de utilização da integral J podem ser produzidas curvas J-R em função de parametrizações disponíveis, bastando para isso entrar com os parâmetros ou fórmulas. Para análise de rasgamento dúctil, é nessa aba que se define a direção de rasgamento, e os valores mínimo e máximo de rasgamento aceitáveis.

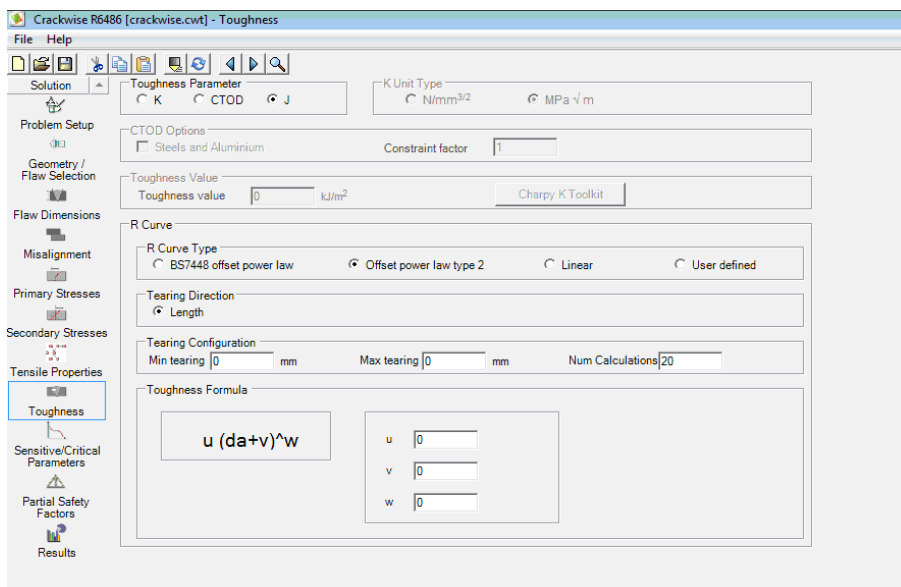


Figura 3.10 Aba tenacidade.

A aba de parâmetros críticos/sensibilidade (*sensitive/critical parameters*), mostrada na figura 3.11, está destinada a execução de análises críticas e análises de sensibilidade dos diversos parâmetros envolvidos na análise. Através desta aba, pode-se determinar, para a situação analisada, os valores críticos de variáveis como a tensão, o tamanho de defeito, a tenacidade, entre outras. Já no caso da análise de sensibilidade, pode-se verificar, para uma faixa de valores de determinado parâmetro, quais respostas são obtidas em termos de avaliação do defeito.

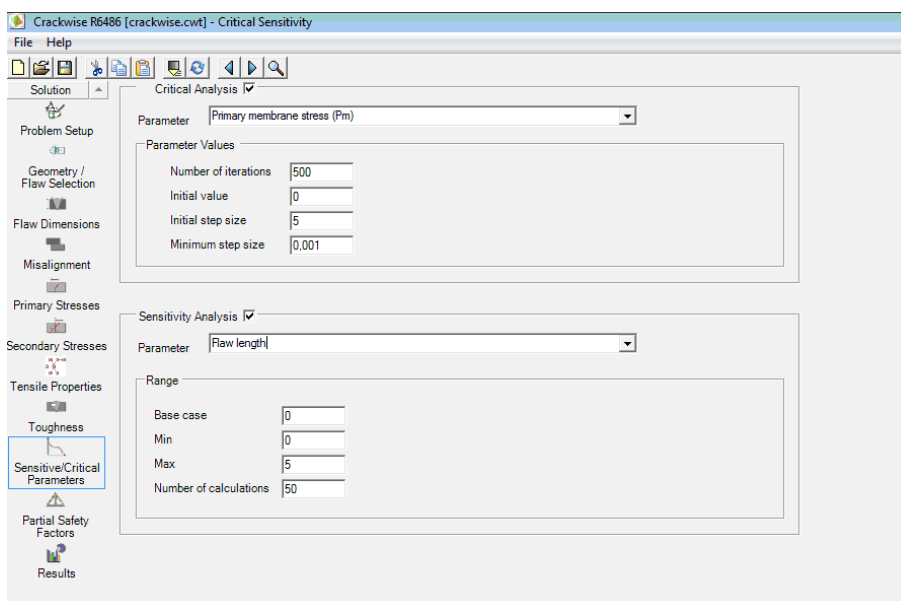


Figura 3.11 Aba para análise de parâmetros críticos e sensibilidade.

A aba fatores de segurança parciais (*partial safety factors*), mostrada na figura 3.12, está destinada à adoção de fatores de segurança parciais. Alguns dados, como tamanho de trinca, propriedades dos materiais e tensões atuantes, usados para a avaliação, podem exibir considerável incerteza ou dispersão de valores. Um meio para adequar essa dispersão é adotar valores bastante conservadores. Uma abordagem alternativa é usar métodos de segurança/confiabilidade estrutural para estimar a probabilidade de falha das estruturas. Essa abordagem tem sido cada vez mais utilizada atualmente. A análise de confiabilidade de componentes trincados é um exercício envolvente/enredado/embaralhado. O uso de fatores de segurança parciais (PSFs) é um meio simples de avaliar a segurança de estruturas trincadas.

Nesta abordagem, um fator de segurança é aplicado individualmente para cada um dos parâmetros exibindo dispersão, de tal modo que a avaliação resulte numa determinada/selecionada probabilidade de falha. Quanto maior for a incerteza sobre uma variável em particular, maior será o fator de segurança parcial (FSP) aplicado a este parâmetro. O FSP é gerado através de uma avaliação de confiabilidade para uma meta de probabilidade de falha. A probabilidade de falha aceitável é função da severidade da consequência da falha. A BS 7910 listou FSPs no seu anexo K, para os seguintes parâmetros: tensões aplicadas, tamanho de defeito, tenacidade e limite de escoamento. Estes foram gerados para diferentes níveis de incerteza nessas variáveis, medidos em termos de coeficiente de variação “cov” (standard deviation/mean). O FSP foi gerado para probabilidades de falha estimadas em ‘p(F)’ of 0.23, 10^{-3} , 7×10^{-5} e 10^{-5} .

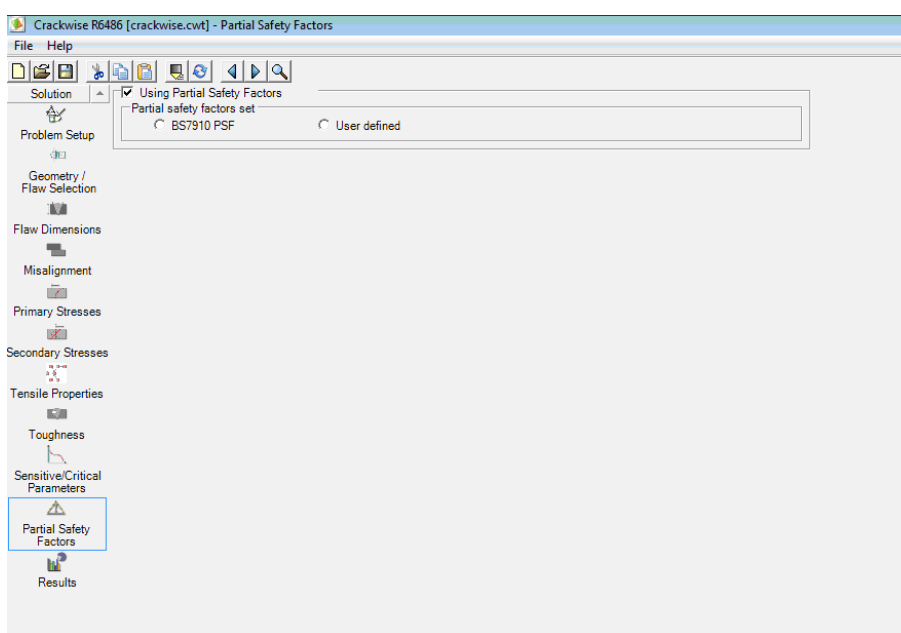


Figura 3.12 Aba dos fatores de segurança parciais.

E, por fim, a aba resultados (results), mostrada na figura 3.13, onde após a inserção de todos os dados relevantes para a avaliação, pode-se solicitar ao programa que inicie seus cálculos. A tela, de fácil navegação, exibe resultados para análises de sensibilidade, parâmetros críticos e status da condição do defeito, aceitável ou reprovado. Nesta aba o usuário pode navegar pelas planilhas contendo dados numéricos das avaliações como, por exemplo, os valores de extensão de trinca e seus respectivos K_r e L_r , avaliar o FAD com os pontos de trabalho, além de curvas J-R e curvas tensão deformação, construídas com base nos dados e parâmetros inseridos. É possível, ainda, criar um sumário, com um resumo da avaliação, que inclui informações relevantes presentes em todas as abas, até a plotagem dos gráficos e diagramas.

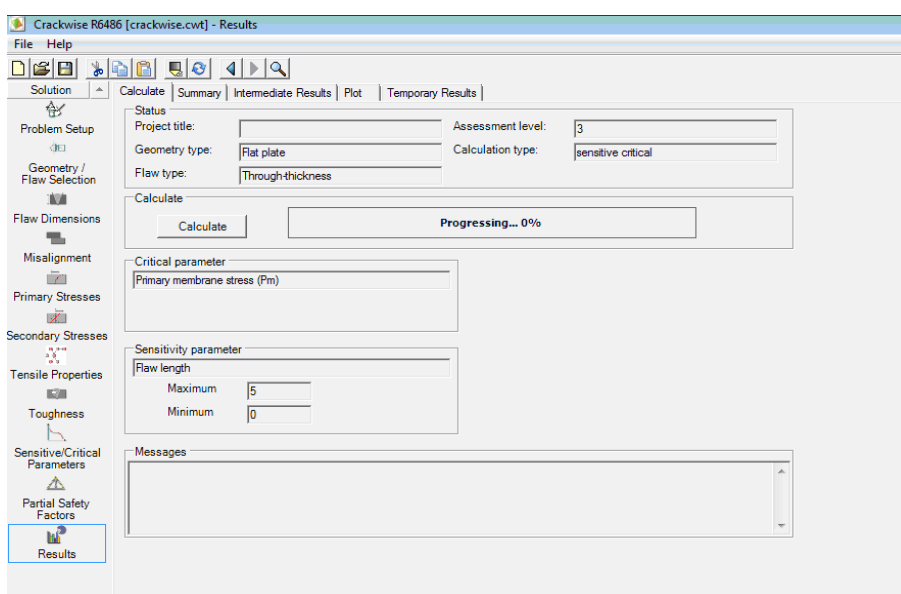


Figura 3.13 Aba dos resultados da análise de fratura.

3.7 Considerações finais sobre a proposta de estudo

Definidos equipamento, dimensões da trinca e tensões atuantes durante o TH, foi preciso definir outros parâmetros importantes para a análise como propriedades mecânicas do material de fabricação do vaso e dados de tenacidade. Novamente, para avaliação da resposta das trincas ao carregamento, optou-se por trabalhar com uma faixa de valores de tenacidade e variação de comportamento mecânico baseada no encruamento.

Acredita-se que a escolha destes parâmetros de análise, permitirá uma avaliação abrangente e interessante, englobando desde situações rotineiras, casos em que as trincas não geram crescimento subcrítico, a casos mais complexos, como aqueles em que o TH, apesar de obrigatório pela NR-13, gera CSCD e reduz a vida útil do equipamento,

principalmente se o mesmo estiver submetido a algum mecanismo de dano, como por exemplo, fadiga, CST, fluência, fragilização ao revenido, entre outros vivenciados pelos engenheiros de inspeção no seu dia a dia de trabalho.

A faixa de tamanhos de trinca e nível de tensões atuantes no equipamento foi selecionada com a perspectiva de englobar o maior número de situações encontradas no ambiente industrial tornando o estudo e, conseqüentemente, os resultados, interessantes e úteis aos colegas de engenharia de inspeção.

Cabe ressaltar que objetivo do estudo é estudar a ocorrência de rasgamento dúctil e extensão da trinca. Fatores que podem causar fratura frágil como a temperatura, fragilização ao revenido, surgimento de fases fragilizantes e a taxa de pressurização, não estão sendo considerados. Dessa forma, não há risco de ocorrência de fratura frágil no cenário criado para o desenvolvimento deste trabalho.

4.0 RESULTADOS

4.1 As Curvas J-R

Conforme apresentado na metodologia do trabalho, foram geradas 3 curvas J-R, que representam, de forma completa, a tenacidade do material. As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 exibem as curvas J-R para as condições de menor tenacidade, tenacidade média e maior tenacidade, respectivamente.

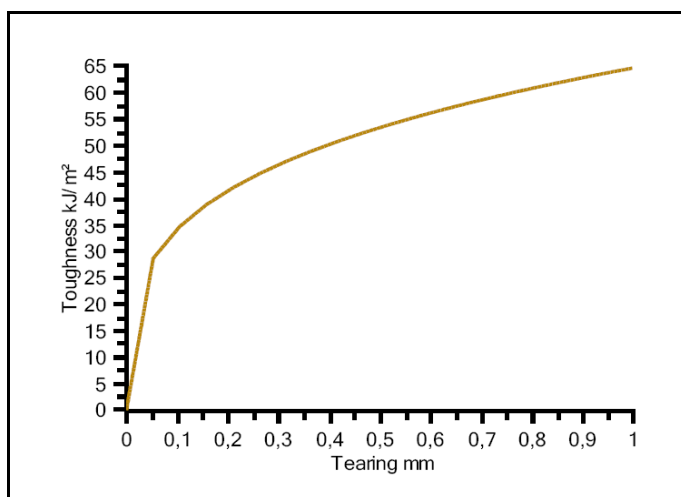


Figura 4.1 Curva J-R para condições de menor tenacidade.

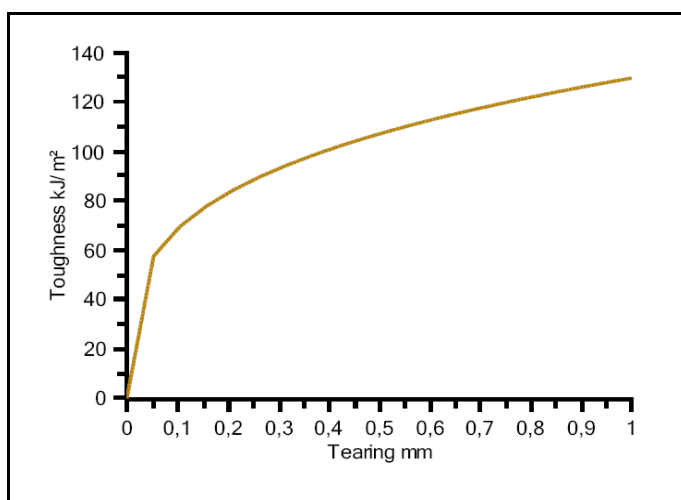


Figura 4.2 Curva J-R para as condições de tenacidade média.

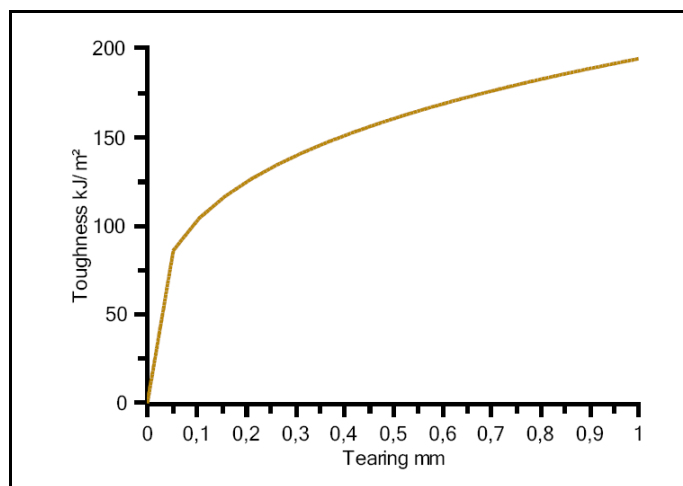


Figura 4.3 Curva J-R para as condições de maior tenacidade.

Os valores de J_{IC} , que representam o ponto de início da extensão estável da trinca, foram retirados das curvas geradas e estão apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valores de J_{IC} das curvas de tenacidade.

Curva de tenacidade	Valor de J_{IC} [kJ/m ²]
Menor tenacidade	28
Tenacidade Média	57
Maior tenacidade	86

4.2 Diagramas FAD

Na sequência estão apresentados os diagramas FAD, que permitem avaliar as condições de aceitação ou reprovação dos defeitos.

Embora as análises tenham sido realizadas para 12 diferentes profundidades de defeito (sejam elas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 20mm), a plotagem de todos os lócus de avaliação num único diagrama tornava a avaliação do mesmo muito difícil, já que os lócus ficavam sobrepostos, dificultando a diferenciação entre as curvas. Optou-se, então, por plotar apenas os lócus de avaliação dos defeitos de 5, 10, 15 e 20mm (verde, marrom, laranja e vermelho, que representam 20, 40, 60 e 80% da espessura, respectivamente). As figuras 4.4 a 4.12 apresentam os diagramas FAD que representam as 9 situações investigadas no trabalho, fruto da combinação de 3 diferentes condições de tenacidade e 3 diferentes valores de expoentes de encruamento.

4.2.1 FADs das análises realizadas em condições de menor tenacidade

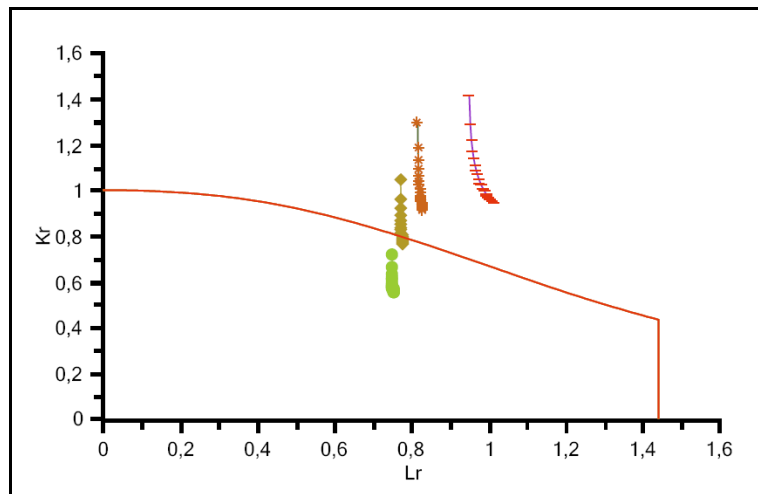


Figura 4.4 FAD para condição de menor tenacidade e expoente de encruamento 5

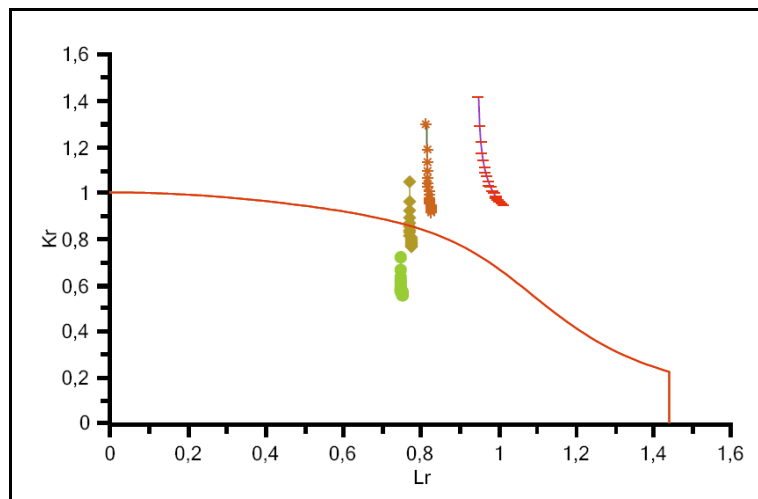


Figura 4.5 FAD para condição de menor tenacidade e expoente de encruamento 10

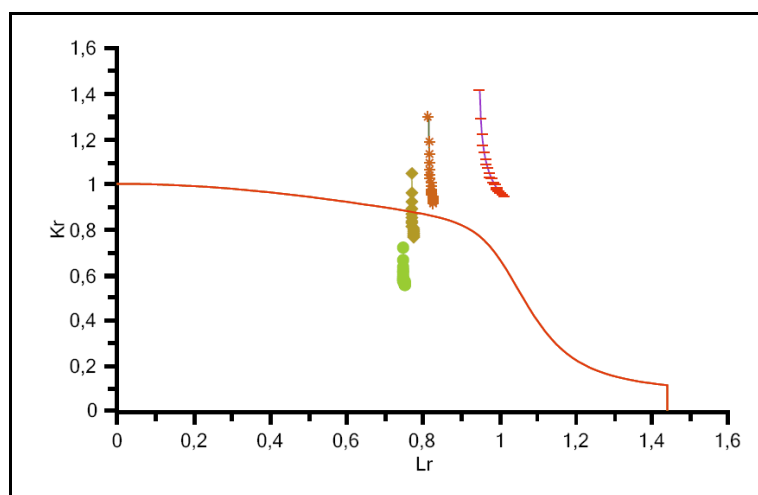


Figura 4.6 FAD para condição de menor tenacidade e expoente de encruamento 20

4.2.2 FADs das análises realizadas em condições de tenacidade média

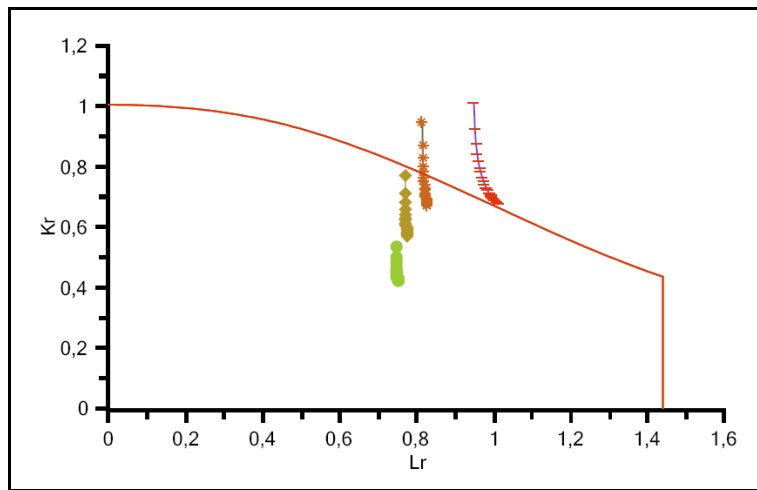


Figura 4.7 FAD para condição de tenacidade média e expoente de encruamento 5

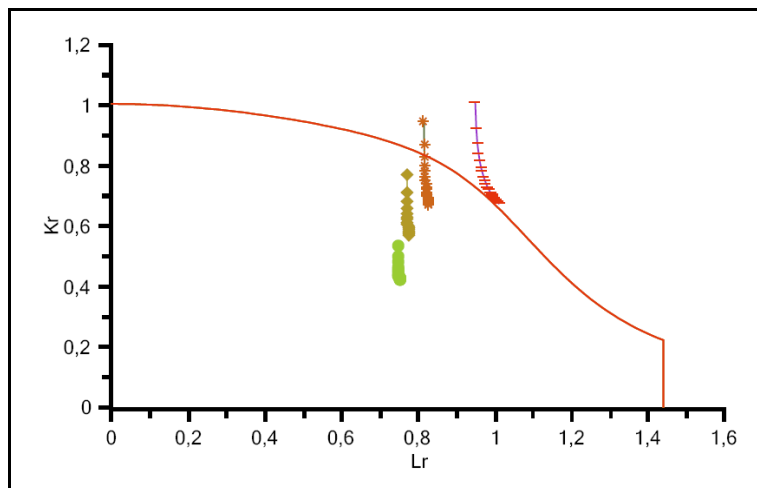


Figura 4.8 FAD para condição de tenacidade média e expoente de encruamento 10

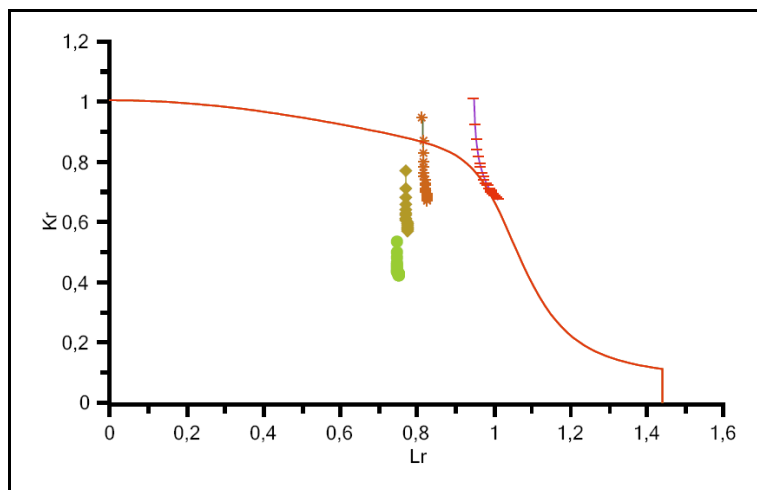


Figura 4.9 FAD para condição de tenacidade média e expoente de encruamento 20

4.2.3 FADs das análises realizadas em condições de maior tenacidade

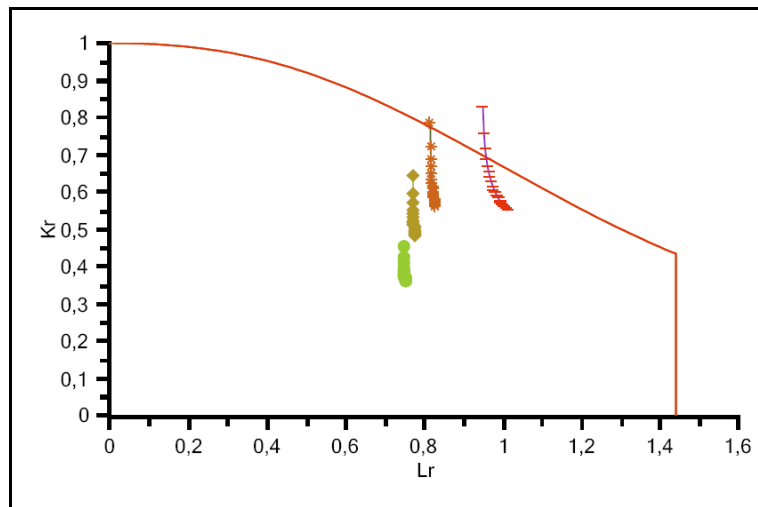


Figura 4.10 FAD para condições de maior tenacidade e expoente de encruamento 5

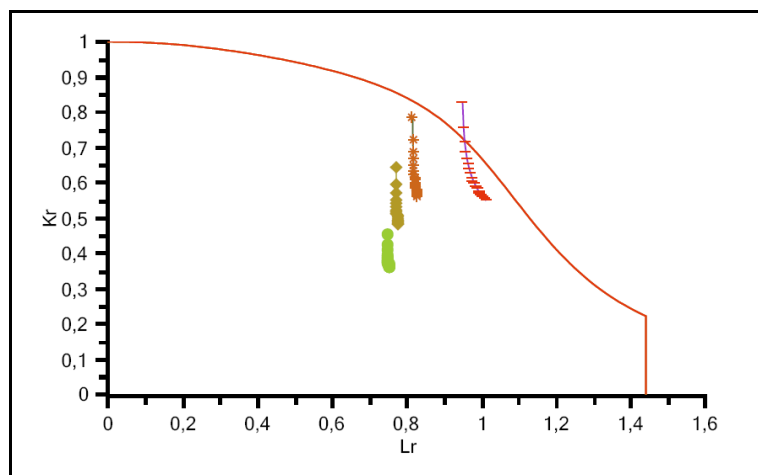


Figura 4.11 FAD para condições de maior tenacidade e expoente de encruamento 10

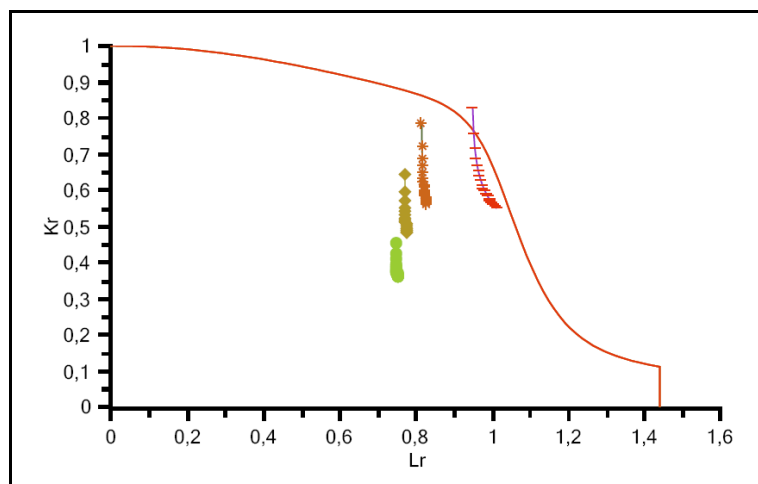


Figura 4.12 FAD para condições de maior tenacidade e expoente de encruamento 20

4.3 Análise de Criticidade de Defeitos.

Foram realizadas análises de criticidade nos níveis 2 e 3 para determinação do tamanho crítico de defeito para as diferentes situações de tenacidade e encruamento avaliadas. Os resultados encontram-se plotados nos gráficos das figuras 4.13, 4.14 e 4.15, para valores de expoente de encruamento(n) iguais a 5, 10 e 20, respectivamente. Esta avaliação prévia permite que seja realizada uma análise da margem de segurança que é expressa pela diferença entre os tamanhos de defeitos iniciais, e os tamanhos de defeito após o CSCD, com relação ao tamanho crítico de defeito para cada situação. Em caso de ocorrência de CSCD, a diferença entre o tamanho crítico de defeito e o tamanho do defeito remanescente é inferior à diferença entre o tamanho crítico e o tamanho do defeito inicial e, conseqüentemente, a margem de segurança é reduzida.

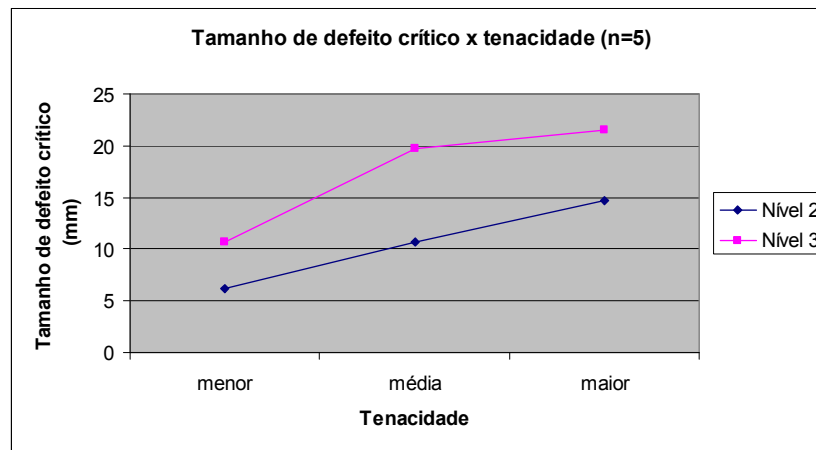


Figura 4.13 Avaliação do tamanho crítico de defeito nos níveis 2 e 3 e expoente de encruamento 5.

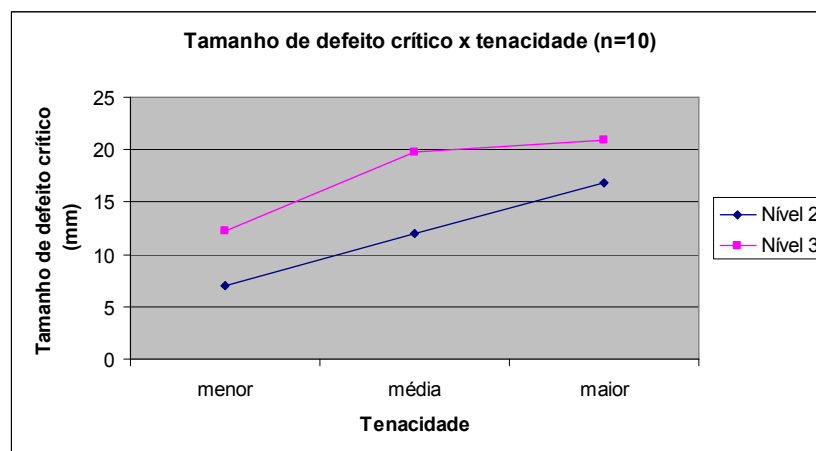


Figura 4.14 Avaliação do tamanho crítico de defeito nos níveis 2 e 3 e expoente de encruamento 10

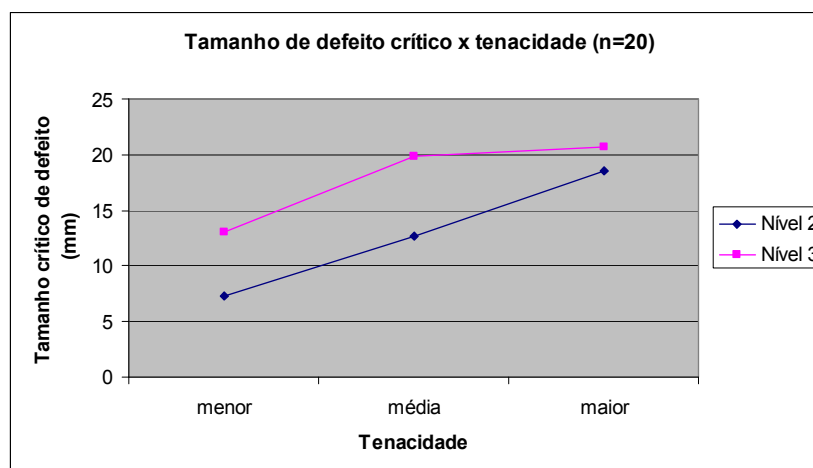


Figura 4.15 Avaliação do tamanho crítico de defeito nos níveis 2 e 3 e expoente de encruamento 20.

4.4 Descrição dos Cenários para as Condições Avaliadas

A tabela 4.2 mostra o resumo das condições avaliadas e os cenários esperados de acordo com os resultados das avaliações. Ela apresenta de forma completa o resultado das avaliações que seriam mostrados nos FADs caso todos os lócus de avaliação fossem exibidos. Os resultados apresentados na tabela estão em pleno acordo com o posicionamento dos lócus de avaliação apresentados pelos FADs e com os resultados obtidos pelas análises de criticidade para os níveis 2 e 3.

Tabela 4.2 Cenários Esperados para as Condições Avaliadas

Profundidade de defeito [mm]	Menor Tenacidade			Tenacidade Média			Maior Tenacidade		
	n=5	n=10	n=20	n=5	n=10	n=20	n=5	n=10	n=20
5	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
6	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
7	CSCD	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
8	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
9	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
10	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
11	Falha	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
12	Falha	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting	blunting	blunting	blunting
13	Falha	Falha	CSCD	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting	blunting
14	Falha	Falha	Falha	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting	blunting
15	Falha	Falha	Falha	CSCD	CSCD	CSCD	CSCD	blunting	blunting
20	Falha	Falha	Falha	Falha	Falha	Falha	CSCD	CSCD	CSCD

4.5 Análise e quantificação da extensão de trinca em função das variáveis avaliadas

Foram levantados os valores de extensão de trinca apresentados por cada tamanho de defeito, em cada situação de tenacidade e encruamento, em resposta ao carregamento imposto pelo TH. Dos resultados apresentados nas planilhas do Crackwise®, foram retirados os valores de extensão de trinca apresentados em cada simulação. As figuras 4.16, 4.17 e 4.18 mostram os gráficos que apresentam estes valores de extensão estável de trinca (crescimento subcrítico) em função do tamanho de trinca original, para as três diferentes condições de tenacidade e os três valores de expoente de encruamento.

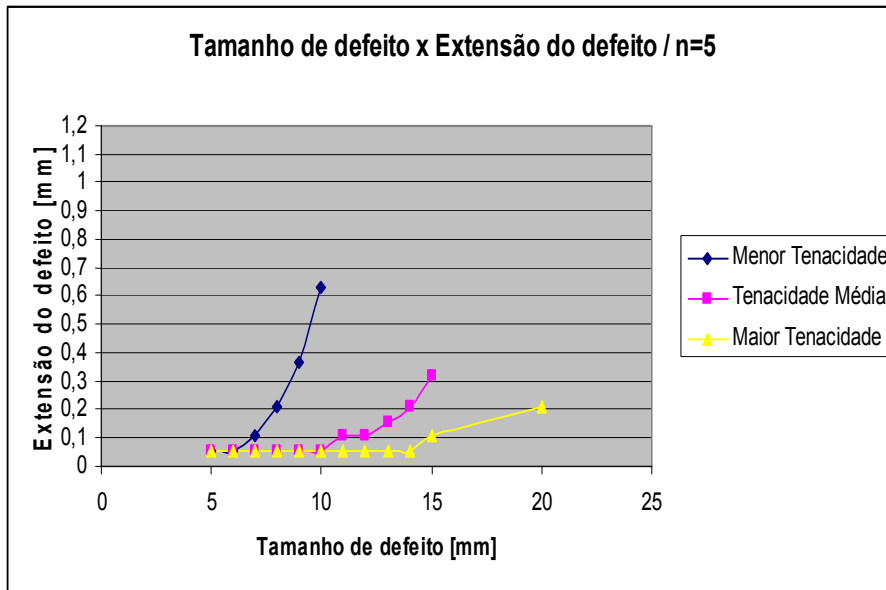


Figura 4.16 Gráfico da extensão de defeito em função do tamanho de trinca para expoente de encruamento 5.

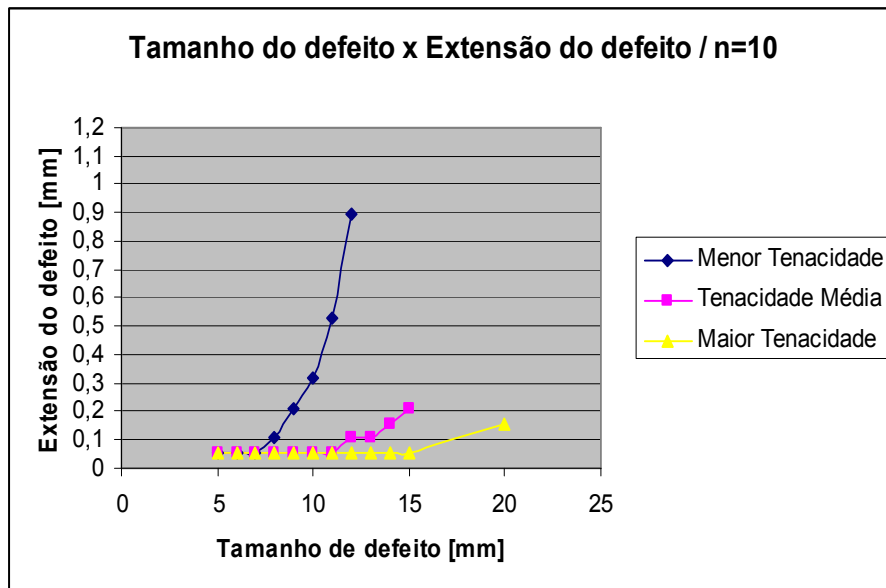


Figura 4.17 Gráfico da extensão de defeito em função do tamanho de trinca para expoente de encruamento 10.

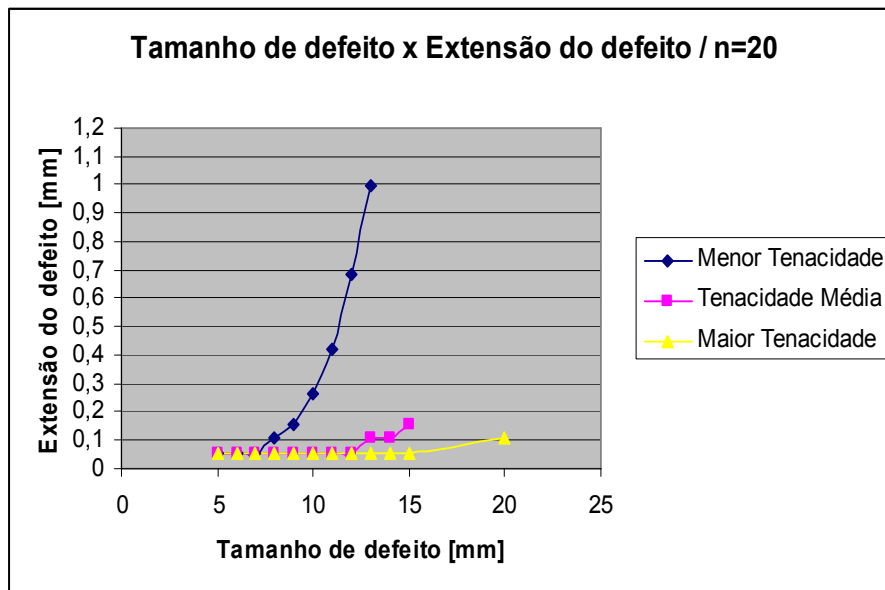


Figura 4.18 Gráfico da extensão de defeito em função do tamanho de trinca para expoente de encruamento 20.

5.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Curvas de Tenacidade

O levantamento das curvas J-R completas era necessário para permitir as avaliações de rasgamento dúctil, pois fornecem uma informação completa do comportamento do material, ao contrário dos métodos mais usuais, que utilizam apenas o valor de J_{IC} como critério de fratura. Como já foi discutido anteriormente, utilizar J_{IC} como critério de fratura é bastante conservador, uma vez que a superação deste valor de J não caracteriza a fratura e sim o início do crescimento estável da trinca.

Adotar uma única curva, não permitiria uma análise comparativa da influência da tenacidade nos resultados da realização do TH. Através da variação da constante C da lei de potência adotada para levantamento das curvas J-R, foi possível gerar as 3 curvas de tenacidade apresentadas nos resultados deste trabalho. Dessa forma foi possível avaliar, qualitativamente e quantitativamente, a influência da tenacidade no comportamento de estruturas com descontinuidades frente ao carregamento imposto pelo TH.

Vale ressaltar que não é comum a disponibilidade de dados confiáveis de tenacidade dos materiais utilizados na fabricação de equipamentos. Geralmente são utilizadas correlações com dados de ensaios Charpy ou utilizados valores bastante conservadores. A tenacidade à fratura de um material, assim como outras propriedades dos materiais, como o limite de escoamento, não possui valor único, determinístico, em toda a extensão do equipamento. Ao contrário, essa propriedade possui distribuição probabilística, de tal forma que é prevista certa variação nestes valores ao longo do equipamento. Além disso, ao longo do tempo, podem ocorrer variações de tenacidade em função de alterações metalúrgicas e da alteração da temperatura de teste. Esses fatos justificam a utilização das três curvas, aumentando a abrangência do estudo e os possíveis cenários. A curva de tenacidade média foi obtida através da utilização de parâmetros da literatura e indica valores médios para os aços típicos de fabricação de vasos de pressão. As outras duas são derivadas deste valor e indicam uma situação otimista e outra pessimista. Ou seja, este trabalho, por ter adotado três curvas e ter realizado a análise para

três condições de tenacidade, aborda desde situações bastante pessimistas até situações otimistas.

A variação do coeficiente C (mantendo as outras variáveis/parâmetros constantes), não alterou o formato da curva J-R, nem na parte linear até J_{IC} , nem na parte não-linear, de modo que os pontos foram apenas deslocados, para baixo ou para cima em função da alteração do valor de C . Através dos valores de J_{IC} , mostrados na tabela 4.1, pode-se verificar a congruência e linearidade nos valores em proporção às constantes C adotadas em cada caso de modo a aumentar a tenacidade do material.

5.2 Avaliação dos resultados da análise de criticidade de defeitos nos níveis 2 e 3 e sua relação com a ocorrência de CSCD.

Considerando o fato que as análises de nível 2 utilizam os valores de J_{IC} como sendo a tenacidade do material e não admitem o crescimento estável de trinca, a região de maior interesse para este trabalho é aquela que compreende os defeitos cujas profundidades estão situadas entre as curvas de níveis 2 e 3, ou seja, defeitos cujo tamanho é maior ou igual ao tamanho crítico para o nível 2 e inferior ao tamanho crítico para o nível 3. Defeitos cujas profundidades sejam inferiores aquelas consideradas críticas pelo nível 2, estão submetidos a um carregamento tal que a tenacidade aplicada é inferior ao J_{IC} do material. Por conseguinte, estes defeitos apresentam apenas o arredondamento da ponta da trinca (blunting). Defeitos cujas profundidades sejam superiores às consideradas críticas pelo nível 2 e inferiores às consideradas críticas pelo nível 3 estão propensos à ocorrência de CSCD, ou seja, estarão sujeitos a carregamentos tais que J_{IC} seja superado, mas incapazes de causar o crescimento instável da trinca, visto que as curvas J-R são crescentes, o que aumenta a resistência à propagação da trinca. Dessa forma, é possível que defeitos com maiores profundidades sofram propagação subcrítica mas não venham a falhar.

Estes gráficos, portanto, demonstram o quanto é conservadora a consideração de J_{IC} como critério de fratura, ignorando a margem de segurança proporcionada pelo crescimento estável da trinca. Avaliar os possíveis resultados de um teste hidrostático através do nível 2 levaria a conclusões errôneas, já que muitos defeitos considerados críticos e inaceitáveis, que teoricamente vazariam ou levariam à fratura, permanecerão na estrutura, com dimensões ampliadas, elevando a probabilidade de falha do componente. Por isso, embora a margem de segurança seja considerável, permitindo o crescimento

estável de alguns milímetros antes da ocorrência da falha, deve estar claro que a ocorrência deste crescimento nas dimensões dos defeitos quando causada pela realização de um TH, é indesejável, demonstrando ineficiência na aplicação do teste e seleção de condições inadequadas.

5.3 Avaliação dos Diagramas FAD

No que diz respeito ao posicionamento dos lócus de avaliação em relação a curva do diagrama FAD, a elevação da tenacidade do material produz um reposicionamento do lócus, caminhando este para o interior da região segura do diagrama (sentido descendente), de tal forma que defeitos que apresentavam instabilidade podem tornar-se subcríticos ou imunes. Defeitos subcríticos podem passar à região segura, apresentando apenas o blunting ou pode ocorrer a redução da extensão da trinca em comparação às situações de tenacidade inferior, o que representa favorecimento à integridade do equipamento, já seriam minimizados os efeitos maléficos do TH, em termos de redução da margem de segurança causada pela ocorrência de CSCD.

Em relação à profundidade das descontinuidades, ocorre o oposto do que foi visto quando a tenacidade foi aumentada. A medida que a profundidade das descontinuidades aumenta, sendo esta considerada a dimensão crítica para a condição de trinca superficial avaliada, os lócus de avaliação avançam em direção à região insegura do diagrama. Defeitos menores representam situações seguras e de estabilidade. O aumento da profundidade da descontinuidade reduz o ligamento remanescente (relação $a/w = \text{profundidade da trinca} / \text{espessura do equipamento}$), de tal forma que o carregamento, ou seja a tenacidade aplicada na ponta do defeito, J , é cada vez mais severo (a medida que a profundidade da trinca cresce), aumentando a extensão/profundidade da trinca por rasgamento dúctil quando esta é submetida ao carregamento imposto pelo TH.

Para os casos avaliados, percebe-se que na condição de menor tenacidade, defeitos inferiores a 6 mm causarão apenas o arredondamento da ponta da trinca. A partir deste tamanho de defeito, ocorrerá o CSCD e defeitos cuja profundidade seja superior a 10mm já poderão levar o equipamento à falha por fratura dúctil.

Para os casos de tenacidade média, pode-se perceber que as profundidades de trinca necessárias para causar o CSCD são razoavelmente superiores aos requeridos no caso anterior, com menor tenacidade. O crescimento instável ocorre bem próximo ao valor limite adotado neste estudo, ou seja, quando a profundidade da trinca é próxima do valor de 20mm, que equivale a 80% da espessura do vaso.

Já para os casos de maior tenacidade, pode-se perceber claramente a elevada resistência do material à propagação das trincas. A tenacidade é tão elevada, que apenas defeitos superiores a 20mm de profundidade levarão ao CSCD, e ainda assim, a extensão de trinca apresentada será muito pequena.

Deve-se salientar que este estudo não está considerando a utilização de ENDS nem antes nem após a realização dos THs. Caso fossem utilizados, a probabilidade de que as descontinuidades consideradas críticas neste estudo fossem detectadas seria bastante elevada, já que trata-se de defeitos de dimensões elevadas para técnicas como o ultrassom, por exemplo. O trabalho baseia-se em informações da literatura de que este mapeamento não é prática corrente no meio industrial, de tal forma que as condições de teste são definidas sem uma análise adequada baseada nas reais condições dos equipamentos.

Dentre as 3 situações de tenacidade avaliadas, aquela que apresenta maior probabilidade de representar um caso real certamente é a condição de tenacidade média. Nesta situação, defeitos pequenos são inofensivos ao equipamento e resistem ao TH sem representar maiores problemas. Defeitos de tamanho médio seriam capazes de levar a estrutura ao CSCD e apenas defeitos superiores a 19mm seriam capazes de levar à estrutura a falhar. No entanto, dadas as dimensões, estes defeitos poderiam ser detectados antes da realização do teste, caso fosse realizada uma inspeção cuidadosa para definição das condições de teste.

O caso de menor tenacidade representa uma situação bastante crítica, que talvez seja possível para equipamentos onde o TH seja realizado em temperaturas muito baixas ou que tenham sofrido efeitos de fragilização, como por exemplo, fragilização ao revenido ou formação de fases frágeis. Neste caso, defeitos pequenos já seriam capazes de causar o CSCD e defeitos médios já levariam o equipamento à fratura. A realização do TH em condições semelhantes a essa não é recomendada. Para o caso de maior tenacidade, para a realização do TH é menos preocupante, já que apenas defeitos grandes, com elevada probabilidade de detecção pelas técnicas de END seriam capazes de gerar o CSCD. Para este caso o TH pode ser realizado com segurança e causará apenas o cegamento da ponta dos defeitos, não trazendo qualquer prejuízo ao equipamento.

Estes resultados confirmam a tenacidade como principal propriedade para a definição da possibilidade de ocorrência de CSCD, visto que as alterações nos valores desta, com as outras variáveis inalteradas, resultam em significativas alterações nos cenários de resposta dos defeitos ao TH.

5.4 A Influência do expoente de encruamento

Enquanto a tenacidade é mais importante na verificação da possibilidade de ocorrência de crescimento subcrítico, o expoente de encruamento é fator determinante na verificação do quanto e como, um defeito sujeito a CSCD, irá se propagar. Sua influência é notada mais claramente a partir de defeitos que estejam na iminência de sofrer ou que sofreram crescimento subcrítico, em função da zona deformada na ponta da trinca e no aumento de resistência à propagação do defeito à medida que a trinca cresce. Comparando os diagramas FAD para as diferentes condições de encruamento, pode-se perceber que o aumento do expoente resulta em alteração da curva FAD de tal modo que a área segura da região de fratura dúctil é ampliada, ou seja, o aumento do expoente de encruamento atua no sentido da segurança, reduzindo a extensão da trinca para situações idênticas de tenacidade, como pode ser observado nos diagramas FAD e nos gráficos de extensão da trinca em função do tamanho de defeito. Para casos em que ocorre CSCD, verifica-se que quanto maior o expoente de encruamento, menor é a extensão da trinca e maior a parte do lócus de avaliação que encontra-se no interior da região segura do FAD.

5.5 Comentários Gerais sobre testes hidrostáticos, CSCD e Seus Efeitos

O que de fato se espera de um TH é que ele seja capaz de “detectar” vazamentos e defeitos cujas dimensões sejam críticas para o nível de pressão aplicado, sem causar substancial crescimento aos defeitos que permanecerão no equipamento. Estes devem ser mantidos em dimensões tais que não causem qualquer risco de falha nas condições normais de operação do equipamento.

Os resultados das simulações realizadas retratam, em ampla maioria, casos em que os defeitos são inócuos e apresentam apenas o arredondamento da ponta da trinca (blunting) como resposta à aplicação da pressão de teste hidrostático. A realização de reparos, nestes casos, é desnecessária, pois como foi dito na revisão bibliográfica, reparos podem gerar defeitos ainda mais perigosos que os originais e exigiriam a aplicação de um novo teste hidrostático, de acordo com as exigências dos códigos de projeto.

Também foram previstas pelas simulações, diversas situações em que poderia ocorrer a propagação da trinca durante a realização do TH, mostrando que a ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades durante a realização de testes hidrostáticos em vasos de pressão é factível, dependendo fundamentalmente da tenacidade do material do equipamento e das dimensões dos defeitos presentes, e que sua probabilidade de ocorrência

será tanto maior quanto menor for a coerência entre as condições estabelecidas para a realização do teste e as reais condições físicas do equipamento. Sem uma avaliação prévia do equipamento, com verificação da presença de defeitos e avaliação dos mecanismos de danos, menor será a possibilidade do profissional em determinar condições adequadas para o teste.

Entre os fatores avaliados neste trabalho, pode-se dizer que o tamanho dos defeitos presentes no equipamento antes da realização do teste e a tenacidade do material, são os fatores de maior significância para a previsão da ocorrência de CSCD. Por isso, a utilização de métodos de ENDS capazes de detectar e dimensionar com precisão os defeitos constitui uma ferramenta de apoio importante na definição da viabilidade de execução do TH, devendo, portanto, fazer parte da preparação para a realização do teste uma rigorosa inspeção e mapeamento das descontinuidades presentes. Por outro lado, pode-se questionar a necessidade de realização de um TH quando se investe na realização de ENDS, já que como ferramenta de inspeção e detecção de defeitos o TH é ineficiente ou menos eficiente do que estas técnicas. Adicionalmente, são necessários dados de tenacidade que representem o mais fielmente possível a condição do material, de forma que seja possível prever com segurança o comportamento a ser apresentado pelo defeito em resposta à aplicação do TH. Conforme foi verificado nos resultados, J_{IC} estima o início de extensão da trinca de tal forma que defeitos submetidos a um J aplicado inferior ao J_{IC} do material não apresentarão CSCD. Essa informação deve ser considerada na definição da pressão de teste a ser adotada. Entretanto, é reconhecida a dificuldade por parte dos engenheiros de obter dados precisos de tenacidade que permitam uma avaliação consistente.

Para que o TH seja uma ferramenta eficiente na avaliação de integridade estrutural de vasos de pressão, as condições de teste devem ser criteriosamente determinadas, permitindo a identificação das descontinuidades que de fato oferecem risco, sem promover significativo crescimento dos defeitos menores, que permanecerão no equipamento. Os resultados do trabalho mostram que a ocorrência de CSCD ocorre para defeitos cujo tamanho seja superior ao tamanho de defeito crítico calculado para o nível 2 de avaliação da BS 7910 no nível de carregamento do TH, quando a tenacidade aplicada supera o valor de J_{IC} , que é o parâmetro de medida de resistência à propagação estável de trincas. Os planos de inspeção dos equipamentos devem proporcionar garantias na detecção destes defeitos, permitindo, ao menos, que diante da previsão de ocorrência de CSCD, as condições de teste possam ser reavaliadas.

A ocorrência de CSCD durante o TH é indesejável e, com base no que foi exposto na revisão bibliográfica, representa um efeito maléfico à integridade do equipamento, na medida em que os defeitos crescem e permanecem no componente, muitas vezes ignorados pelos profissionais responsáveis, já que não é prática corrente o acompanhamento do TH e tão pouco a realização de inspeções posteriores aos testes, para verificação da estabilidade dos defeitos.

Após a ocorrência de CSCD causada por um TH, o equipamento volta à operação com sua confiabilidade reduzida e, conseqüentemente, com sua probabilidade de falha mais elevada. Conforme foi apresentado na revisão bibliográfica, os conceitos de confiabilidade e probabilidade de falha estão relacionados à distribuição dos defeitos no equipamento, à extensão da inspeção aplicada e à probabilidade de detecção dos métodos de inspeção utilizados (planos de inspeção). Com a ocorrência de CSCD, a curva de distribuição de defeitos é alterada, pois, conforme mostram os resultados, os defeitos menores sofrem apenas o blunting, mas defeitos médios e também os maiores sofrem CSCD. Pode-se dizer que a curva desloca-se para a direita, com aumento da frequência de defeitos médios e maiores, que foram ampliados durante o teste, e isso implica em aumento da probabilidade de que exista no equipamento defeito de dimensão superior à crítica. Como os planos de inspeção são mantidos e sequer são realizadas inspeções antes do equipamento ser recolocado em operação, aumenta a probabilidade de falha, e é reduzida a confiabilidade do equipamento.

Outro efeito maléfico da ocorrência de CSCD causado pelo TH é a redução da vida remanescente do equipamento. Conforme foi mostrado na revisão bibliográfica, os cálculos de vida remanescente estão baseados na determinação do tempo ou do número de ciclos necessários para que um defeito atinja uma dimensão considerada crítica para determinado nível de carregamento, ou seja, a vida remanescente é proporcional à diferença entre a dimensão crítica e o tamanho de trinca presente no equipamento. A ocorrência de CSCD, por aumentar a dimensão dos defeitos, reduz esta diferença, de modo que o tempo, ou número de ciclos, até que seja alcançada a dimensão crítica, que caracteriza a falha, é reduzido.

A situação é ainda pior quando o equipamento que sofreu o CSCD opera submetido a mecanismos de dano, como, por exemplo, fadiga, fluência ou corrosão sob tensão. Nestes casos, os próprios mecanismos de dano já atuam como causadores de crescimento subcrítico, fazendo com que o defeito continue crescendo durante a operação, de modo que

a probabilidade de falha aumenta continuamente, reduzindo a vida remanescente e resultando em perigo para a operação futura do equipamento, caracterizando uma situação arriscada, oposta ao princípio pelo qual se aplica THs antes da colocação ou recolocação de equipamentos em operação.

A ocorrência de CSCD, principalmente nas condições citadas no parágrafo acima, traz à tona uma característica do TH que costuma ser tratada de maneira equivocada pelas pessoas, que é seu prazo de validade. A sobrevivência ao TH significa apenas, que não havia, no momento de realização do teste, defeito com tamanho superior ao tamanho crítico para o nível de carregamento imposto ou que estas descontinuidades, se existentes, não foram eficientemente testadas, em função das heterogeneidades na distribuição de tensões ao longo do equipamento. Isto significa que o resultado do TH não garante rigorosamente nada quanto ao comportamento futuro, representando apenas um atestado de integridade de curto prazo, cuja validade expira assim que o equipamento for colocado em operação, principalmente no caso dos THs periódicos realizados em equipamentos sujeitos a mecanismos de danos em que há crescimento das descontinuidades.

A periodicidade de realização do teste, portanto, deve ser avaliada em função das condições físicas do equipamento, das suas condições operacionais e dos níveis de inspeção adotados. A forma padronizada adotada pela NR-13 para vasos da mesma categoria está baseada apenas nas conseqüências das possíveis falhas, desconsiderando as diferenças em termos de condições operacionais e níveis de inspeção, podendo implicar em prejuízos para os equipamentos, por exigir a realização de testes por vezes desnecessários e inadequados. As empresas também sofrem prejuízos em função da realização dos testes que, por vezes, implicam na paralisação de unidades e geram lucros cessantes que não se justificam, já que os testes não elevam a confiabilidade da planta. Os resultados deste trabalho mostram que ao obrigar a execução do teste, a NR-13 pode, em algumas situações atuar no sentido da insegurança, ao exigir que equipamentos que sofrem mecanismos de danos e possuem defeitos de dimensões perigosas em sua estrutura sejam perigosamente testados hidrosticamente, enquanto a utilização das modernas técnicas de END podem ser mais eficientes, baratas e rápidas na avaliação.

A realização de THs periódicos com níveis de pressão semelhantes aos exigidos pelos códigos de projeto para os testes de fábrica ou após reparos é, certamente, o fator que mais contribui para a ocorrência de CSCD durante os testes. Conforme citado na revisão bibliográfica, os testes de fábrica e periódico possuem objetivos diferentes. Este último

visa apenas revalidar o equipamento para atuar em suas condições normais de operação e verificar sua estanqueidade, não havendo por parte da NR-13 qualquer exigência quanto à utilização dos níveis de pressão estabelecidos pelos códigos de projeto também para a realização dos testes periódicos. A norma deixa a definição das condições de teste, incluindo a pressão, a carga do PH. Sabendo que quanto maior a sobrecarga, maior a possibilidade de ocorrer CSCD, conclui-se que a realização do TH periódico nos mesmos níveis de pressão do teste de fábrica, embora comumente realizada, é inadequada e perigosa, podendo trazer danos aos equipamentos e causar acidentes, principalmente caso não haja mapeamento e avaliação das descontinuidades, antes e após a realização do mesmo.

A atuação de mecanismos de dano é um dos fatores que justifica a necessidade de diferenciação entre a configuração dos THs periódicos em relação às condições do TH de fábrica. PEREIRA (2004) verificou que depois de ser posto em operação, o equipamento sofre alterações em algumas de suas características, como nas propriedades dos materiais, alterações geométricas em função de corrosão ou outros mecanismos e surgimento de novas trincas, de modo que a distribuição de tensões no equipamento será alterada, podendo resultar em alterações no comportamento das trincas frente ao carregamento imposto pelo TH. Só haverá coincidência entre os resultados dos testes de fábrica e periódicos para equipamentos em que não haja atuação de mecanismos de dano e sejam mantidas as mesmas condições de execução dos testes, inicial e periódico. Nesse caso, as descontinuidades que sofreram o blunting no primeiro teste, permanecerão estabilizadas, não apresentando CSCD nos testes periódicos seguintes.

Neste trabalho, a importância das propriedades mecânicas do material foi avaliada pela alteração dos valores de tenacidade e expoente de encruamento. No entanto, há diversas outras considerações a serem feitas. Ao longo do tempo de operação, o material do equipamento pode sofrer diversas alterações em suas propriedades mecânicas e estas alterações influenciam o comportamento futuro do equipamento.

PEREIRA (2004) verificou que mantidas as propriedades mecânicas do material e as condições do teste inicial de fábrica, não é esperado que as descontinuidades remanescentes sofram propagação. Entretanto, é comum que os equipamentos estejam sujeitos a meios e condições operacionais capazes de alterar bastante as propriedades mecânicas do material e suas condições físicas. Fenômenos metalúrgicos como a alteração da microestrutura e o surgimento de fases fragilizantes, alteram propriedades como o limite

de escoamento e a tenacidade à fratura, de modo que a resposta dos defeitos ao TH pode ser diferente da esperada, levando a ocorrência de CSCD e em situação pior, até a fratura do equipamento.

Outro fator extremamente importante e que não pode ser ignorado é a temperatura. A temperatura de operação é a principal responsável pelas alterações metalúrgicas que podem levar à degradação do material, causando a perda de tenacidade e redução dos limites de escoamento e resistência à tração, fazendo com que defeitos antes inócuos, alcancem novo status, podendo ocorrer CSCD e até mesmo crescimento instável. A temperatura também tem fundamental importância no momento de realização do teste. Caso os THs periódicos sejam realizados em temperaturas inferiores à aplicada no TH de fábrica, haverá redução na tenacidade do material e a probabilidade de fratura frágil ou a ocorrência de CSCD será aumentada.

Com relação à presença de descontinuidades e ao tamanho das mesmas, deve-se salientar a importância dos setores de controle de qualidade (atuantes na fabricação do equipamento) e de inspeção de equipamentos (atuantes ao longo da vida útil do equipamento). Havendo falhas nos métodos de inspeção ou na determinação dos locais de inspeção, descontinuidades de tamanho crítico podem deixar de ser detectadas ou ser mal dimensionadas pelos inspetores, sendo equivocadamente aprovadas. Essas descontinuidades podem causar a falha durante o TH ou permanecerão perigosamente no equipamento, talvez amplificadas, sendo postas em serviço em condição insegura.

Pelos resultados apresentados e por tudo que foi discutido até agora, fica claro que a utilização do TH na avaliação de integridade dos vasos de pressão necessita do acompanhamento de outros métodos de inspeção e ferramentas que sejam complementares ao teste e adequados às condições de operação e às características particulares de cada equipamento. A metodologia da IBR mostra-se como uma ferramenta complementar adequada no sentido de contribuir para que o plano de inspeção seja adequado ao risco apresentado pelo equipamento. Isso contribuiria para tornar a realização do TH mais segura fornecendo dados de inspeção que permitam uma avaliação da confiabilidade e da probabilidade de falha do equipamento. Adicionalmente haveria dados para a determinação da vida remanescente do equipamento, além de constituir uma ferramenta com grande potencial econômico, permitindo a utilização mais racional dos recursos.

Deve-se, portanto, privilegiar um plano de inspeção coerente com os mecanismos de dano atuantes no equipamento e que seja capaz de detectar descontinuidades de

tamanho inferior ao tamanho crítico. Com uma atuação mais efetiva das ferramentas de inspeção, pode-se fazer uso de testes hidrostáticos alternativos, com pressões inferiores às determinadas pelo código de projeto, mas com severidade suficiente para qualificar o equipamento para atuar em suas condições normais de operação. Dependendo do equipamento, a realização do TH periódico em níveis de pressão levemente superiores à pressão de abertura da válvula de segurança (PSV) pode ser uma alternativa. A pressão de abertura da PSV é determinada em função da PMTA do equipamento e, teoricamente, o equipamento jamais será operado em pressões superiores a este valor, exceto em caso de falhas da válvula. Sendo assim, esse nível de pressão é suficientemente severo para avaliar a estanqueidade do equipamento e sua adequação ao uso, e minimiza possíveis efeitos negativos causados pela sobrecarga, como a ocorrência de CSCD.

Em casos mais críticos, também pode-se fazer uso de ferramentas de acompanhamento e técnicas de inspeção globais, que permitam a avaliação do equipamento como um todo e que possam atuar em conjunto com o TH. Dentre estas técnicas podemos citar o ensaio de emissão acústica, que tem sido utilizado em instalações da Petrobras para monitoração de descontinuidades durante a realização de THs. Esta técnica permite a identificação da atividade das descontinuidades, acusando sua propagação durante o carregamento, indicando áreas para a realização de inspeções complementares que confirmem a ocorrência de CSCD.

6.0 CONCLUSÕES

A ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades durante a realização de THs em vasos de pressão deve-se, fundamentalmente, à aplicação de condições de teste inadequadas para as reais condições dos equipamentos em virtude da ausência de avaliações e inspeções antecedendo o teste para fins de detecção de defeitos e verificação da atuação de mecanismos de dano.

O CSCD é indesejável pois tem como efeitos a redução da confiabilidade e da vida remanescente do equipamento, aumentando a probabilidade de falha. Estes efeitos constituem uma prova de que quando realizado inadequadamente, o TH pode ser perigoso e ineficiente como meio para avaliação de integridade de equipamentos, necessitando do auxílio de outras técnicas e ferramentas.

A análise de rasgamento dúctil da BS 7910 mostrou ser uma ferramenta útil para a avaliação prévia do comportamento de defeitos em resposta à aplicação do teste hidrostático. De posse de dados e informações precisas, com relação à geometria e às dimensões de defeito, dados de tenacidade e propriedades mecânicas do material, ela permite ao engenheiro responsável definir as melhores condições para a realização do teste, sem comprometer a integridade do equipamento e a segurança dos funcionários envolvidos.

Os resultados das avaliações mostraram que a tenacidade do material é a propriedade mais importante para verificar a possibilidade de ocorrência de extensão da trinca em resposta ao carregamento imposto pelo TH. Quanto maior a tenacidade do material maior deverá ser o defeito para ocorrer o crescimento subcrítico. As propriedades de encruamento, que também foram avaliadas, têm papel mais importante nos casos em que ocorre CSCD, pois influenciam diretamente na quantidade de extensão da trinca. Expoentes de encruamento maiores atuam no sentido da segurança, ampliando a região segura do diagrama FAD e minimizando a extensão da trinca.

A prática indiscriminada de testes periódicos com adoção de pressões idênticas a do teste hidrostático de fábrica não traz nenhum benefício ao equipamento, e em caso de haver atuação de mecanismos de danos, representa perigo ao equipamento, sendo a principal causa do CSCD durante a realização de THs.

Em consonância com os princípios da IBR, é preferível investir na determinação de um plano de inspeção adequado e específico para o equipamento, que considere os mecanismos de danos atuantes e os defeitos por eles gerados, e que seja capaz de detectar discontinuidades de tamanho inferior ao tamanho crítico adotando níveis de confiabilidade e risco adequados e possibilitem a inspeção segura, inclusive durante a operação, com a utilização de técnicas globais de inspeção e métodos de inspeção não intrusiva (INI).

Com uma atuação mais efetiva das ferramentas de inspeção, pode-se realizar THs em níveis de pressão inferiores aos recomendados pelos códigos de projeto, mantendo os padrões de avaliação de integridade dos vasos de pressão em níveis adequadamente rigorosos. Uma alternativa é a realização do TH periódico em níveis de pressão pouco acima da pressão de abertura da PSV, que é suficiente para verificação de estanqueidade e minimiza os possíveis efeitos negativos oriundos da sobrecarga, como a ocorrência de CSCD. Em casos mais críticos, pode-se fazer uso de ferramentas de acompanhamento, como o ensaio de emissão acústica, que permite a identificação de atividade por parte de defeitos, atuando como ensaio em conjunto com o TH, para indicar áreas propensas à inspeção complementar para verificação da ocorrência de CSCD.

7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As polêmicas em torno da realização de testes hidrostáticos, suas vantagens, desvantagens, benefícios, malefícios e limitações, exigem que mais trabalhos sejam realizados para investigar a adequação deste teste como ferramenta de avaliação de integridade dos vasos de pressão, diante das diferentes circunstâncias em que estes equipamentos podem operar e dos diversos mecanismos de danos atuantes. Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

1. Avaliar e quantificar o aumento na probabilidade de falha de vasos de pressão que sofreram crescimento subcrítico de descontinuidades durante a realização de THs.
2. Avaliar e quantificar a redução na vida remanescente de vasos de pressão que sofreram crescimento subcrítico e estão submetidos a mecanismos de dano, como fadiga e CST.
3. Avaliação da aplicabilidade e da eficiência do ensaio de emissão acústica na identificação de ocorrência de CSCD.
4. Avaliação da eficiência de THs realizados em pressões inferiores às determinadas pelos códigos de projeto na detecção de descontinuidades críticas.
5. Avaliação de ferramentas e métodos complementares ao TH e que podem colaborar para aumentar a eficiência deste na avaliação de integridade dos vasos de pressão, como os programas de IBR e as técnicas de INI (inspeção não intrusiva).

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ANDERSON, 1995) ANDERSON, T. L **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**, 2 ed. Boca Raton, CRC Press, 1995.

(ANDERSON, 2000) Anderson, Ted L., OSAGE, David A., **API 579: a comprehensive fitness-for-service guide**, International journal of pressure vessels and piping, vol.77, pp 953-963, 2000.

(API 510, 2006) API 510, **Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration**, NINTH EDITION, JUNE 2006

(API-579/ASME FFS-I, 2007) **API 579-1/ASME FFS-1**, JUNE 5, 2007

(ASME, 2004) ASME – American Society of Mechanical Engineers. **Boiler and Pressure Vessel Code, section VIII, divisions 1, 2 and 3**. New York, 2004.

(AVILA, 2005) ÁVILA, Gabriela Grisolia de, **CÁLCULO DE FADIGA DE RISERS RÍGIDOS ATRAVÉS DA MECÂNICA DA FRATURA**, Dissertação de mestrado, COPPE-UFRJ, RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL, 2005

(BASTIAN, 1989) BASTIAN, F. L., CAMINHA, H. M., MORAES, M, **Apostila de Mecânica da Fratura**, PEMM-COPPE-UFRJ, 1989.

(BS-7910, 2005) BS-7910, **Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structure**, British Standard Institution, 2005.

(CARVALHO, 2008) CARVALHO, Nestor Ferreira de, **Apostila do Curso de Inspeção e Manutenção em vasos de pressão**, Universidade Petrobras, 2008.

(CHALLENGER, 1995) CHALLENGER, N V, PHAAL R and GARWOOD, S J, **Fracture mechanics assessment of industrial pressure vessel**, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, Int. J. Pres. Ves. & Piping 61 (1995) 433-456.

(COWAN & PICKER, 1984) COWAN, A., PICKER, C., **Some Considerations of Overpressure Test / Limiting Defect Size Arguments for Ferritic Pressure Vessels**, Int. Journal of Pressure Vessel & Piping, 15, pag. 105-123, 1984.

(DONATO, 2007^a) DONATO, G.V.P, **Apostila de Vasos de pressão**, Programa de Formação Universidade Petrobras 2007.

(DONATO, 2007^b) DONATO, G.V.P **Teste Hidrostático: Comentários Técnicos**; Workshop: Teste Hidrostático em Equipamentos, Tubulações e Dutos, IBP, *Comissão de Inspeção de Equipamentos.2007*

(DONATO, 2007^c) DONATO, G.V.P, **Integridade de Equipamentos e Critérios de Aceitação**, 3 INSPEQ - Encontro de inspeção de equipamentos, 2007.

(ECKSTEIN, 2002) ECKSTEIN, Carlos Bruno, JATKOSKI, Edneu, ETTER, José Ademar Nucci, **Inspeção baseada em risco e NR-13 – uma breve análise de consistência**, 6^aCOTEQ, 2002.

(ECKSTEIN, 2009) ECKSTEIN, Carlos Bruno, **Notas de aula de Inspeção baseada em risco**, Universidade Petrobras, 2009.

(FALCÃO, 2002) FALCÃO, Carlos, **Apostila de projeto mecânico de vasos de pressão e trocadores de calor casco e tubos**, 2002.

(FILHO, 2003) FILHO, M. P. **Aplicação de IBR. Inspeção Baseada em Risco a Oleodutos segundo o API 581 BRD. Verificação de Consistência com as Práticas Usuais da Indústria para Avaliação de Risco**. Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, 2003.

(FORMBY, 1985) FORMBY, C. L., **Use of Overpressure Test to Indicate Fitness for Purpose of a Ferritic Pressure Vessel**, Int. Journal of Pressure Vessel & Piping, 19, pp. 47-68, 1985

(FOULDS, 2004) FOULDS, J., ANDREWA S., VISWANATHANB R., **Hydrotesting of fossil plant components**, International Journal of Pressure Vessels and Piping 81, pp.481–490, 2004

(FREIRE, 2007) FREIRE, J.L., **VISÃO DO TESTE HIDROSTÁTICO ATRAVÉS DO DIAGRAMA DE AVALIAÇÃO DE FALHA (FAD) COM EFEITO DE TEMPO**, artigo apresentado na COTEQ 2007.

(HIPPERT, 2004) HIPPERT, Eduardo, **Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J-da para previsão de colapso em dutos**, Tese, EP-USP, São Paulo, 2004.

(HIPPERT, 2005) HIPPERT, E., DONATO, G.V.P., TEXEIRA, J.C., SOUZA, A., FUJIKAWA, M., **Testes hidrostáticos de alta pressão em dutos**, artigo apresentado na 8 COTEQ.

(KATZ, 2005) KATZ, D., GAO, M., LIMON, S., Krishnamurthy,R., **Advances in crack assessment for pipeline integrity**, <<http://server-afb214.ethz.ch/icf/EXTENDED/5068.pdf>>. 11th International Conference of Fracture, Turim, Itália, 2005.

(KIEFNER) John F. Kiefner and Willard A. Maxey, **Periodic hydrostatic testing or in-line inspection to prevent failures from pressure-cycle-induced fatigue**, <http://www.kiefner.com/downloads/apifatigue.pdf>, KIEFNER & ASSOCIATES, acessado em Maio de 2009 .

(KIEFNER, 2000) KIEFNER, John F., MAXEY Willard A., **Benefits and limitations of Hydrostatic tests**, Presented at *API's 51st Annual Pipeline Conference & Cybernetics Symposium*, New Orleans, Louisiana (April 18-20, 2000).

(KLETZ, 2005) KLETZ, Trevor A., **O que houve de errado? Casos de desastres em indústrias químicas, petroquímicas e refinarias**, São Paulo, Pearson Makron Books, 279p., 2005.

(LAFRAIA, 2001) LAFRAIA, J.R.B., **Manual de Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**, Rio de Janeiro, Qualitymark, Petrobras, 2001, 388p.

(NJO, 1985) NJO, D. H., **Stable Crack Growth During Overstressing or Proof Testing of Pressure Vessels**, CSNI Report N. 113, Committee on Safety of Nuclear Instalations, Paris, France, Julho de 1985

(MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 1995), **Norma Regulamentadora 13 do Ministério do Trabalho e Emprego**, Brasil, 26 de Abril de 1995, Governo Federal.

(PEREIRA, 2004) PEREIRA, Jorge dos Santos, **ANÁLISE DE EFEITOS DE TESTE HIDROSTÁTICO EM VASOS DE PRESSÃO**, Dissertação de Mestrado Profissional,UFSC, 2004.

(PEREIRA, 2007) PEREIRA, J., FERES, P., **Crescimento Subcrítico de descontinuidades durante a aplicação de testes hidrostáticos em vasos de pressão**, Revista Petro & Química, Maio de 2007, pp 100-105.

(PEREIRA, 2009) PEREIRA, Jorge dos Santos, FERES FILHO, Pedro, **Afinal, quais os possíveis resultados da aplicação de testes hidrostáticos em vasos de pressão que entraram em serviço?**, 10^oCOTEQ, 2009.

(PINTO, 2008) PINTO,Elias de Paiva, GARCIA Elenice Leite, NASCIMENTO, João Vicente Santiago, SOUZA, Ricardo Estfany Aquino de, **Identificação dos mecanismos de danos atuantes nos equipamentos da unidade de processamento de gás natural da Petrobras**, ENEGEP, 2008.

(RASTOGI, 2006), RASTOGI, Rohit., **An introduction to BS 7910: The UK Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic**, Indian Nuclear Society, Lectures on Welding, NDE and Integrity Assessment, September 18-22, 2006.

(RASTOGI, 2006^b), RASTOGI, Rohit **An Introduction to API RP 579: Section 9, Assessment of Crack like Flaws**, Indian Nuclear Society, Lectures on Welding, NDE and Integrity Assessment, September 18-22, 2006.

(SILVA, 1998) SILVA, Rosana Vilarim, **Avaliação da tenacidade à fratura de soldas de alta resistência e baixa liga pelo método da Integral J**, EE-São Carlos, USP, 1998.

(SOARES, 2002) SOARES, Sérgio Damasceno, DONATO, G.V.P, **1979 a 2002 – 23 ANOS DE EMISSÃO ACÚSTICA NA PETROBRAS - DESENVOLVIMENTOS, PESQUISAS E RESULTADOS**, Trabalho apresentado no XX Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, Salvador, agosto, 2002

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

(TARNOWSKI, 2003) TARNOWSKI, Gabriel Alejandro, **Determinação da pressão de colapso em dutos API 5L X56 aplicando o método R6**, Dissertação de mestrado, PPGEM/UFRGS, 2003.

(TARPANI, 1997) TARPANI,J.R., SPINELLI, D., **Linear elastic vs elastic-plastic fracture mechanics methods in nuclear vessel integrity assessments**, Int. J. Pres. VET. & Piping 74 (1997) 97-103

(TEIXEIRA, 2003) TEIXEIRA, J.C.G., **Avaliação de Defeitos Planares em dutos**, Relatório Técnico TMEC 015/2003, Cenpes / Petrobras.

(TEIXEIRA, 2007) TEIXEIRA, J.C.G., **Teste hidrostático em dutos de alta tenacidade: remédio ou veneno**. Workshop: Teste Hidrostático em Equipamentos, Tubulações e Dutos – IBP – 2007.

(TELLES, 1996) TELLES, P.C.S, **Vasos de Pressão** 1996, 2^a edição, Rio de Janeiro, RJ, Livros Técnicos e Científicos.