

MECÂNICA da FRATURA na INDÚSTRIA NUCLEAR  
APLICAÇÕES e RECOMENDAÇÕES DA NORMA ASME

Carlos Alexandre de Jesus Miranda  
COPESP-IPEN/CNEN-SP  
Travessa R, 400, CEP 05508-900  
Cid. Universitária - SP

RESUMO

São analisadas algumas recomendações para os componentes da Barreira de Pressão Classe 1 de Reatores Nucleares tipo PWR, abrangidos pelas Seções III e XI (e seus apêndices), da norma ASME. São discutidas as condições necessárias para a aplicação dos conceitos da Mecânica de Fratura Elástica Linear (típica em materiais como o aço ferrítico em baixas temperaturas ou altas taxas de irradiação) e da Mecânica de Fratura Elasto-Plástica (típica em materiais como os aços inoxidáveis), os modos típicos de colapso de uma seção trincada e os requisitos de projeto que devem ser observados.

INTRODUÇÃO E CONCEITOS GERAIS

Serão utilizados, neste trabalho, diversos termos, símbolos e/ou abreviações típicos da mecânica da fratura como K, J,  $RT_{NDT}$ , etc. Para sua conceituação ou definição se remete às refer. [4] e [5] principalmente.

A Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) está bem estabelecida, conceitualmente, com o fator de intensidade de tensões K sendo o parâmetro "de controle". Para a sua aplicação, entretanto, são necessárias certas condições, tais como: .alta resistência do material; .material relativamente frágil; .grandes espessuras; .baixas temperaturas; .altas taxas de carregamento, etc. A Mecânica da Fratura é aplicável tanto à fase de projeto da planta quanto à fase de operação da mesma.

No caso particular dos materiais utilizados em plantas nucleares (de pesquisa e/ou de potência) as limitações à aplicação da MFEL se tornam evidentes pois, em geral, temos: . espessuras insuficientes para satisfazer as restrições dimensionais da MFEL; . temperaturas elevadas; . materiais muito dúcteis (aços austeníticos); . materiais de baixa resistência relativa; . cargas variando lentamente; etc.

É usual que o material do Vaso do Reator seja fabricado em aço ferrítico que, dependendo das condições ambientais, isto é, do alto nível de irradiação neutrônica principalmente, pode vir a apresentar comportamento frágil. Apesar das restrições de aplicação a MFEL é, praticamente, a base de toda a norma ASME [1] e [2] com respeito as recomendações relativas ao assunto. Existem grupos desenvolvendo estudos que deverão resultar em propostas a serem incorporadas à norma, modificando-a, para que sejam considerados os princípios da MFEL (Mecânica da Fratura Elasto-Plástica) nas suas recomendações de forma extensiva.

A norma ASME, na Seção XI [2], que trata da Inspeção em Serviço, define o que seja *indicação*, *trinca* (flaw) e *defeito* embora, de um modo geral, estes termos algumas vezes sejam usados indistintamente, embora erroneamente. Assim: *indicação* - é uma evidência detectada por exames não destrutivos (NDE-Non-Destructive Examination); *trinca* - é uma imperfeição ou descontinuidade estrutural detectável por técnicas de NDE; *defeito* - é aquela imperfeição que tem um tamanho, forma,

orientação e/ou localização que não são admissíveis.

Os três modos típicos de colapso de uma seção trincada, abordados pela Mecânica da Fratura, são: colapso frágil-ocorre quando o fator intensidade de tensões K aplicado (devido ao carregamento) supera o fator K crítico do material e a propagação da trinca se dá em velocidades supersônicas (também chamado: falha por clivagem); colapso ou rasgamento dúctil (ductile tearing)-ocorre quando a trinca existente após uma fase de crescimento estável, atinge um comprimento limite a partir do qual o seu crescimento é instável levando a peça ao colapso; colapso plástico-caracterizado pela perda da capacidade da seção remanescente suportar as cargas (tensões) atuantes antes da trinca se tornar instável.

Aplicações a Vasos de Pressão

Em uma planta nuclear de potência o componente mais importante da barreira de pressão primária é o Vaso de Pressão do Reator (VPR) que pode ter dimensões da ordem de 20 cm de espessura, 3 m de diâmetro e até 10 m de altura e é extremamente difícil, se não impossível, de ser substituído. O VPR sofre forte exposição de irradiação neutrônica na sua parte cilíndrica inferior na posição do núcleo, o 'belt line'. O nível de fragilização é monitorado por um programa de inspeção de ensaios com corpos de prova que sofrem, no interior do VPR, a mesma irradiação neutrônica do VPR e que são retirados de tempos em tempos. Pela Seção XI, da norma ASME, pelo menos 4 inspeções devem ser realizadas durante a vida útil de VPR sendo que a primeira deve ocorrer até 3 anos do início do funcionamento da planta. Devido ao fato de ser fabricado em aço ferrítico um dos efeitos da irradiação neutrônica é a redução do patamar superior de energia de Charpy (Charpy upper shelf energy - CUSE). A refer. [3] (10CFR50) impõe que os materiais dos vasos de reatores nucleares tenham CUSE > 50 ft.lbs. Sabe-se que, devido a fragilização por irradiação neutrônica, alguns reatores tem materiais com CUSE < 50 ft.lbs e, nestes casos, deve-se realizar uma análise pela Mecânica da Fratura (MF) para demonstrar que continua existindo margem de segurança aceitável para a continuidade operacional do Vaso. É principalmente este fator, fragilização

neutrônica, que determina a vida útil do VPR em torno de 30 a 40 anos tipicamente.

#### Aplicações a Tubulações

Diferentemente dos Vasos de Pressão onde a fragilização por irradiação é o principal fator limitante da vida útil do Vaso, para as tubulações nucleares, em geral fabricadas em aços inoxidáveis, o fator limitante é a fadiga. Na fase de projeto a mais importante aplicação da MF em tubulações nucleares de elevada pressão e energia é a tecnologia de Leak-Before-Break, LBB. Isto visando reduzir a grande quantidade de dispositivos que visam restringir os deslocamentos da tubulação que, postuladamente, se quebra súbita e totalmente (double-ended guillotine break-DEGB) gerando o acidente termo-hidráulico postulado LOCA - LOSS OF COOLANT ACCIDENT.

Segundo [4] e [6] tem sido demonstrado, com o auxílio e os avanços da MF, que é extremamente baixa a probabilidade de ocorrência de DEGB, isto porque nas tubulações nucleares, de materiais bastante dúcteis e alta tenacidade, ocorre inicialmente um vazamento detectável pelos sistemas de detecção da planta o que permite: 1) o seu desligamento, antes da falha catastrófica postulada, e 2) que sejam realizados reparos na mesma. Uma vez aprovados e aceitos os critérios de LBB para uma planta, postular o DEGB, isto é, a ocorrência de LOCA, não é mais necessário para a barreira de pressão do circuito primário.

Quando em serviço outras recomendações da norma, Seção XI, são feitas com respeito ao caso de tubulações onde sejam detectadas imperfeições durante uma inspeção periódica. São definidos critérios de aceitação destas imperfeições (trincas) que permitam que as tubulações continuem operando. Para isto é necessário desenvolver análises que mostrem que a tubulação trincada não sofrerá colapso por nenhum dos 3 mecanismos ou modos típicos citados.

#### PROCEDIMENTO GERAL

Se uma Indicação encontrada durante uma destas inspeções periódicas exceder os padrões da seção XI, é obrigatório que seja feita uma análise de Mecânica da Fratura segundo o procedimento que, resumidamente, estabelece:

- 1.determinar a configuração real da trinca,
- 2.escolher uma forma simples que modele a trinca para facilidade da análise (círculo, elipse ou retângulo) e suas dimensões,
- 3.determinar as tensões na trinca para as condições de serviço A, B, C e D (Normal, Anormal, Emergência e Falha) conforme definidas na norma ASME [1],
- 4.calcular o fator intensidade de tensão na trinca para cada condição de carregamento,
- 5.determinar as propriedades do material levando em conta os efeitos de fragilização por irradiação,
- 6.com os conceitos da MFEL, obter o tamanho final da trinca, no fim da vida útil do componente, e o tamanho crítico mínimo da trinca para cada condição de serviço A, B, C e D,
- 7.verificar se a trinca é aceitável comparando o seu tamanho final previsto com o tamanho admissível.

Se não se pode demonstrar suficiente margem de segurança a norma permite que sejam feitos reparos para eliminar o defeito. De um modo geral, em estruturas soldadas, existem sempre imperfeições que podem ser associadas a trincas para efeito da aplicação dos conceitos da MF às mesmas. Na existência comprovada de uma imperfeição ou trinca se deve verificar, portanto, se a mesma se propagará (i.é.: aumentará) com os carregamentos previstos para a

estrutura e, em caso afirmativo, se o seu estado final é crítico ou não (i.é.: se compromete ou não a estabilidade ou capacidade da estrutura de sustentar as cargas aplicadas).

Observe-se que, dependendo da parte da estrutura onde foi detectada ou postulada a trinca, pode haver cargas cíclicas além de outras cargas "constantes". Assim na análise de estabilidade de estruturas com trincas (análise de mecânica da fratura) este fato deve ser levado em conta. Para tal análise são necessários, fundamentalmente, conhecimentos ou informações sobre: .estado de tensões associados aos diversos carregamentos; .parâmetros dos materiais (K, J, C\*, E, u, etc - ver definições nas refer. [4] e [5]); .dados sobre a trinca detectada ou postulada e sobre a sua forma e orientação; .relacionamento dos parâmetros acima, etc.

#### Abordagens Usando a MFEL

A MFEL é utilizada para avaliar a margem de segurança para materiais frágeis ou que possam vir a apresentar comportamento frágil devido as condições ambientais. A refer. [4] resume alguns roteiros genéricos básicos que devem ser seguidos para se aplicar a MF usando, os conceitos da MFEL, a partir das recomendações da norma ASME Divisão 1 Seção III Subseção NB e Seção XI, Divisão 1, Subseções IWA, IWB, IWF e Apêndices, principalmente:

I - Análise Paramétrica - que visa: (a) avaliar os fatores de segurança que existem no projeto a partir de avaliação e variação dos valores de tensão, propriedades dos materiais e capacidade de exames de inspeção não destrutivos e (b) permitir uma otimização do projeto final, seleção de materiais e especificações dos ensaios não-destrutivos.

II - Crescimento de Trinca - esta abordagem é particularmente eficiente quando se conhece um defeito que existe ou é descoberto durante o funcionamento da planta. Assim se tem um tamanho de trinca inicial e se obtém ou calcula o crescimento que a trinca terá a partir dos carregamentos previstos para a planta, durante a sua vida restante prevista (a partir do descobrimento da trinca, se for o caso). E se compara com o tamanho crítico de trinca para que ocorra a falha a partir das condições de funcionamento da planta (material, temperatura, condições ambientais, cargas, etc). A experiência acumulada com cálculos de crescimento de trincas por fadiga mostra que para trincas internas é improvável o seu crescimento mensurável devido aos transientes operacionais e mesmo para as trincas superficiais este crescimento não é previsto ser excessivo. É necessário que: (a) exista uma razoável confiança na capacidade de inspeção inicial; (b) a trinca seja descoberta durante o funcionamento ou fabricação e (c) um esquema de inspeção em serviço detalhado seja estabelecido para acompanhar a evolução da trinca.

III - Crescimento de Trinca com Corrosão - é similar a abordagem anterior com a diferença que a vida útil do equipamento é baseada no parâmetro  $K_{ISCC}$  (Threshold for Stress Corrosion Crack Growth) em vez de  $K_{IC}$  (Brittle Fracture Resistance), levando-se em conta, também, a parcela de crescimento de trinca provocada por fadiga.

IV - Fadiga de Alto Ciclo - neste caso se procura manter o  $\Delta K$  aplicado abaixo do  $\Delta K_{th}$  limite para o material. Isto, fazendo com que as tensões cíclicas sejam muito baixas e o tamanho de trinca inicial seja muito pequeno. Caso não seja possível manter o  $\Delta K$  aplicado abaixo do  $\Delta K_{th}$  do material

deve-se definir um programa de inspeção em serviço para monitorar o surgimento e/ou o crescimento de uma eventual trinca e evitar que ocorra a falha do equipamento.

V - Leak-Before-Break (LBB - Vazamento-Antes-da-Quebra) - esta abordagem é utilizada para avaliar a integridade estrutural de componentes sob pressão como as tubulações. Basicamente se busca determinar o que ocorre quando uma trinca cresce através da espessura da parede de um tubo. Se procura identificar se haverá uma falha localizada e parcial do tubo, com vazamento detectável antes do colapso final do mesmo, ou se haverá uma falha brusca e completa do tubo.

Dos mecanismos envolvidos, somente uma análise revelará que aspecto é mais significativo para o problema em questão e que limite deve ser observado. De uma forma geral os problemas que aparecem no dia-a-dia obrigam a se considerar o crescimento de trinca sub-crítico por um ou mais mecanismos possíveis.

#### Abordagens Usando a MFEP

A MFEP (Mecânica da Fratura Elasto-Plástica) é usada para avaliar a margem de segurança para materiais trabalhando em regime dúctil como os aços ferríticos, na região acima da temperatura  $RT_{NDT}$  e para aços austeníticos e outros materiais que não apresentam a transição frágil-dúctil.

Em geral as abordagens pela MFEP são análogas a aquelas da MFEL, utilizando-se o parâmetro "integral J" e a curva J-R do material. Assim  $J_{IC}$  define o nível de carregamento aplicado que faz com que uma trinca comece a crescer de forma estável para carregamentos monotônicos. O valor  $J_{instab}$  define o nível de carregamento aplicado que faz com que uma trinca que vinha crescendo de forma estável se torne instável. Enquanto  $J_{IC}$  é um parâmetro característico do material o parâmetro  $J_{instab}$  depende do material (ou melhor: da sua resistência ao crescimento estável de uma trinca) e do carregamento da estrutura.

Na figura 1 tem-se uma indicação genérica do parâmetro (critério de tenacidade a fratura,  $K_{IC}$  ou  $J_{IC}$ ) a ser selecionado dependendo da situação, para materiais que apresentam transição frágil-dúctil como tipicamente acontece com os aços ferríticos.

#### CUIDADOS COM O MATERIAL E ITENS FABRICADOS - RECOMENDAÇÕES DA SEÇÃO III

Testes - A norma ASME [1] recomenda que os materiais da barreira de pressão sejam testados para medir a sua tenacidade a fratura, exceto para algumas condições tais como: a. para materiais com espessura nominal  $< 5/8"$ , b. parafusos e porcas com diâmetro nominal  $< 1"$ , c. barras com seção de área  $< 1 \text{ in}^2$ , d. quaisquer materiais de tubos, bombas e válvulas com diâmetro nominal  $< 6"$ , e. materiais de bombas, válvulas e conexões com tubulações de espessura de parede  $< 5/8"$ , f. aços austeníticos e g. materiais não-ferrosos. Os testes recomendados são: Teste de CHARPY e Queda de Peso. São também indicados o número de testes necessários e o procedimento para determinar a temperatura em que os mesmos serão realizados dependendo da destinação que se dará ao material (placas, forjados, barras, tubos, parafusos, etc), inclusive soldas. São também indicados os limites aceitáveis dos resultados de tais testes e ensaios.

Exames - Também são definidos alguns métodos de exame de partes estruturais. Tais métodos

podem variar de acordo com a parte examinada. Entre os principais métodos indicados pela norma podem ser citados os exames: -por Inspeção Visual (necessita experiência, acessibilidade, lentes de aumento, etc), -por Ultra-som, -por Partículas Magnéticas (partículas de ferro em líquido fluorescente), -por Líquido Penetrante, -por Radiografia (Raios X ou Raios GAMA), -por Emissão Acústica.

Para cada parte estrutural (placa, tubo, forjado, barra, etc), e para cada método, são indicados os procedimentos de exames a serem seguidos, quando os mesmos devem ser aplicados, bem como meios de avaliar os resultados e valores aceitáveis. Quando possível são indicados, também, os meios aceitáveis de se reparar uma peça cujo exame tenha mostrado resultados não-aceitáveis.

No caso de defeitos encontrados em soldas são estabelecidos alguns procedimentos de como se deve proceder para eliminá-los: por esmerilhamento, por usinagem, etc, para posteriormente refazer a solda na parte afetada (inclusive com tratamento térmico nas áreas afetadas, se necessário). Estas áreas deverão ser novamente inspecionadas pelos mesmos métodos utilizados anteriormente na detecção do defeito.

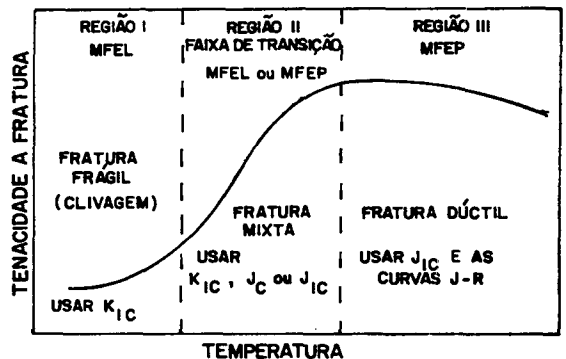


Figura 1 - Seleção do Critério de Tenacidade a Fratura para Materiais com transição Frágil-Dúctil

Padrões de Aceitação: são definidos, pela norma, os padrões de aceitabilidade e os tipos das indicações encontradas a partir dos exames das soldas. Assim: (a) somente indicações com dimensões  $> 1/16"$  devem ser consideradas imperfeições relevantes, (b) imperfeições do tipo laminares são aceitáveis com ou sem reparos posteriores, condicionalmente, dependendo da sua extensão, (c) indicações de imperfeições não laminares inaceitáveis: (c.1) - quaisquer indicações lineares  $> 3/16"$  de comprimento, (c.2) - indicações circulares com dimensões  $> 3/16"$  e (c.3) - quatro ou mais indicações alinhadas e separadas por menos que  $1/16"$  entre suas extremidades

São fornecidas recomendações sobre os tipos de exame (radiografia, líquidos penetrantes, etc) de diversos tipos e localização de soldas (filete, penetração parcial, total, etc). Também são definidos os limites aceitáveis para as indicações relevantes obtidas a partir de cada tipo de exame das soldas. No caso particular de exames por radiografia, ultra-som ou partículas magnéticas temos, tipicamente como inaceitáveis: a. trincas, fusão incompleta, defeituosa ou com penetração incompleta independente do seu tamanho e b. Imperfeições detectadas que tiverem compri-

mento que exceda (t é a espessura da solda sob exame):

1/4" para	t < 3/4"	ou:
t/3 para	3/4" < t < 2 1/4"	ou:
3/4" para	t > 2 1/4"	

**REQUISITOS DE PROJETO  
(INTEGRIDADE e FUNCIONALIDADE)**

Entre a especificação dos materiais e os cuidados que se deve ter a fim de que os mesmos atendam as exigências da norma, e os cuidados com os itens ou componentes estruturais fabricados, tem-se, em geral, um longo caminho que passa pela fase de projeto destes itens ou componentes. Nesta fase de projeto verifica-se a integridade estrutural dos componentes (vasos de pressão, tubulações, bombas, válvulas, suportes, etc). Em alguns casos há que se verificar a funcionalidade do componente, como é o caso de válvulas de segurança que devem continuar operando mesmo após a ocorrência de um terremoto, por exemplo.

Note-se a diferença existente entre requisitos de integridade (que o cálculo ou análise de tensões pode estabelecer com precisão) e requisitos de funcionalidade (para os quais somente ensaios específicos podem fornecer resultados confiáveis).

Os carregamentos que ocorrem nas estruturas podem ser classificados em mecânicos ou térmicos e como estáticos ou transientes (dinâmicos). Os carregamentos transientes, notadamente os de origem térmica, devido ao seu grande número de ocorrências, induzem nas estruturas ciclos de tensões que podem ser severos a ponto de provocar a ruína das mesmas devido ao acúmulo de dano em cada ciclo (fadiga).

Na fase de análise dos componentes e estruturas (requisitos de integridade) são obtidos valores de tensões e de deformações que ocorrem nos mesmos, para cada uma das condições estabelecidas pela norma ASME (Condições de Projeto, de Serviço níveis A, B, C ou D e Condições de Testes) que são comparadas com os limites admissíveis associados definidos pela norma. Estes limites são específicos para cada tipo de tensão (membrana, membrana + flexão, membrana + flexão + pico (fadiga) e tensões térmicas ou secundárias). Em particular são fornecidos procedimentos e limites para a análise de carregamento cíclico (fadiga). Ressalte-se que neste caso, para se determinar o dano acumulado em uma seção de um componente, devido a fadiga produzida pelas cargas cíclicas, deve-se utilizar a Regra de Miner, de forma que:

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{adm,i}} < 1 \quad (1)$$

onde  $N_i$  é o número de ocorrências para um ciclo  $i$ , e  $N_{adm,i}$  é o número de ocorrências admissível para o mesmo ciclo  $i$  com o valor da tensão alternada associado (Salt,  $i$ ).

A norma ASME [1] exige que seja sempre feita a combinação ou superposição de transientes, para formar os ciclos, considerando-se a pior situação,  $i$ . é: desprezando-se a ordem temporal dos acontecimentos que os geraram. Por exemplo, se um transiente TIPO 1, com 1000 ocorrências, produz tensões que variam de 0. a 160. MPa e outro transiente TIPO 2, com 10000 ocorrências produz tensões entre 0. e -150. MPa, devem ser definidos os seguintes ciclos, para efeito de cálculo de dano acumulado a fadiga: (1)  $N_1 = 1000$  ciclos com Salt,  $1 =$

$(160.+150.)/2 = 155.$  MPa e (2)  $N_2 = 9000$  ciclos com Salt,  $2 = (150. + 0.)/2 = 75.$  MPa. Note-se que este procedimento (cálculo do dano à fadiga) é diverso daquele utilizado nos Apêndices da Seção XI para determinar o crescimento de trincas por fadiga.

**RECOMENDAÇÕES DOS APÊNDICES DA SEÇÃO III**

Os Apêndices da Norma ASME [1] são divididos em dois grandes grupos: aqueles Mandatários (identificados por números) e os Não-mandatários (identificados por letras).

**Mandatários** - No Apêndice VI temos definições e limites para as chamadas "indicações arredondadas" obtidas através de radiografia. Tais indicações arredondadas são aquelas que tem um comprimento máximo de 3 vezes a largura. Podem ser circulares, elípticas, cônicas ou de forma irregular (vale para materiais Ferríticos, Austeníticos e Não-Ferrosos). São definidos critérios de aceitação destas indicações nos casos de aparecerem isoladas, agrupadas e/ou alinhadas. Tais critérios são função da espessura da parte radiografada, da soma dos comprimentos das indicações relevantes (cuja definição é fornecida) e como as mesmas aparecem. As dimensões obtidas destas recomendações irão servir para as análises da seção XI.

**Não-Mandatários** - Apêndice G: Protection Against Nonductile Failure - Embora este Apêndice G esteja entre aqueles "não-mandatários" da norma ASME o mesmo se torna mandatário a partir dos requisitos impostos pelo Code of Federal Regulations Parte 10 Título 50 (10CFR50) no seu Apêndice G. A MFEL é utilizada para definir os limites operacionais de uma planta (pressão e temperatura) com margem de segurança suficiente para evitar toda e qualquer propagação de trinca no Vaso durante a operação normal. A despeito dos sistemas de proteção que existem, estes limites operacionais podem ser superados com a ocorrência de sobrepressão eventual que exceda os limites definidos. Neste caso uma análise de MF deve ser realizada para garantir que o Vaso não venha a sofrer nenhum dano.

As regras deste Apêndice G visam: cobrir os materiais ferríticos de vasos de pressão (barreira de pressão) e dar fundamentos para o projeto, sendo baseadas nos princípios da MFEL. Básica e resumidamente tem-se o seguinte procedimento: 1. Postula-se um defeito (flaw) máximo (Defeito Máximo Postulado-DMP), função das dimensões da peça ou da espessura da parede, 2. Para cada carregamento específico (ou melhor: para cada tipo de tensão na seção em estudo), associado a cada condição de serviço, calcula-se o fator intensidade de tensão  $K_I$  (para modo I) e 3. Obtem-se a soma dos valores de  $K_I$  encontrados no passo 2 anterior que é comparada com o valor de referência ( $K_{IR}$ ) para o material, na temperatura considerada).

Este DMP trata-se de um defeito 'agudo' com superfícies normais à direção da tensão máxima, cujas dimensões máximas (largura  $l$  e comprimento  $c$ ) dependem da espessura  $t$ . Os valores postulados são: a) para  $t < 4$ ":  $l=1$ " e  $c=1$ ", b) para  $4 < t < 12$ ":  $l=t/4$  e  $c=1.5t$  e c) para  $t > 12$ ":  $l=3$ " e  $c=18$ ". Defeitos menores que o DMP poderão ser utilizados se tais valores, inferiores aos recomendados, puderem ser garantidos. Para o defeito postulado, com os critérios da MFEL é possível determinar a pressão admissível, para o componente em estudo, em regiões das paredes distantes de descontinuidades. A norma recomenda que se use

um fator 2 aplicado ao valor de  $K_I$  associado às tensões primárias. Devido a estes fatores de segurança embutidos nos procedimentos recomendados pela norma se estará prevenindo a fratura frágil mesmo que os defeitos reais tenham dimensões que sejam o dobro dos máximos postulados. Para a obtenção de  $K_{IR}$  (em  $Ksi.in^{1/2}$ ) a norma fornece uma expressão, reproduzida abaixo, função da temperatura T, em °F, e da temperatura de referência da transição frágil-dúctil do material (RT<sub>NDT</sub>: reference nil ductility temperature).

$$K_{IR} = 26.78 + 1.223 e^{0.0145(T-RT_{NDT}+160)} \quad (2)$$

Note-se que outros valores de  $K_{IR}$  podem ser adotados desde que devidamente justificados através de ensaios. Tais valores deverão constar das especificações técnicas do componente em estudo/análise. Para cada condição de serviço a norma define como obter os fatores de intensidade de tensões  $K_{IR}$ .

Para regiões afastadas das descontinuidades, é indicado como obter os fatores intensidade de tensões  $K_I$  para Tensão de membrana, de Flexão e de Gradiente Térmico na espessura da placa ou casca a partir de multiplicadores específicos. Para Bocais, Flanges e Regiões Próximas a Descontinuidades usa-se o mesmo procedimento básico, adotando-se fatores de correção específicos, sendo que as cargas de pré-aperto em parafusos devem ser consideradas primárias para efeitos destas verificações e para bocais com diâmetro < 2.5" não é necessária a análise de tenacidade a fratura.

Para as Condições de Serviço níveis C e D não são definidos procedimentos e regras gerais. Assim para cada caso se deverá definir o procedimento mais adequado. No caso de cargas devidas aos Testes Hidrostáticos são fornecidos procedimentos e regra semelhantes a aqueles mencionados acima, mas com fatores de correção diferentes.

Um evento sério que pode afetar a integridade do Vaso é o chamado Choque Térmico Pressurizado (PTS) que pode ocorrer durante um transiente termo-hidráulico severo, como o LOCA, que é caracterizado por: -forte e brusco resfriamento da superfície interna do VPR, devido ao sistema de injeção de emergência, seguido pela re-pressurização. A presença de um defeito de tamanho crítico na parede do Vaso além da degradação do material pela fragilização neutrônica são condições que exigem uma análise de PTS.

#### RECOMENDAÇÕES DA SEÇÃO XI INSPEÇÃO EM SERVIÇO

A seção XI da norma ASME [2] consiste de 3 grandes divisões: Div. 1 (W), Div. 2 (G) e Div. 3 (M), respectivamente para reatores refrigerados a água leve, a gás e a metal líquido. A seguir serão mencionadas algumas das principais recomendações da Div. 1, que consiste em várias subseções associadas aos componentes Classe 1, 2, 3, MC, etc. O enfoque será para a subseção IWB (componentes Classe 1) principalmente, e os Apêndices associados.

Na Subseção IWA, Requisitos Gerais, são definidos vários tipos de exames para detectar: trincas (VT-1), vazamentos (VT-2), o estado e comportamento estrutural de componentes e suportes (VT-3), etc. Os exames que interessam a Mecânica da Fratura são do tipo VT-1, já descritos acima, e devem ser executados por pessoal devidamente qualificado. São forneci-

das definições para os tipos das imperfeições encontradas (superficiais, profundas, simples, múltiplas, alinhadas, não-alinhadas, superpostas, etc) e sua caracterização dimensional. É definido, inclusive, o número de dígitos significativos que se deve usar para as dimensões das imperfeições: múltiplos de 0.1" para valores > 1" e de 0.05" para valores < 1". São fornecidas instruções de como, e em que situações, proceder para executar reparos ou substituições em partes da barreira de pressão onde tenham sido detectados defeitos.

Na Subseção IWB, Requisitos Para Componentes Classe 1 de Reatores Refrigerados a Água Leve, são fornecidos os métodos de exame e testes para diversos componentes ou partes da barreira de pressão, as localizações típicas a serem examinadas e, os valores admissíveis para as imperfeições ou indicações encontradas durante as inspeções, após a sua classificação e caracterização dimensional através de tabelas específicas, de acordo com o seu tipo e com o tipo de solda onde as mesmas ocorrem. Adicionalmente são fornecidos critérios para avaliar analiticamente as trincas cujas dimensões excedam os limites prescritos, isto é: o quanto as mesmas crescerão até a próxima inspeção ou até o fim da vida útil prevista do componente. Para tanto os critérios variam de acordo com a espessura e com o material.

Componentes em aço ferrítico - Para espessuras > 4" as trincas são classificadas em cinco categorias: 1 -trinca superficial inteiramente contida no cladding; 2 trinca superficial que atinge o material base; 3 -trinca interna que abrange o cladding e o Material base; (pode ser classificada em interna ou superficial) 4 - trinca interna, contida no material base mas começando na fronteira entre cladding e o material base. (pode ser classificada em interna ou superficial); 5 - trinca interna inteiramente contida no material base (pode ser classificada em interna ou superficial)

Tubulações em Aço Austenítico - Para o caso de uma tubulação austenítica, onde tenha sido detectada uma trinca que não atenda aos limites definidos na norma, deve-se avaliar se a mesma pode continuar operando a partir de uma análise de crescimento da mencionada trinca, até a próxima inspeção, segundo os procedimentos do Apêndice C, com algumas restrições quanto ao material.

#### RECOMENDAÇÕES DOS APÊNDICES DA SEÇÃO XI

Serão abordados apenas os Apêndices não-mandatários da Seção XI entre os quais os seguintes são destacados (o Apêndice G desta Seção XI é idêntico ao da Seção III, Divisão 1): Apêndices A - Análise de Trincas em componentes de Aços Ferríticos; 2) C- Análise de Tubulações de Aços Austeníticos e 3) H -Análise de Tubulações Ferríticas. Onde for necessário avaliar o crescimento de trinca (da/dN em polegadas por número de ciclos) por fadiga deve-se usar a Lei de Paris (eq. 3). A norma indica valores típicos para Co e n em função do ambiente e do parâmetro R(=Kmin/Kmax, se Kmin<0 usa-se R=0).

$$da/dN = Co(\Delta K_I)^n \quad (3)$$

O apêndice A se aplica, principal e primariamente, a análise de trincas em componen-

tes ferríticos com espessuras > 4", tensão de escoamento  $S_y < 50$  Ksi e geometria simples (idem distribuição de tensões). É definido um procedimento detalhado, mas complexo, para avaliar se o componente poderá continuar funcionando ou não, dependendo do material, estado de tensões, geometria da trinca, condições de serviço, etc, inclusive levando-se em conta efeitos ambientais como corrosão e irradiação. No caso de materiais sensíveis a irradiação neutrônica, os parâmetros devem ser obtidos a partir dos corpos de prova irradiados, de acordo com o programa de ensaios específicos previstos. Caso tais dados não estejam disponíveis, estes efeitos sobre  $K_{Ic}$  e  $K_{Ia}$  devem ser considerados deslocando a  $RT_{NDT}$  (reference nil-ductility temperature) em função da irradiação.

No apêndice C o procedimento adotado é, basicamente, semelhante ao utilizado no caso de trincas em tubulações ferríticas com, principalmente, as seguintes diferenças: 1). é obrigatória a consideração do tipo de solda (SMAW ou SAW); 2) orientação da trinca (axial ou circunferencial); 3) possibilidade de trinca por corrosão sob tensão; 4) não há restrições ao uso do fator  $R < 0.5$  e 5) a trinca deve ser envolvida por uma área plana circular ou retangular.

O apêndice H trata da Análise de Trincas em Tubulações de Aços Ferríticos. A metodologia utilizada neste apêndice leva em conta a possibilidade de falha por um dos três mecanismos típicos já citados.

Basicamente tem-se o seguinte procedimento genérico: 1 - determinar a configuração da trinca e suas dimensões (direção axial e circunferencial); 2 - determinar as tensões normais a trinca para as condições normal (+upset e testes) e de emergência e falha; 3 - realizar uma análise de crescimento de trinca por fadiga e por corrosão sob tensão (com os procedimentos recomendados); 4 - obter as propriedades do material ( $S_y$  e  $J_{Ic}$ ) ou usar os valores tabelados; 5 - usando os critérios do parágrafo H-4000 identificar, o mecanismo ou modo de falha do material, na temperatura associada a condição em análise; 6 - usar os procedimentos H-5000, H-6000 ou H-7000 para o modo de falha correspondente identificado; 7 - usando as recomendações do IWB-3652 determinar a aceitação ou não da tubulação para a mesma continuar operando.

## CONCLUSÕES

Foram analisadas algumas recomendações para os componentes da Barreira de Pressão Classe 1 de Reatores Nucleares tipo PWR e discutidas as condições necessárias para a aplicação dos conceitos da Mecânica de Fratura Elástica Linear e da Mecânica de Fratura Elasto-Plástica, além dos modos típicos de colapso de uma seção trincada e os requisitos de projeto que devem ser observados.

O projetista deve estar alerta para alguns efeitos adversos que podem ocorrer e que influenciam as análises e/ou parâmetros associados ou relacionados com a mecânica da fratura, como: (a) Efeitos do Meio Ambiente - A possibilidade de alterações nas propriedades dos materiais devido, em particular, a irradiação por neutrons rápidos (aqueles com energia > 1. MeV), que podem provocar um significativo aumento na temperatura de transição de fratura frágil para fratura dúctil (brittle fracture transition temperature) além de redução na resistência a fratura para temperaturas acima da faixa de transição. Portanto bocais e outras

descontinuidades estruturais em vasos de pressão ferríticos não devem ser colocados em regiões de alto fluxo neutrônico; (b) Efeitos de Corrosão e Erosão - No caso do material ser suscetível de sofrer corrosão, erosão, abrasão mecânica ou outro efeito que resulte em uma diminuição da sua espessura, tais efeitos devem ser avaliados e considerados na determinação da vida do equipamento ou estrutura. Em particular o projetista é alertado que as curvas de fadiga recomendadas pela norma não levam em conta o efeito de um ambiente corrosivo que pode acelerar a falha por fadiga.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Arnaldo H. P. Andrade, IPEN-CNEN/SP, e aos eng<sup>s</sup>. D F. Quiñones e T. H. Hardin, pelo interesse que souberam despertar para o assunto em pauta e ao colega Carlos. T. E. Aquino, EMGEPRON/SP, pela valiosa ajuda na interpretação de muitos dos seus conceitos.

## REFERÊNCIAS

[1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components", Division 1, Subsection NB, 1992 Edition

[2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI. "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plants Components", 1992 Edition

[3] Code of Federal Regulation (10CFR50) - Apêndice G do título 10

[4] "Primer: Fracture Mechanics in the Nuclear Power Industry" - E.T. Wessel. W.L. Server e E.L. Kennedy, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute, 1991. (EPRI NP-5792-SR).

[5] "Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications", T.L. Anderson, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1991, 793 pp.

[6] "A specialized Course in Leak-Before-Break (LBB) for Piping and Pressure Vessels". D.F. Quiñones e T.H. Hardin (Robert L. Cloud Assoc., Inc., Berkeley, CA, USA, Julho/92, ministrado na USP/SP, Brasil

## ABSTRACT

In this work we analyze some of the ASME Code recommendations for the Class 1 PWR Nuclear Reactor Components, i.e.: those covered by Section III and Section XI (and respective appendices) of the Division 1. This study discuss the conditions to apply the concepts of the Elastic Linear Fracture Mechanics (typical for materials like glass and ferritic steel under low temperatures or with high level of irradiation), and also of the Elastic-Plastic Fracture Mechanics (typical for materials like the austenitic steel) and their distinctions; typical collapse modes of a cracked section and the design requirements (integrity and functionality) that should be considered.