

ESTUDO DOS EFEITOS SOBRE A EVOLUÇÃO DE TRINCAS PRESENTES EM JUNTAS SOLDADAS DISSIMILARES

Daniel Nicolau Lima Alves¹; Julyana Maria de Medeiros Quirino²

¹ Universidade Federal da Paraíba, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - danves@live.com

² Universidade Federal da Paraíba, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - julyanaquirino@yahoo.com.br

RESUMO

A busca pela compreensão da resposta dos materiais à presença de trincas em juntas soldadas dissimilares tem fomentado muitos estudos, entretanto ainda incipientes para plena elucidação de respostas de tenacidade à fratura decorrente da heterogeneidade presente nessas juntas. Esse tipo de conexão de componentes mecânicos é largamente utilizado na indústria mundial, em especial no setor de petróleo e gás. Sendo assim, avaliações de tenacidade à fratura tornaram-se aplicações correntes na elaboração de projetos e análises de integridade estrutural dos componentes e sistemas mecânicos. Trabalhos experimentais apresentaram significativos desvios da trinca de ensaio em relação ao plano da pré-trinca de fadiga, na direção do material mais dúctil presente nas juntas soldadas dissimilares. O presente trabalho objetiva analisar os efeitos de juntas soldadas dissimilares na propagação de trincas, onde busca-se correlacionar o comportamento direcional da trinca com os desvios do campo de tensão e deformação nestes tipos de juntas, comumente utilizadas em equipamentos offshore e em linhas de produções de petróleos e gás, de acordo com os conceitos da mecânica da fratura, possibilitando maior inteligibilidade e compreensão desse fenômeno.

Palavras-chave: desvios de trinca, juntas soldadas dissimilares, campo de tensão, campo de deformação.

1. INTRODUÇÃO

Estudos realizados nos últimos anos têm buscado compreender a resposta dos materiais à presença de trincas em juntas soldadas dissimilares, porém ainda não suficientes para desvendar o fenômeno dos efeitos de uma junta soldada heterogênea. No trabalho realizado por Kim et al. (2004), foram realizadas análises numéricas do efeito de forças atuantes de uma junta soldada dissimilar nas tensões locais para materiais perfeitamente plásticos, nestas análises foram identificados alguns parâmetros que afetam as

tensões locais: grau de dissimilaridade, M , esbeltez da solda, $(W - a) / H$, e localização da trinca dentro da solda. O estudo realizado por Donato (2008), avaliou o efeito mecânico da presença de dissimilaridade mecânica da solda (DMS), sobre os campos de tensões e forças motrizes de trinca, incorporando tais fenômenos aos procedimentos utilizados na determinação experimental de tenacidade à fratura (Integral J e CTOD). Em virtude, principalmente, do seu processo construtivo, as juntas soldadas apresentam grande complexidade mecânica e microestrutural tornando-as principais pontos suscetíveis a

falhas no corpo da estrutura. Sendo assim, percebe-se a essencial importância de uma avaliação de integridade estrutural nessas juntas, a fim de garantir uma operacionalidade segura.

Esse tipo de conexão de componentes mecânicos é largamente utilizado na indústria mundial, em especial no setor de petróleo e gás. Sua grande maioria é constituída por juntas soldadas heterogêneas, ou seja, que apresentam propriedades mecânicas, microestruturais e de fratura dos metais de base (MB) distintas dos metais de solda (MS). Tal particularidade é conhecida como dissimilaridade mecânica, a qual pode ser quantificada pelo fator M:

$$M = \frac{\sigma_{MS}}{\sigma_{MB}}$$

[1]

onde σ_{MS} e σ_{MB} representam tensão de escoamento do metal de solda MS e tensão de escoamento do metal de base MB, respectivamente. Pode-se relacionar o valor de M com undermatching ($M < 1$), evenmatching ($M = 1$) ou overmatching ($M > 1$).

Essas juntas soldadas dissimilares (JSDs) estão, quase que inevitavelmente, presentes nas grandes estruturas mecânicas da contemporaneidade industrial, como por exemplo a indústria petrolífera que, inerente

ao segmento, tem suas estruturas sujeitas às intempéries (altas solicitações mecânicas, baixas temperaturas, altas pressões, corrosão etc.) próprias das operações de exploração e produção desses combustíveis fósseis. Isso demonstra a real necessidade da utilização de avaliações da tenacidade à fratura como ferramenta imprescindível nas elaborações de projetos e análises de integridade estrutural dos componentes e sistemas mecânicos, de modo a evitar danos estruturais, econômicos, ambientais e perdas de vida, principalmente.

Este trabalho tem como objetivo estudar o fenômeno do crescimento de trincas presente em JSDs de modo que se permita correlacionar o desvio da trinca (Kim et al., 2004; Wang et al., 2013; Almeida, 2014) com o desvio dos campos de tensão e deformação nestes tipos de junta, conforme trabalhos já desenvolvidos (Hao et al., 2000; Kim et al., 2001; Kim et al., 2001; Donato, 2008; Fan et al., 2015).

1.1. Fundamentação Teórica

1.1.1. Mecânica da Fratura

Em um passado recente, acidentes históricos com fraturas catastróficas de estruturas aconteceram (Navios LIBERTY – 1941/45, Aviões Comet – 1952/54, Plataforma Alexander Kielland – 1980 etc.), e com isso foi intensificada a busca pela compreensão das causas desses acidentes súbitos. Essas

fraturas, de caráter frágil, ocorrem em função da combinação de variáveis que outrora não acontecera, são algumas delas: tensões trativas (devido às novas arquiteturas), transição dúctil-frágil, altos níveis de pressões, formas geométricas etc. Até esse momento da história utilizava-se as teorias de falha e procedimentos de projeto convencionais, que tinham como base as teorias de elasticidade e plasticidade associadas às propriedades estática e dinâmica dos materiais. Todavia, o registro temporal mostrou que em determinadas situações a mecânica clássica não era suficiente para a realização de projetos seguros, uma vez que, alinhadas algumas das variáveis mencionadas acima, subitamente, a fratura era estabelecida. Sendo assim, uma nova ciência passou a ser desenvolvida, tendo como principal premissa a presença de falhas (vazios, intrusões, substitucionais etc.) nos materiais de engenharia. Efeitos da concentração de tensão de falhas foram evidenciados quantitativamente por Inglis [1913], através de furos elípticos realizados em uma placa plana, de modo a simular falhas invariavelmente presentes nos materiais (microscopicamente ou macroscopicamente), seja em virtude do processo de fabricação, seja em virtude das situações ambientais e de carga inerentes às operações das estruturas. A nova ciência foi denominada Mecânica da

Fratura (MF), que em sua essência busca quantificar as combinações das variáveis de tensão, tamanho da trinca e tenacidade [ANDERSON, 2005; ARANA E GONZÁLEZ, 2002], ilustradas na Fig.1:

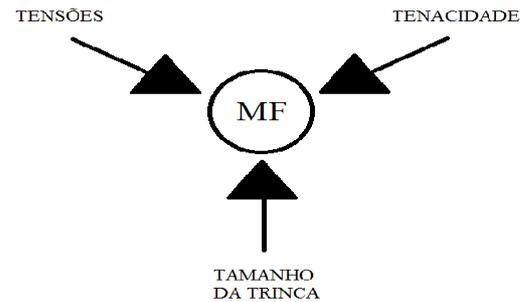


Figura 1. Parâmetros básicos da mecânica da fratura e sua interdependência.

Essas combinações são estudadas de maneira a evitar a combinação crítica desses parâmetros, fornecendo leis e normas de relacionamento entre eles. A região estudada pela mecânica da fratura trata-se de uma localidade crítica caracterizada por possuir uma distribuição triaxial de tensão bem elevada, denominada ponta da trinca.

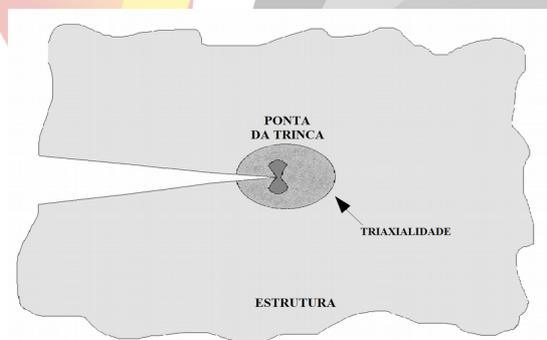


Figura 2. Região da ponta da trinca.

De acordo com a literatura, o comportamento dessa região determinará qual metodologia será utilizada durante a análise: Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP). A primeira metodologia é limitada a materiais que apresentam deformações plásticas desprezíveis antes de fratura. O MFLE adota o fator de intensidade de tensão K como parâmetro para quantificar a capacidade de resistência à fratura. Quando a deformação plástica que precede a fratura ocorre de modo significativo, a MFEP vigorará, possibilitando determinar a tenacidade do material através de dois métodos: CTOD (Crack Tip Opening Displacement) e Integral J . Esses métodos, apesar de independentes, tem uma relação de paralelismo e unicidade.

1.1.2. Defeitos

Mesmo nas mais otimistas das expectativas, a presença de defeitos em estruturas metálicas é quase que inevitável, sobretudo, nas estruturas contendo uniões soldadas. Segundo Callister [2008], os materiais em sua totalidade possuem numerosa variedade de defeitos ou imperfeições. As discontinuidades, como também são conhecidos os defeitos, podem se apresentar sob várias formas: pontuais, lineares, interfaciais e volumétricos. Dentre

essas, destaca-se as pontuais, mais especificamente as lacunas (vazios ou microcavidades), embora sejam as mais simples, nenhum material possui isenção desse tipo de defeito [CALLISTER, 2008] além de também decorrer de outras formas defeitos. Essas microcavidades (ou qualquer defeito) quando presentes no material atuam como concentradores locais de tensões, provocando níveis maiores de tensão em relação ao todo da estrutura, ou seja, potenciais geradores de falhas.

Soba ótica microscópica, a falha do material ocorre devido aos mecanismos de nucleação de vazios, coalescimento e propagação de trincas. O núcleo da falha pode ser proveniente do processo de fabricação do material (inclusões, vazios etc.) e/ou em virtude das solicitações mecânicas inerentes ao ambiente e operação do equipamento (intrusões, extrusões, corrosões etc.), resultando no escorregamento de planos atômicos. Uma vez existindo, o núcleo de falha (microcavidades) passa a ser um concentrador de tensão, fazendo com que naquele local as tensões sejam bastante superiores às tensões nas demais localidades do componente que não apresentam concentradores de tensões. Essas tensões presentes, em especial as tensões hidrostáticas, provocam o aumento de volume das microcavidades, ocasionando a

coalescência dos núcleos vizinhos naquela região, dando origem a uma microtrinca. Tensões concentradas na vizinhança da ponta da trinca podem causar evolução da fissura do material naquela região, ainda que com níveis de tensão abaixo do limite de escoamento, e assim, conforme Fig. 3 aumentar o tamanho da trinca.

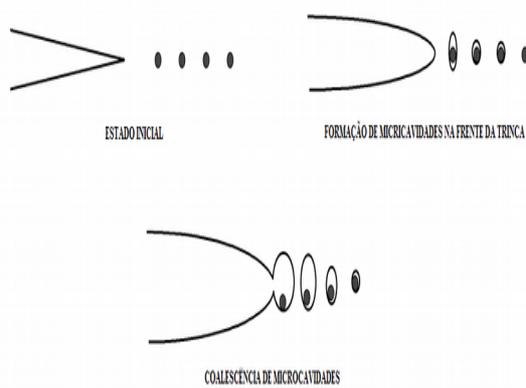


Figura 3. Mecanismos de nucleação, coalescência e propagação da trinca. [ARANA E GONZÁLEZ, 2002].

O fenômeno acima descrito refere-se ao mecanismo de propagação de trinca. Nesta etapa, ocorre o crescimento da trinca de maneira estável até que se atinja um tamanho crítico, tornando o crescimento instável e assim inevitavelmente a fratura súbita da estrutura (clivagem), podendo causar acidentes fatais.

Modelos foram idealizados a partir de premissa de defeitos como elementos intrínsecos da composição estrutural, a

exemplo de Gurson [1977], que propôs um modelo de dano considerando a presença de microcavidades, através de uma fração volumétrica de vazio, que definia a porosidade inicial do material. Posteriormente o modelo de Gurson foi modificado por Tvergaard e Needleman [1984] que incluíram a formação de núcleos de cavidades, mesmo a partir de um material sem porosidade, como condição inicial, passando ser conhecido modelo GTN. Sendo assim, o modelo é capaz de prever a deformação plástica, seguida de encruamento do material, nucleação de cavidades e coalescimento, por conseguinte propagação da trinca e fratura do material.

1.1.3. Ensaio Flexão de 3 Pontos (SE(B))

O ensaio de flexão é uma maneira de verificar defeitos metalúrgicos e de compacidade, os quais podem afetar a operacionalidade dos materiais. Esse tipo de ensaio consiste em submeter, por flexão, o corpo de prova a uma deformação plástica, tendo como escopo detectar defeitos de compacidade, heterogeneidade do material, como também avaliar a ductilidade dos materiais de forma comparativa. Existem várias normas de realização de ensaio de flexão. A modalidade mais comum do ensaio de flexão é a flexão de 3 pontos. Em ensaios de mecânica da fratura estabelecidos por



normas BS EM ISO 15653:2010, ASTM E1820, entre outras, tem a flexão de três pontos em barra com trinca simples (SE(B)), mostrado na Fig.4, como uma das possíveis modalidades para avaliação de fratura nos materiais.

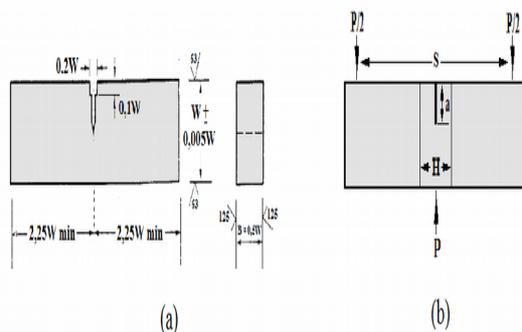


Figura 4. (a)Espécime SE(B) (Adaptada da ASTM E1820-11); (b) configuração do ensaio de flexão de 3 pontos SE(B).

Sob essa modalidade serão realizadas as análises de comportamento da trinca presente nas JSDs, na tentativa de correlacioná-lo com os desvios dos campos de tensão e deformação evidenciados pelos trabalhos que serão comentados mais adiante.

2. METODOLOGIA

2.1. Estado da Arte

Ao conduzir os estudos sobre juntas soldadas portadoras de dissimilaridades mecânicas, com amostras SE(B), baseados na teoria slip-line e na análise numérica em 3D,

Hao et al. [2000] notaram a ocorrência de restrições na ponta da trinca no lado do material mais resistente, evidenciando um caminho preferencial, ou seja, uma diretriz de deformação plástica no sentido do material de menor resistência.

Durante sua pesquisa, em ensaios de mecânica da fratura em espécimes SE(B) homogêneos e com juntas dissimilares em flexão de três pontos em diferentes temperaturas, Donato [2008] constatou que a presença de dissimilaridade mecânica da solda é responsável pela alteração dos campos de tensão e deformação nas proximidades dos defeitos e faz com que a resposta mecânica de regiões de solda seja bastante distinta em relação às regiões de metal de base, tornando insuficiente a simples aplicação de procedimentos convencionais de avaliação de integridade estrutural em componentes com tais características.

Wang et al. [2011], utilizaram o método dos elementos finitos (MEF) com base no modelo Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) para investigar o comportamento do crescimento de trincas dúcteis única em um espécime SE(B) de uma junta soldada dissimilar (JSD) composto por quatro materiais no sistema primário de usinas nucleares. Os autores observaram que as trincas iniciais em diferentes locais na JSD obtiveram valores de tenacidade e caminhos

de crescimento diferentes. Deste modo, quando a trinca inicial foi localizada no centro de solda Liga de Níquel-base 182 e amanteigamento em Liga Níquel-base 82, os deformações plásticas e danos na região da ponta da trinca são simétricos, e o crescimento da trinca é quase em linha reta ao longo do plano inicial da trinca. Mas para as trincas na interface entre os materiais e na vizinhança da interface da trinca, as deformações plásticas e danos na região da ponta da trinca são assimétricos, e a trajetória de crescimento da trinca obteve um desvio significativo para dentro do material com menor limite de escoamento dentre os dois materiais da interface.

Nos ensaios de mecânica da fratura utilizando uma junta soldada dissimilar, constituída do metal de base aço AISI 8630M amanteigado e soldado ao metal de base aço ASTM - A36 via metal de adição INCONEL 625, Almeida [2014] observou um desvio acentuado da trinca de ensaio na direção do material menos resistente, no caso metal de solda. Nesta pesquisa a pré trinca de fadiga foi gerada na ZTA do aço AISI 8630M a 1mm da linha de fusão do amanteigamento.

Fan et al. [2015] ao realizarem testes para investigação do comportamento da resistência à fratura em uma junta dissimilares, A508-Liga 52M (amanteigamento) e liga 52M (solda)-316L, demonstraram os desvios dos

campos de tensão e deformação em juntas dissimilares. Os autores utilizaram o método de elementos finitos baseado na modelagem de danos mecânicos (GTN), que possibilitou uma variância da localização da trinca inicial. Evidenciaram a permanência da triaxialidade de tensão na ponta da trinca e o desvio do campo de deformação favorável ao material menos resistente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme exposto, vários trabalhos foram realizados em materiais e por metodologias distintas, todavia foi observada certa padronização de comportamento da trinca quando presente em junta soldadas dissimilares. A Figura 5 indica os casos que serão analisados no presente trabalho.

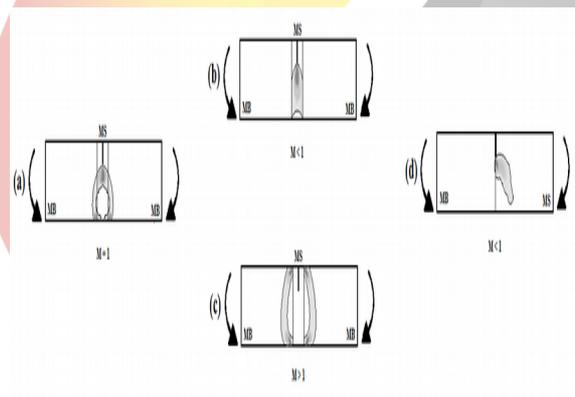


Figura 5. Variação do campo de deformação: (a) Espécime homogêneo; (b) e (c) espécimes dissimilares com trinca na solda; (d) espécime dissimilar com trinca na interface.

A ilustração acima representa a variação dos campos de deformação de acordo com a configuração de dissimilaridade e localização, conforme os trabalhos citados na seção anterior. Na figura 3(a) está representado o comportamento plástico de um espécime homogêneo ($M=1$) contendo uma trinca simples submetido ao ensaio de flexão de 3 pontos. De maneira análoga as Fig. 3(b) e Fig. 3(c) representam corpos de prova heterogêneos undermatching e overmatching, respectivamente, com trinca centralizada no metal de solda M . Por último, o espécime da Fig. 3(d) mostra o comportamento do campo de deformação para a trinca localizada na interface de uma junta soldada dissimilar ao ser carregado durante o teste de flexão de 3 pontos.

Para Zebrst et al. [2014], quando a tensão excede o material de menor resistência de uma JSDs, o padrão da deformação plástica será assimétrico. Ao ser estabelecida a combinação crítica dos parâmetros da MF a deformação plástica se concentrará entre a ponta da trinca e superfície livre. Com isso, localizada na vizinhança da zona plástica, a força motriz da trinca será afetada e pode ser maior que em estruturas não-soldadas ou evenmatching. Os mesmos autores também declaram que benefícios ou prejuízos à integridade da estrutura advindos uma junta

undermatching ou overmatching dependerão de uma análise quantitativa da configuração das variáveis presentes em determinadas situações.

O esboço da Fig.6 indica deformação plástica sofrida ocorrida no espécime definido pela a trinca situada na interface dos materiais, assim como o trajeto realizado pela trinca mediante aos testes realizados nos trabalhos supracitados.

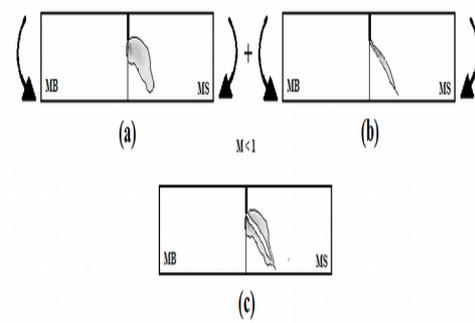


Figura 6. Variação do campo de deformação: (a) Campo de deformação plástica; (b) Trajetória da trinca; (c) Sobreposição da trajetória da trinca no campo de deformação plástica.

Notadamente, o caminho traçado pela trinca é sugerido por uma prévia deformação plástica preferencial do material de resistência mecânica inferior. De maneira análoga, o comportamento da trinca nos demais espécimes foi também observado pelos referidos autores.

Em consonância, Zebrst et al. [2014] afirmaram que além da carga aplicada, o volume da estrutura sobre o qual a zona

plástica se estabelece antes da propagação da trinca é preponderante na força motriz da trinca. Assim, a propagação e o desvio de trajetória das trincas resultam de um embate entre a força motriz crack e tenacidade à fratura do material.

4. CONCLUSÕES

Desta forma, apresentadas as performances comportamentais das trincas em virtude das configurações de cada espécime, pode-se extrair as seguintes conclusões:

1. Fica evidenciada a preferência do fluxo de deformação plástica, devido à presença de uma trinca em JSDs, no material de resistência mecânica inferior, ou seja, com menor tensão de escoamento.
2. As preferências de fluxo de deformação são decorrentes das restrições geradas por conta das dissimilaridades existentes nos espécimes, que dificultam o curso da deformação plástica no sentido do material mais resistente.
3. Os campos de tensão se movimentam de acordo com a ponta da trinca portadora de uma triaxialidade de tensões. O desvio dos campos de deformações depende da combinação do campo de tensão e das

restrições que ocorrem inerentes de cada junta heterogênea.

4. A triaxialidade sempre presente na ponta da trinca é responsável pela penetração da trinca no corpo do material, seguindo pela trajetória que exerça menor resistência ao seu avanço.

5. Por fim, os resultados demonstrados sugerem um desenvolvimento da trinca no sentido da deformação plástica precedente, ao passo que sua propagação é estabelecida ponto a ponto, sempre em direção da menor resistência encontrada na região adjacente à ponta da trinca.

As análises realizadas levaram em consideração o tipo de dissimilaridade e a localização da trinca, limitando-se a uma análise direcional. Outros fatores devem ser considerados para quantificar esta propagação: largura do corpo de prova, profundidade da trinca, esbeltez da solda, grau de dissimilaridade e ligamento remanescente.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, PRH-54/ANP da Universidade Federal da Paraíba pelo apoio financeiro.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM/CT/UFPB) e ao Laboratório de Integridade e Inspeção do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. G., 2014 *Análise da influência do hidrogênio na tenacidade quase estática de uma junta soldada de aços ARBL*. 2014, 230p. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Joao Pessoa-PB.

ANDERSON, T. L., *Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications*. 3ed. CRC Press. 2005. p. 610.

ARANA, J. L, González J. J. *Mecânica de Fractura*. La Unniversidad del País Vasco. 2002, p. 242.

ASTM E1820 – 2011 *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*.

BRITISH STANDARD BS EM ISSO 15653:2010 *Metallic materials - Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds*.

GURSON, A.L. *Continuum Theory of ductile rupture by void nucleation and growth - Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media* in a Almeida Neto A. (2014). Uma análise comparativa entre modelos de dano contínuo dependentes do terceiro invariante e com Múltiplos pontos de calibração. Dissertação de Mestrado, p. 106, Universidade de Brasília, Brasília. J. Engineering Materials and Technology. 99:2-15, 1977.

CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 5ed. São Paulo: LTC, 2008. p. 408.

DONATO, G. H. B., 2008 *Efeitos de heterogeneidades mecânicas sobre forças motrizes de trinca em juntas soldadas: determinação experimental de tenacidade e extensão de metodologias de avaliação de criticidade de defeitos*. 2008, 284p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.

FAN, K.; et al. *Local fracture resistance behavior of interface regions in a dissimilar metal welded joint*. v. 136, p. 279–291, 2015.

HAO, S.; Schwabe, K.-H.; Cornec, A. *The effect of yield strength mis-match on the fracture analysis of welded joints: slip-line*



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

field solutions for pure bending.

International Journal of Solids and Structures,
v. 37, n. 39, p. 5385–5411, 2000.

INGLIS, C.E. *Stresses in a Plate Due to the
Presence of Cracks and Sharp Corners.*

Transactions of the Institute of Naval
Architects, Vol. 55, 1913, pp. 219–241.

KIM, Y. J. Y.-J.; Schwalbe, K.-H. *Mismatch
effect on plastic yield loads in idealised
weldments: I. Weld centre cracks.*

Engineering Fracture Mechanics, v. 68, n. 2,
p. 163–182, 2001.

KIM, Y. J.; Schwalbe, K. H. *Mismatch effect
on plastic yield loads in idealized weldments.*

II. Heat affected zone cracks. Engineering
Fracture Mechanics, v. 68, n. 2, p. 183–199,
2001.

KIM, Y. J.; Schwalbe, K. H. *Numerical
analyses of strength mis-match effect on
local stresses for ideally plastic materials.*

Engineering Fracture Mechanics, v. 71, n. 7-8,
p. 1197–1219, 2004.

TVERGAARD, V. and Needleman, A. *Analysis of the cup-cone fracture in a round
tensile bar.*

Acta metallurgica. v.32, p.157-
169, 1984.

WANG, H. T. et al. *Numerical investigation
of ductile crack growth behavior in a
dissimilar metal welded joint.* Nuclear
Engineering and Design, v. 241, n. 8, p. 3234–
3243, 2011.

ZERBST, U. et al. *Review on fracture and
crack propagation in weldments - A fracture
mechanics perspective.* Engineering Fracture
Mechanics, v. 132, p. 200–276, 2014.

www.conepetro.com
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br