

1. Introdução

Historicamente, muitos acidentes relacionados a ou causados por falhas estruturais de componentes mecânicos motivaram pesquisas em fratura dos materiais. Com a necessidade de previsão e prevenção de falhas foi estimulada a formulação de novas abordagens para o fenômeno de fratura, em complemento ao tratamento clássico, dado pela teoria de resistência dos materiais. Assim, a Mecânica da Fratura foi proposta para caracterizar o comportamento à fratura de materiais contendo defeitos ou trincas a partir de uma propriedade mecânica, denominada tenacidade à fratura, que é definida como a resistência do material à propagação de trincas.

A tenacidade à fratura é usada em metodologias para avaliação de integridade estrutural de componentes mecânicos em geral. Com princípios da Mecânica da Fratura, foram desenvolvidos e normalizados ensaios para a determinação da tenacidade dos materiais, por meio de um único parâmetro (K , $CTOD$ ou J) que descreve os campos de tensões e deformações na ponta de uma trinca em situações de plasticidade restrita nas vizinhanças da mesma. Atualmente existem diversas normas, procedimentos e recomendações (ASTM E399[1], ASTM E1290[2], ASTM E1820[3], BS 7448[4], EFAM GTP 02[5], etc.), as quais estabelecem metodologias específicas para a obtenção desta propriedade.

Da mesma forma têm surgido procedimentos, códigos e normas de projeto para avaliação da integridade estrutural em componentes com defeito. Estes procedimentos (R6[6], API579[7], SAQ[8], SINTAP[9], BS7910[10], etc.) têm sido atualizados em suas sucessivas versões para incorporar os avanços obtidos ao longo dos anos nessa área, tornando-se uma grande fonte de melhoria na competitividade industrial. Assim, atualmente é possível utilizar uma gama ampla de procedimentos e metodologias em função ao grau de conhecimento do comportamento mecânico do material a ser analisado. A grande maioria destes procedimentos utiliza a metodologia FAD (*Failure Assessment Diagram*) para avaliar as previsões à fratura de componentes com defeito. Por sua vez, os

resultados desta análise e, conseqüentemente, as previsões feitas para a estrutura dependem fortemente das cargas aplicadas, da geometria da estrutura e/ou defeito e da tenacidade do material, a qual é calculada segundo os procedimentos já mencionados. É sabido que esses procedimentos seguem metodologias conservativas no cálculo da tenacidade devido às altas condições de restrição plástica introduzidas, com o objetivo de trabalhar do lado da segurança.

A restrição plástica é um termo utilizado para representar o grau de triaxialidade no campo de tensões na ponta do defeito, de tal forma que quanto maior o grau de restrição plástica maior é a triaxialidade. Os procedimentos de cálculo da tenacidade e avaliação da integridade estrutural consideram condições de alta restrição na ponta do defeito, o que leva a uma análise do lado da segurança. No entanto, as previsões feitas pelos procedimentos podem resultar excessivamente conservativas. Porém, existem casos onde a geometria da estrutura analisada e o tipo de carga aplicada levam a uma perda grande da restrição, conseqüentemente a um aumento da tenacidade do material em aplicações reais.

Este trabalho analisa as principais normas de cálculo da tenacidade, as diversas condições de restrição impostas nesses procedimentos, a influência destas condições no valor da tenacidade e nas previsões feitas pelas principais normas de avaliação da integridade estrutural de componentes com defeito.

1.1. Objetivos

Os principais objetivos desta tese são:

- Identificar as principais condições impostas nos procedimentos de cálculo de tenacidade e os principais fatores que influem no cálculo desta propriedade.
- Avaliar o conservadorismo no cálculo da tenacidade por meio dos procedimentos convencionais.
- Avaliar o conservadorismo nas predições dos procedimentos de avaliação da Integridade Estrutural em componentes com defeito.

1.2. Revisão bibliográfica

Os principais documentos de referencia utilizados neste trabalho são:

ASTM E399-08[1]: Norma americana que cobre a medição de K_{IC} em materiais metálicos, usando CPs entalhados e pré-trincados por fadiga que são carregados lentamente para gerar um registro de carga vs. deslocamento. K_{IC} é calculado por meio de equações baseadas na análise elástica de tensões dos CPs.

ASTM E1290-02[2]: Norma similar à anterior, mas considerando o parâmetro elastoplástico CTOD (*crack tip opening displacement*). Os valores de CTOD podem corresponder ao início da propagação instável frágil, após uma insignificante propagação estável; início da propagação instável frágil, com uma previa propagação estável da trinca; ou carga máxima, acompanhado de comportamento totalmente plástico.

ASTM E1820-01[3]: Norma que tenta unificar as anteriores, estabelece procedimentos para determinar parâmetros como K_{IC} , CTOD, J e curvas de resistência R, onde, analogamente aos procedimentos anteriores, um CP pré-trincado é carregado para induzir propagação instável ou estável de trinca.

BS7448 - Parte 1:91[4]: Norma britânica, similar às americanas, para quantificar a tenacidade em materiais metálicos, partindo (também) de uma pré-trinca de fadiga que é propagada em diferentes tipos de corpos de prova sob uma força monotônica crescente. O registro força vs. deslocamento é obtido para definir um ponto crítico na curva, e quando os critérios de validade especificados são cumpridos, o ponto é usado para determinar a tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC}). Quando ocorre o contrário, o ponto é usado para determinar CTOD crítico, J crítico, ou ambos.

EFAM GTP 02[5]: Procedimento para determinar os parâmetros K, CTOD, J em materiais metálicos para diferentes tipos de CP pré-trincados por fadiga. Estes parâmetros são definidos também para extensão estável e instável da trinca.

Tagawa T. et al.[11] discutem as diferenças entre o cálculo do CTOD segundo a norma britânica (BS 7448-Parte 1:91) e americana (ASTM E1290-02).

A partir da medição dos valores de CTOD em 36 diferentes tipos de aços estruturais, os autores concluíram que o $CTOD_{ASTM}$ é geralmente menor do que o $CTOD_{BS}$, em alguns casos em até 60%.

Martins I.P.[12] analisou dois aços HSLA DH-36, que foram ensaiados à temperatura ambiente utilizando o método da flexibilidade. Curvas de resistência (J_R e $CTOD_R$) foram obtidas, assim como valores de tenacidade de iniciação segundo as normas BS 7448-4 e ASTM 1820. Os resultados demonstraram que as curvas J_R obtidas por ambas as normas são semelhantes. As curvas $CTOD_R$, porém, apresentam diferença significativa, com a BS fornecendo maiores valores de CTOD em relação à ASTM. A magnitude da diferença dos valores de CTOD entre as normas também depende do material ensaiado. Os valores de iniciação também apresentaram discrepância entre as normas estudadas.

De Souza Francisco[13] mostra a influência da geometria do CP na avaliação da tenacidade à fratura utilizando CPs SE(T) em aços API 5LX70. Curvas de resistência J_R foram obtidas utilizando a metodologia de flexibilidade. Foram ensaiados CPs com trincas rasas ($a/W = 0,2$) e profundas ($a/W = 0,5$) e razão $W/B = 2,5$ e 1. Dos resultados observou-se que, independente do tamanho de trinca inicial adotado, não existem diferenças significativas nas curvas J_R .

Haag J. et al. [14] estuda a influência da restrição plástica na ponta da trinca entre os CPs do tipo SE(B) e SE(T). Testes de tenacidade à fratura (CTOD e J) foram feitos para avaliar o campo de tensões na ponta da trinca e quantificar a tenacidade em ambos os casos. Observou-se uma maior tenacidade nos CPs SE(T) em comparação aos SE(B), a diferença chegou a 48% nos valores de CTOD e 29% na Integral J.

Cravero S.[15] apresenta um procedimento para medição de curvas de resistência J_R em CPs do tipo SE(T) usando o método da flexibilidade e o método η . Análises numéricas em 3D permitem a determinação da flexibilidade adimensional, μ , e fatores η_I e γ para uma grande faixa de proporções geométricas e propriedades de material características de aços estruturais (definir suas variáveis). Testes em um aço API 5LX60 usando CPs SE(T) carregados com pinos fornecem os dados de carga e deslocamento necessários para validar o procedimento para determinar curvas de resistência do material.

Flores W.D. et al.[16] avalia a influência da geometria do CP na tenacidade à fratura. Curvas de resistência J_R foram levantadas em um aço API 5LX70 para três tipos de geometria: C(T), SE(B) e SE(T). Os resultados mostraram que o CP SE(T) suporta níveis de carregamento significativamente maiores e maior crescimento estável de trinca, fornecendo valores de tenacidade à fratura mais elevados, sugerindo que tal geometria induz mais baixo nível de restrição plástica na ponta da trinca e, conseqüentemente, valores de tenacidade menos conservadores.

Piovatto R.R.[17] discute o desenvolvimento das três principais técnicas de medição da curva J_R (flexibilidade elástica, queda de potencial elétrico e normalização linear de carga) em CPs do tipo SE(T) para o aço API 5LX60. Foram testados CPs com trincas rasas ($a/W = 0,2$) e profundas ($a/W = 0,5$). Este estudo permitiu observar a iniciação da propagação dúctil e discutir os limites das metodologias aplicadas. Os resultados mostraram que a técnica de normalização linear da carga possibilitou o menor tempo de preparação e execução do ensaio, por não precisar da realização de descarregamentos. A variação da flexibilidade elástica mostrou-se também como uma técnica rápida e confiável, e não sofreu alterações devido às delaminações. Já a técnica de queda de potencial elétrico mostrou-se a mais consistente para o caso de $a/W = 0,5$, porém no caso de trincas rasas, a plasticidade desenvolvida na frente da trinca influencia nas medições causando imprecisões.

Moreira F.C. et al.[18] apresenta o cálculo experimental das curvas de resistência J_R utilizando CPs SE(T) carregados por garras e pinos com a mesma profundidade inicial de trinca em um aço estrutural AISI 1020. O método usado é de flexibilidade elástica em conjunto com modelos de elementos finitos. Os resultados mostraram grande sensibilidade dos fatores adimensionais η , γ e m (cálculo de J) ao tipo de aplicação do carregamento (garra ou pino), geometria e material, sendo que algumas variações chegaram a $\approx 225\%$.

Joyce J.A. et al.[19] avalia a influência da restrição plástica nas curvas J_R de um aço estrutural de alta resistência. Avaliou-se a perda de restrição através de 27 testes considerando: a geometria do corpo de prova e a natureza da aplicação de carga (SE(B), SE(T) e DE(T)), a variação da espessura dos CPs e o tamanho de

trinca ($0,10 \leq a/W \leq 0,65$). Os resultados mostraram maior valor da tenacidade para CPs com trincas rasas do que para trincas profundas no CP SE(B), mas não uma sensibilidade nos valores do CP SE(T). Valores de tenacidade significativamente maiores foram registrados em CPs SE(T) em comparação aos SE(B) para as mesmas condições de tamanho de trinca e espessura.

Ramos K.A.M.[20] apresenta uma comparação entre as previsões de fratura de dois dos principais procedimentos para avaliação de adequação ao uso de equipamentos trincados (API-579 e BS-7910), no caso de um cilindro contendo uma trinca próxima a um cordão de solda, com e sem tratamento térmico. Foram comparados ambos os resultados aplicando o nível 2 da metodologia do diagrama de análise de falha (FAD). Concluiu-se nesta comparação que a diferença média entre os comprimentos críticos em função da profundidade de trinca é da ordem de 23%, ou seja, o documento BS 7910 gera resultados mais conservativos que o API-579. Observou-se também que a BS-7910 apresenta uma sequência de utilização mais amigável ao usuário que está iniciando este tipo de análise.

González S.C.[21] realiza uma análise aprofundada da perda de restrição plástica em componente estruturais, suas principais causas, a repercussão na avaliação da integridade estrutural e a interação entre elas. As principais fontes de redução da restrição plástica mencionadas no trabalho são: espessura fina, carregamento de tração, defeitos superficiais e defeitos com raio finito (entalhes). Assim propõe-se um modelo de avaliação global de componentes estruturais com defeitos em condições de baixa restrição plástica, de tal forma que eles possam ser avaliados de uma forma satisfatória a partir do conhecimento da realidade física do problema de um componente com entalhes superficiais submetido a cargas de tração. Finalmente é conduzida uma série de ensaios com o objetivo de validar o método e validar os resultados do modelo.

1.3.Conteúdo da tese

O conteúdo da tese é apresentado da seguinte maneira:

No capítulo 1 apresenta-se uma breve descrição das principais referências que serviram de guia e motivação na realização deste trabalho.

No capítulo 2 são revistos os conceitos básicos da Mecânica da Fratura.

No capítulo 3 apresenta-se uma revisão dos principais procedimentos que avaliam a tenacidade à fratura em materiais metálicos. Também são mencionadas algumas diferenças e comentários importantes a respeito.

No capítulo 4 são revistos os conceitos básicos da Integridade Estrutural, assim como uma revisão, descrição e guia de uso dos principais procedimentos para avaliação da Integridade Estrutural de componentes trincados (FFS).

No capítulo 5 é apresentado um relatório de testes de caracterização do material analisado, assim como a simulação numérica destes ensaios.

No capítulo 6 apresentam-se as previsões das principais normas FFS para uma placa trincada superficialmente e a sua correspondente validação por meio de testes de laboratório.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões e recomendações do trabalho.