

PROCEDIMENTO FAD PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS SOLDADAS INCLUINDO EFEITOS DE DISSIMILARIDADE MECÂNICA. PARTE I: METODOLOGIA MICROMECAÂNICA¹

Gustavo Henrique. B. Donato²
Claudio Ruggieri³

Resumo

Procedimentos ECA baseados na filosofia FAD têm larga aplicação prática na avaliação de estruturas de grande responsabilidade como vasos de pressão e tubulações de óleo e gás contendo trincas. Porém, sua utilização em componentes soldados com heterogeneidades entre as propriedades dos metais de base e adição (situação usualmente denominada *weld strength mismatch*) permanece uma questão em aberto. O *mismatch* altera os campos de tensões, as forças motrizes de trinca (p. ex.: J e CTOD) e também as cargas de colapso plástico dos componentes, complicando a interação entre fratura e instabilidade plástica precedente à falha. Visando reduzir as limitações dos procedimentos atuais, este trabalho apresenta o arcabouço conceitual de uma metodologia FAD adaptada baseada em critérios micromecânicos incorporando os efeitos de *mismatch* na determinação de forças motrizes de trincas e também cargas limite determinadas numericamente para estruturas dissimilares. Tal ferramenta surge como protótipo para procedimentos de avaliação de juntas dissimilares.

Palavras-chave: Integridade estrutural; Juntas soldadas; Juntas dissimilares; Metodologia FAD.

FAD PROCEDURE FOR WELDED STRUCTURES EVALUATION INCLUDING EFFECTS OF WELD STRENGTH MISMATCH. PART I: MICROMECHANICS APPROACH

Abstract

FAD-based ECA procedures are usually applied for assessing high responsibility structures like pressure vessels and pipelines containing defects. However, its application to welded mismatched components remains a potential open issue. Mismatch may significantly alter stress fields, crack-tip driving forces (e.g. J and CTOD) and plastic collapse loads, thereby complicating integrity assessments of welded regions. As an effort to reduce current procedures limitations, this paper presents the conceptual background of an adapted micromechanics-based FAD methodology which incorporates mismatch effects on crack driving forces evaluation and on limit loads estimation schemes. This methodology emerges as a prototype of procedures for assessing dissimilar welded joints.

Key words: Structural integrity; Welded joints; Mismatched joints; FAD methodology.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Professor Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, gdonato@fei.edu.br

³ Prof. Livre Docente do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, claudio.ruggieri@poli.usp.br

1 INTRODUÇÃO

As estruturas atuais exigem níveis de segurança e confiabilidade operacionais cada vez mais elevados, objetivando redução de custos, aumento de eficiência operacional, otimização de vida útil e, mais importante, a eliminação de acidentes causadores de danos ambientais, prejuízos financeiros e riscos à população. Dentro deste contexto de segurança e otimização operacional, o estudo da resistência à fratura de juntas soldadas representa um componente-chave na avaliação de integridade estrutural, já que a presença de soldas acaba por ampliar a complexidade das práticas de projeto e avaliação. Tal constatação é especialmente importante quando se trata de estruturas de grande responsabilidade como vasos de pressão e sistemas dutoviários, incluindo facilidades *onshore* e *offshore*.

Observações experimentais⁽¹⁻⁴⁾ revelam a ocorrência freqüente de defeitos na forma de trincas em juntas soldadas (p.ex., falta de penetração, trincamento a quente ou a frio, mordeduras, formação de trincas por hidrogênio, trincas oriundas de corrosão sob tensão, etc.). Os códigos correntes voltados ao projeto e fabricação de dutos para transporte de óleo e gás fornecem rigorosas regras para soldagem, inspeção e testes de linhas de transmissão (p.ex., API 1104⁽⁵⁾ e CSA Z662⁽⁶⁾), e estabelecem critérios simplificados de aceitação de defeitos de fabricação baseados em ensaios de mecânica da fratura, qualificação de mão de obra e controle dos procedimentos de soldagem. Tais códigos, porém, não incorporam procedimentos específicos do tipo “*fitness-for-service*” (FFS) para avaliação de trincas de fabricação, instalação ou mesmo operação em regiões de solda. Frente a tais limitações e para que sejam amenizados os potenciais efeitos deletérios dos defeitos presentes em soldas sobre a integridade dos componentes, é exigida por tais procedimentos a confecção das juntas em condição *overmatch* (metal de adição com resistência mecânica mais elevada que o metal de base). A motivação para tal reside no fato de os metais de solda com maior resistência mecânica desviarem as deformações plásticas para o metal de base, no qual são esperados menos defeitos, melhor controle microestrutural e melhor comportamento à fratura,⁽⁷⁾ amplificando, portanto, a capacidade de carga global da estrutura.

Para que, neste cenário, possa ser avaliada a integridade de componentes trincados de forma objetiva, são aplicados procedimentos ECA (*Engineering Critical Assessment*) baseados em mecânica da fratura.⁽⁸⁾ Procedimentos desta natureza utilizam-se de diagramas FAD (*Failure Assessment Diagrams*) e têm como característica-chave a capacidade de quantificar a interação entre fratura frágil por clivagem e colapso plástico como mecanismos competidores para a ocorrência de falha estrutural. (p.ex.: R6,⁽⁹⁾ BS7910,⁽¹⁰⁾ SINTAP,⁽¹¹⁾ API 579⁽¹²⁾ e o Código ASME Seção XI.⁽¹³⁾ Contudo, a aplicação precisa de tais procedimentos na avaliação de defeitos em componentes estruturais soldados com heterogeneidades de propriedades mecânicas (e possivelmente também de encruamento) entre metal de solda (MS) e metal de base (MB) permanece como uma questão em aberto.

Embora o uso de *overmatch* seja mecanicamente positivo, acaba por invalidar a direta aplicação dos procedimentos atuais de FAD. A presença de juntas soldadas por si só representa inerentes prejuízos à tenacidade à fratura e controle microestrutural, invalidando procedimentos desenvolvidos para materiais homogêneos. Adicionalmente, a presença de propriedades mecânicas dissimilares em juntas soldadas (condição denominada *weld strength mismatch*) altera os campos de tensões nas proximidades da trinca, alterando as forças motrizes de trinca (tais como J e CTOD) e cargas de colapso plástico para um determinado carregamento remoto. A Figura 1 ilustra, a título de exemplo, as severas alterações

no tamanho da zona de processo de fratura (definida pelo lócus $\sigma_1 \geq \lambda \sigma_{ys}$ com $\lambda \approx 2$) oriundas de diferentes condições de *mismatch* em espécime SE(B) com trinca no centro do cordão de solda e mesmo carregamento normalizado (em termos de integral J). Aqui, σ_1 representa tensão máxima principal, o nível de *mismatch* é denominado M_L (definido como *Mismatch Level*, $M_L = \sigma_{ys}^{MS} / \sigma_{ys}^{MB}$), e σ_{ys}^k representa a tensão de escoamento do material k (metal de base – MB, ou metal de solda – MS). Nota-se a severa redução da zona de processo de fratura com o aumento do *mismatch*, fruto do já mencionado desvio de deformações plásticas.

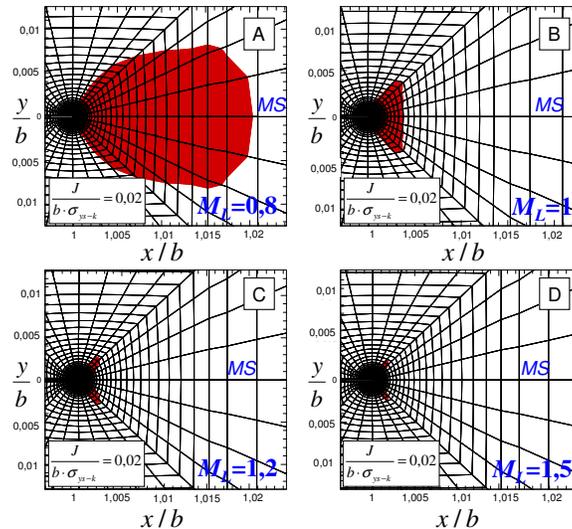


Figura 1: Zona de processo de fratura (definida pelo lócus $\sigma_1 \geq \lambda \sigma_{ys}$ com $\lambda \approx 2$) em espécimes SE(B) com trinca posicionada no centro do cordão de solda e diferentes níveis de dissimilaridade mecânica. Aqui, k indica o material no qual está imersa a trinca e b o ligamento remanescente da trinca.

É neste contexto que o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia FAD baseada em critérios micromecânicos que incorpora os efeitos da presença de heterogeneidades mecânicas sobre forças motrizes de trinca. Para tal, são inicialmente introduzidos a metodologia FAD, a tensão de Weibull (σ_w) como parâmetro local de fratura e a possibilidade de descrição micromecânica dos efeitos de dissimilaridade. Com base em tal arcabouço, é proposto um modelo correlativo para correção de tenacidade à fratura de componentes soldados com diferentes níveis de dissimilaridade. Adicionalmente, são apresentados os procedimentos computacionais para a determinação de cargas limite de juntas dissimilares. As propostas são incorporadas a diagramas correntes do tipo FAD, configurando um protótipo para procedimentos de avaliação de soldas incorporando os efeitos da dissimilaridade na resposta mecânica dos componentes, assim como considerações probabilísticas no que tange à natureza randômica da resistência à fratura.

2 METODOLOGIA FAD

Fratura frágil e colapso plástico oriundo de sobrecarga são modos reconhecidamente competidores no processo de falha estrutural. Dowling e Townley⁽¹⁴⁾ e Harrison, Loosemore e Milne⁽¹⁵⁾ introduziram o conceito de um

diagrama de avaliação de falhas baseado em dois critérios (mais freqüentemente referido como FAD) para descrever a integridade mecânica de componentes trincados considerando ambos os mecanismos. Um diagrama FAD esquemático é apresentado pela Figura 2.

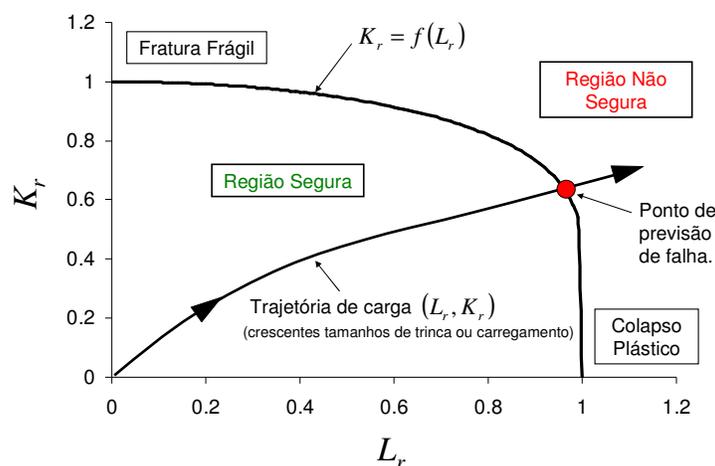


Figura 2. Ilustração esquemática da metodologia FAD.

Basicamente, na metodologia FAD convencional,⁽⁸⁾ uma linha de falha independente de geometria e propriedades de material é construída baseando-se na relação entre carregamento normalizado na ponta da trinca, K_r , e o carregamento (remoto) normalizado aplicado, L_r , na forma $K_r = f(L_r)$, onde os pontos de avaliação (ou trajetória de carga – vide Fig. 2) são definidos como

$$K_r = \frac{K_I(P, a)}{K_{mat}} \quad \text{e} \quad L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} \quad . \quad (1)$$

Aqui P representa a carga (remota) aplicada, a define o tamanho da trinca, K_I quantifica a força motriz de trinca linear elástica, K_{mat} representa a tenacidade à fratura do material, σ_{ys} é a tensão de escoamento e σ_{ref} representa uma tensão de referência ligada ao colapso plástico do ligamento remanescente da trinca. A avaliação de integridade estrutural de componentes trincados é baseada na posição relativa do ponto de avaliação descrito (L_r, K_r) em relação à curva FAD. O componente é simplesmente considerado seguro se o ponto de avaliação se encontra dentro (abaixo) da curva, ao passo que é considerado potencialmente inseguro se o ponto se encontra sobre ou acima da mesma. Adicionalmente, pontos de avaliação mais próximos da abscissa têm a falha governada por colapso plástico, enquanto no caso inverso a falha é predominantemente frágil.

Os procedimentos de maior cultura atual de aplicação são BS 7910⁽¹⁰⁾ e API 579.⁽¹²⁾ Ambos os procedimentos emergiram como códigos de engenharia largamente aplicados para avaliação de defeitos e incorporam três níveis de avaliação, caracterizados pela crescente sofisticação analítica e exigência em termos de dados. Os níveis de avaliação usuais e de maior cultura de aplicação

prática são o nível 2A da BS7910 e o nível 2 da API 579, os quais são equivalentes em sua formulação básica e se utilizam da curva FAD na forma

$$K_r = \left[1 - 0,14(L_r)^2 \right] \cdot \left\{ 0,3 + 0,7 \exp[-0,65(L_r)^6] \right\}, \quad L_r \leq L_r^{m\acute{a}x} \quad (2)$$

onde o parâmetro de corte, $L_r^{m\acute{a}x}$, reflete um critério simplificado para prevenir colapso plástico localizado, ao mesmo tempo em que considera o efeito do encruamento pós escoamento observado em aços carbono ferríticos e aços inoxidáveis austeníticos.

3 DESCRIÇÃO MICROMECAÂNICA DOS EFEITOS DE DISSIMILARIDADE UTILIZANDO A TENSÃO DE WEIBULL

Os procedimentos de FAD descritos empregam dados de tenacidade obtidos de espécimes em flexão com trinca profunda, garantindo elevada triaxialidade ao longo do processo de fratura e fazendo com que o lócus apresentado pela Fig. 2 forneça resultados independentes da geometria para materiais homogêneos. Para juntas soldadas dissimilares, porém, os mesmos procedimentos recomendam abordagens simplificadas (muitas vezes considerando as propriedades do material menos resistente da junta),^(10,12) as quais podem incorrer em excessivo conservadorismo (por desconsiderar a maior capacidade de carga da estrutura com *overmatch*) ou mesmo anti-conservadorismo (no caso do aparecimento de alterações microestruturais deletérias à tenacidade da junta), representando risco à segurança. Como um passo na direção de reduzir tais limitações, o presente trabalho propõe uma descrição micromecânica da presença de dissimilaridade sobre a tenacidade à fratura, com foco na fratura frágil transgranular por clivagem controlada por tensão. Para acoplar o microregime de fratura (o qual inclui um critério local de falha e as tensões que se desenvolvem à frente da trinca) com o carregamento macroscópico remoto (tal como a integral J), é adotada a tensão de Weibull corrigida por deformação plástica,⁽¹⁶⁾ σ_w , a qual é dada pela integração das tensões principais locais sobre a zona de processo de fratura na forma

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \int_{\Omega} \varepsilon_p \sigma_1^m d\Omega \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (3)$$

onde V_0 representa um volume de referência (usualmente tomado como unitário), ε_p representa a deformação plástica efetiva (a qual corrige a tensão de Weibull para o aumento da densidade de microdefeitos à frente da trinca com a evolução da plasticidade), σ_1 é a tensão máxima principal agindo nos pontos materiais à frente da trinca, Ω denota o volume da zona de processo de fratura nas proximidades da trinca (definida pelo lócus $\sigma_1 \geq \lambda \sigma_{ys}$ com $\lambda \approx 2$) e o parâmetro m (módulo de Weibull) define a natureza randômica da resistência à fratura em nível micromecânico.

A tensão de Weibull representa, portanto, um parâmetro local capaz de descrever tanto o volume submetido à tensão (zona de processo de fratura) como as severas alterações nos campos de tensão à frente da trinca devido aos efeitos do

mismatch. Adicionalmente, a apropriada calibração do módulo de Weibull m para os materiais em estudo, permite a descrição dos efeitos oriundos de alterações microestruturais por meio da avaliação da tensão de Weibull em soldas dissimilares. Tais características permitem estender o modelo de escala proposto por Ruggieri e Dodds⁽¹⁷⁾ para avaliar também o efeito de *weld mismatch* sobre a tenacidade à fratura por clivagem. A questão-chave de tal metodologia consiste na interpretação de σ_w como uma força motriz de trinca, acoplada ao simples axioma de que a fratura por clivagem ocorre quando σ_w atinge um valor crítico $\sigma_{w,c}$. Para uma mesma condição de material base e de temperatura, o modelo de escala relaciona um valor específico de σ_w à ativação da fratura por clivagem para diferentes configurações soldadas trincadas com diferentes níveis de *mismatch*, mesmo que os parâmetros de carregamento (tais como J e CTOD) variem largamente devido às diferentes soldas dissimilares.

A Figura 3 ilustra, de forma genérica, a metodologia de avaliação do efeito de *mismatch* no comportamento à fratura por clivagem e como se aplica o modelo de escala para valores de tenacidade entre configurações trincadas com diferentes condições de *mismatch*. A descrição do modelo é elaborada baseando-se em integral J como medida de carregamento remoto, mas permanece estritamente válida para outros parâmetros (p. ex.: CTOD). Sem perda de generalidade, a referida figura apresenta trajetórias normalizadas de σ_w vs. J para uma condição de elevada triaxialidade de tensões (como um espécime SE(B) com trinca profunda) constituído de material homogêneo, denominado configuração A, e para um componente estrutural soldado (como uma placa sob tração com trinca superficial na solda), denominada configuração B.

Modelos altamente refinados de elementos finitos (utilizando-se de formulação de grandes deformações) fornecem a relação funcional entre a tensão de Weibull normalizada pela tensão de escoamento (σ_w/σ_{ys}^k) e carregamento aplicado (J) normalizado por $b \cdot \sigma_{ys}^k$ para um valor específico do módulo de Weibull, m_k , para cada material. Aqui, b representa o ligamento remanescente da trinca de cada geometria. Dessa maneira, de posse de um valor crítico de tenacidade à fratura (e.g. J_c^A) para o espécime de metal base, um mesmo nível de $\bar{\sigma}_w$ normalizada permite a determinação do valor correspondente J_c^B para o componente soldado de diferentes geometria, triaxialidade e *mismatch* (a Figura 3 ilustra tal técnica por meio de linhas tracejadas). Por conveniência, define-se um parâmetro β como a razão entre as tenacidades das configurações respectivamente B e A, na forma

$$\beta(M_L, m) = \frac{J_c^B}{J_c^A}. \quad (4)$$

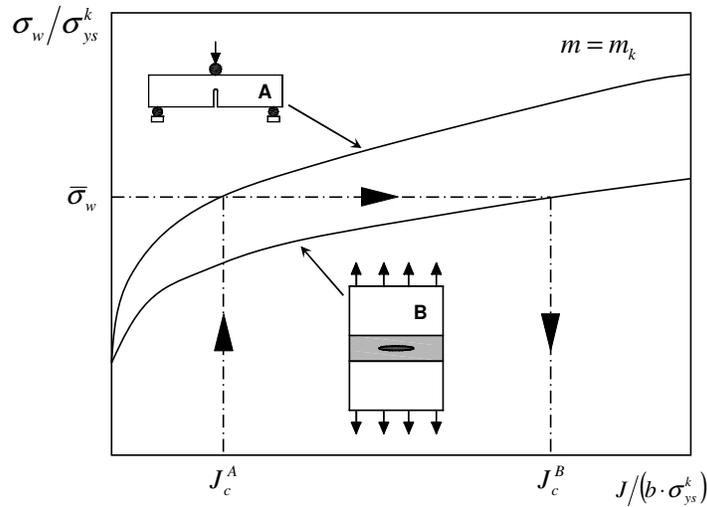


Figura 3. Modelo de escala baseado em tensão de Weibull para corrigir valores de tenacidade para diferentes condições de trinca, carregamento e de *mismatch*.

Neste momento, o passo-chave para o desenvolvimento de uma metodologia FAD baseada em critérios micromecânicos é a incorporação do efeito de *weld mismatch* na trajetória de carga caracterizando pontos de avaliação (Figura 2) dependentes da condição de *mismatch*. Fazendo uso então do modelo de transferabilidade baseado em tensão de Weibull proposto, a variação de tenacidade à fratura (caracterizada por exemplo pela integral J) é quantificada na forma

$$J_{MS} = J_{MB} \cdot \beta(M_L, m) \quad (5)$$

onde J_{MS} e J_{MB} representam a integral J do componente com solda dissimilar e do componente constituído de metal base (ou condição *evenmatch*), respectivamente. Assim, a razão de tenacidades descrita pela Eq. (5) permite redefinir o termo K_r dos pontos de avaliação no FAD (definido em termos de integral J , já que $K_r = \sqrt{J_r}$) na forma

$$K_r = \sqrt{\frac{J}{J_{mat}}} = \sqrt{\frac{J}{J_{MS}}} = \sqrt{\frac{J}{J_{MB} \cdot \beta(M_L, m)}} \quad (6)$$

onde a força motriz de trinca aplicada ao componente é descrita pela integral J e J_{MS} representa a correspondente tenacidade à fratura já corrigida para os efeitos da presença de uma junta soldada com *mismatch*. Tal abordagem é equivalente à retenção da formulação original de K_r (também caracterizada pela condição *evenmatch* no presente contexto), porém corrigida de um fator $\beta(M_L, m)$.

3.1 Calibração do Módulo de Weibull, m

A determinação acurada de σ_w (a qual suporta o modelo de transferabilidade de tenacidades aqui proposto) depende fortemente da calibração experimental do módulo de Weibull, m . Como exemplo, a Figura 4(a) ilustra trajetórias normalizadas

(obtidas numericamente) de σ_w vs. J para um mesmo espécime SE(B) com cordão de solda de largura $h=10$ mm e em condição 10% *overmatch* para diferentes valores de m . Tal dependência é bastante marcante e reflete na grande variação dos fatores de escala β correspondentes como mostrado pela Figura 4(b). Isto faz com que, dependendo da caracterização dos microdefeitos por parte de m , os valores previstos para a tenacidade da junta soldada podem ser maiores ou menores em relação ao metal de base (Figura 4(b) – na qual, a manutenção da tenacidade é prevista para $m \approx 10,7$). Para aplicações de engenharia da metodologia FAD aqui proposta, tais valores de m devem ser previamente calibrados e disponibilizados ao analista na forma de compêndios (tabulares ou funcionais) definidos em termos do nível de *mismatch*, M_L .

Na seqüência são descritos alguns passos que sumarizam os procedimentos essenciais para a calibração de m e geração de tais compêndios de resultados para o caso de *mismatch*. A abordagem desenvolvida é suportada por estratégias de calibração introduzidas para materiais homogêneos por Gao, Zhang e Srivatsan⁽¹⁶⁾ e Ruggieri e Dodds,⁽¹⁷⁾ as quais podem ser utilizadas em suas formas originais para a prévia calibração de m para o metal de base.

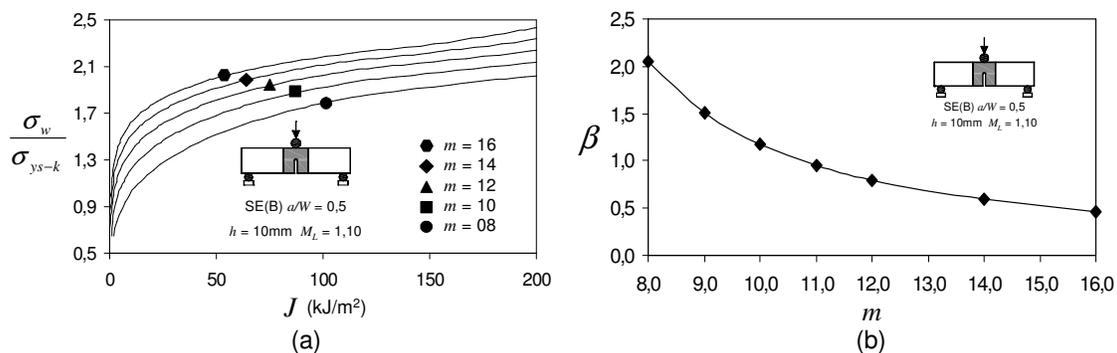


Figura 4. (a) Evolução das trajetórias σ_w vs. J para espécimes SE(B)s bi-materiais com 10% de *overmatch* e diversos valores de m . (b) Parâmetros $\beta(M_L, m)$. Considera-se MB com 412 MPa de tensão de escoamento, encruamento $n = 10$ e módulo de Weibull $m = 10$ típico de aços estruturais ferríticos.

3.1.1 Passo 1

Ensaia dois grupos de espécimes de mecânica da fratura com diferentes condições de *mismatch* (condições A e B) na zona de transição dúctil-frágil a fim de gerar duas distribuições de dados de tenacidade à fratura. Idealmente, a configuração A deve corresponder a um espécime constituído de metal base (MB) ou em condição *evenmatch* ($M_L = 1$). Determinar então os valores médios (J_0^A e J_0^B) para cada grupo de resultados, utilizando, por exemplo, o procedimento da curva mestra dado pela ASTM E1921.⁽¹⁸⁾ Não é desejável a ocorrência de crescimento dúctil precedente à fratura por clivagem em ambas as amostras. Caso se revele limitado crescimento dúctil em alguns espécimes, os respectivos valores podem ser tratados como valores censurados (ASTM E1921).

3.1.2 Passo 2

Conduzir análises refinadas tridimensionais (3-D) de elementos finitos para ambas as geometrias ensaiadas. O

refinamento das malhas deve ser tal que garanta a convergência dos valores de σ_w e J para os níveis de carregamento e faixas de valores de m esperados.

3.1.3 Passo 3

- Assumir valores iniciais de m . Computar as trajetórias σ_w/σ_{ys}^k vs. $J/b \cdot \sigma_{ys}^k$ para ambas as configurações A e B a fim de caracterizar o modelo de transferabilidade.
- Corrigir J_0^A conhecido para seu equivalente $J_{0,m}^B$ (como descrito pela Figura 3 para um valor assumido de m) de acordo com o efeito da presença de *mismatch*. Definir então o erro incorrido pelo modelo de escala como $R(m) = (J_{0,m}^B - J_0^B)/J_0^B$. Caso $R(m) \neq 0$, repetir a e b para demais valores de m visando reduzir o erro.
- Representar graficamente $R(m)$ vs. m . O valor calibrado do módulo de Weibull m conduz a $R(m) = 0$ dentro de uma pequena tolerância.

4 DETERMINAÇÃO DE CARGAS LIMITE PARA JUNTAS DISSIMILARES

Carga limite global é usualmente definida como um nível de carregamento no qual os deslocamentos se tornam irrestritos,⁽¹⁹⁾ ou seja, rapidamente crescentes mesmo frente à pequenos ou inexistentes incrementos nos níveis de carga aplicados. Uma estrutura nesta condição é tida como em sua condição de máxima capacidade de carga (ou iminência de falha por colapso plástico).⁽⁸⁾ No caso de estruturas com defeitos na forma de trincas, porém, a situação se torna sensivelmente mais delicada já que pode ser caracterizada uma condição de carga limite local. Esta condição é definida em termos da instabilidade local do ligamento remanescente à frente da trinca ou defeito, ou seja, a carga limite (ou tensão limite) é definida quando todo o ligamento remanescente ultrapassa uma tensão tomada como referência (usualmente σ_{ys} , já que na grande maioria dos procedimentos se considera material elástico-perfeitamente plástico).^(8,10,12)

Estão disponíveis na literatura diversos compêndios de soluções para cargas limite aplicáveis a materiais homogêneos.⁽¹⁰⁻¹²⁾ Contudo, ainda se fazem presentes algumas limitações, como a consideração de modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico e a divergência na definição de carga limite para componentes com *weld mismatch*. Nestes, a evolução da plasticidade nas proximidades do defeito depende da configuração da trinca e do nível de *mismatch*. Assim, o presente trabalho propõe a utilização do método dos elementos finitos para definir cargas limites em termos da instabilidade local do ligamento remanescente à frente da trinca das estruturas em análise. Os modelos devem incorporar a resposta tensão-deformação elasto-plástica dos metais de base e de adição, desta forma incorporando o efeito do *mismatch* sobre a carga limite. O atingimento da tensão limite $\sigma_{c,t}$ é definido quando a tensão equivalente de von Mises, σ_e , atinge uma tensão de referência (podendo esta ser $\sigma_{flow} = (\sigma_{ys} + \sigma_{uts})/2$ para parcial consideração da plasticidade ou a própria tensão limite de resistência σ_{uts} para total consideração da contribuição da plasticidade para o aumento da capacidade de carga), ao longo de todo o ligamento. Assim, a definição da abscissa dos diagramas FAD (L_r) originalmente descrita pela Eq. (1) tem seu denominador original σ_{ys}

substituído pelo valor numericamente corrigido para juntas dissimilares $\sigma_{c,t}$, na forma

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_{c,t}}. \quad (7)$$

Desta maneira, ambos os parâmetros descritores do ponto de avaliação segundo diagramas FAD (K_r e L_r) encontram-se corrigidos para os efeitos do *mismatch* sobre a determinação de tenacidade à fratura e também de cargas limite (Equações 6 e 7). Esta metodologia FAD adaptada representa, portanto, um protótipo para potenciais procedimentos de avaliação de juntas soldadas dissimilares. Reduz-se a necessidade de ensaios experimentais onerosos (tanto de componentes em escala real como de espécimes soldados), ao mesmo tempo em que as soldas com *mismatch* são consideradas para a estimação de tenacidade e também da resposta mecânica dos componentes, tendendo a reduzir os desvios de previsão de falha estrutural. Uma aplicação exploratória da metodologia desenvolvida é apresentada no artigo de mesmo nome em sua parte II (experimentos e aplicação).

5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- é sensível a influência do nível de *mismatch* sobre os campos de tensões e sobre a criticidade de defeitos presentes em estruturas dissimilares;
- a tensão de Weibull, σ_w , permite a descrição micromecânica do efeito do *mismatch* sobre a tenacidade à fratura de juntas soldadas, suportando o modelo de transferibilidade proposto e a correção do parâmetro K_r ;
- a calibração do módulo de Weibull, m , mostra-se de grande importância para a acurácia da metodologia já que caracteriza a distribuição de microdefeitos;
- a determinação numérica de cargas limite permite um grau adicional de precisão ao corrigir a parcela de colapso plástico L_r ; e
- ambas as contribuições incorporadas a diagramas de FAD convencionais servem de protótipo para uma ampla classe de avaliações de integridade de componentes soldados.

Agradecimento

Investigação patrocinada pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Estado de São Paulo – FAPESP (Temático 03/02735-6 e Bolsa de Doutorado No. 04/15719-1).

REFERÊNCIAS

- 1 American Welding Society, 1987, “Welding Handbook: Welding Technology”, Eighth Edition, Vol. 1, Miami.
- 2 National Energy Boarding, 1996, “Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines”, Report MH-2-95, Calgary.
- 3 Glover, A. G., Hauser, D. and Metzbower, E. A., “Failure of Weldments” in Metals Handbook, Vol. 8, 1986.

- 4 Jutla, T., "Fatigue and Fracture Control of Weldments" in ASM Handbook, Vol. 19, pp. 434-449, 1996.
- 5 American Petroleum Institute, 1999, "Welding of Pipelines and Related Facilities," API-1104, 19th Edition.
- 6 Canadian Standards Association, 1999, "Oil and Gas Pipeline Systems," CSA-Z662-99.
- 7 Denys, R. M., "*Wide-Plate Testing of Weldments: Part III – Heat-Affected Zone Wide-Plate Studies*", in Fatigue and Fracture Testing of Weldments, ASTM STP 1058, H. I. McHenry and J. M. Potter, Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, Pennsylvania, pp.204-228, 1990.
- 8 Anderson, T. L., 1995, "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications - 2nd Edition", CRC Press, Boca Raton.
- 9 British Energy, 2003, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", R6 Revision 4.
- 10 British Standard Institution, 2005, "Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures," BS7910.
- 11 SINTAP: Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry. Final Procedure, 1999.
- 12 American Petroleum Institute, 2000, "Recommended Practice for Fitness-for-Service." API RP-579.
- 13 American Society of Mechanical Engineers, 2004, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code." Section XI.
- 14 Dowling, A. R. and Townley, C. H. A., 1975, "The Effects of Defects on Structural Failure: A Two-Criteria Approach," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 3, pp. 77-107.
- 15 Harrinson, R. P., Loosemore, K. and Milne, I., 1976, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," CEGB Report R-H-R6, Central Electricity Generating Board, UK.
- 16 Gao, X., Zhang, G., Srivatsan, T.S., "Prediction of cleavage fracture in ferritic steels: a modified Weibull stress model.", in *Materials Science & Engineering*, A 394, pp. 210-219, 2005.
- 17 Ruggieri, C. and Dodds, R. H., 1996, "A Transferability Model for Brittle Fracture Including Constraint and Ductile Tearing Effects: A Probabilistic Approach," *International Journal of Fracture*, Vol. 79, pp. 309-340.
- 18 American Society for Testing and Materials, "Test Methods for the Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Region," ASTM E-1921, Philadelphia, 1998.
- 19 Chakrabarty, J., *Theory of Plasticity - 3rd Edition*, Elsevier B. V., Oxford, 2006.