

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DE UMA JUNTA SOLDADA ATRAVÉS DO ENSAIO DE CTOD EM AÇO API 2H GRAU 50¹

Jefferson Haag²
Bill Paiva dos Santos²
Leandro Pereira Costa³
Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha⁴
Cleber Rodrigo de Lima Lessa⁵
Telmo Roberto Strohaecker⁶

Resumo

A nucleação de trincas em componentes metálicos não acontece somente por defeitos de fabricação, mas também por processos como fadiga e corrosão. A mecânica da fratura, aliada às técnicas de ensaios não destrutivos, visa determinar o comportamento de defeitos do tipo trinca, evitando assim falhas catastróficas e reparos desnecessários. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade, através do ensaio de CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) e de micrografias, de uma junta soldada com processo de eletrodo tubular do aço API 2H Grau 50, utilizado em estruturas *offshore*. Foram analisadas a região de grãos grosseiros e a região subcrítica da junta soldada. Os ensaios de CTOD, segundo a norma BS7448-2, foram realizados em nove corpos de prova do tipo *single edge notch bending* SE(B) à temperatura de 0°C. Com base nos resultados obtidos e nos critérios mínimos de validação exigidos pela maioria das normas de fabricação, a junta soldada foi considerada como tendo qualidade adequada.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura; CTOD; Junta soldada; API 2H Grau 50.

FRACTURE TOUGHNESS EVALUATION OF WELDING JOINT THROUGH CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT TEST OF API 2H GRADE 50 STEEL

Abstract

Crack nucleation in metallic components not only occurs by manufacturing defects, but also because of processes such as fatigue and corrosion. Fracture mechanics allied with techniques of nondestructive testing aims to determinate the behavior of crack type defects, avoiding unnecessary repairs and catastrophic failures. This work aims to evaluate the quality of a welded joint by flux-cored arc welding (FCAW), using the Crack Tip Opening Displacement testing (CTOD testing), of an API 2H Grade 50 steel, used in *offshore* structures. The coarse grains and subcritical heat affected zone structures were analyzed. CTOD tests were performed in nine single edge notch bending SE(B) specimens at zero degree Celsius temperature, according to British Standard 7448-2. Based on the obtained outcome and the minimum validation criteria required by most of the manufacturing standards the welding joint was considered as having adequate quality.

Key words: Fracture mechanics toughness; CTOD; Welded joint; API 2H Grade 50.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Acadêmico em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, RS, Brasil.

³ MSc., Engenheiro Metalúrgico, Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC), Brasil.

⁴ MSc., Engenheiro Metalúrgico, Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, RS, Brasil.

⁵ MSc., Engenheiro Metalúrgico, Instituto Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

⁶ Professor Doutor, Engenheiro Metalúrgico, Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de um componente/estrutura exige que a possibilidade de ocorrer uma falha seja minimizada, utilizando a seleção apropriada dos materiais e/ou redução de agentes nucleantes de trincas, como filetes, rasgos de chavetas, reduções bruscas de seção e outras descontinuidades. A existência de defeitos nos materiais faz necessário adotar outra abordagem para o desenvolvimento de projetos, diferente do projeto convencional de engenharia. A partir dessa abordagem, considerando os defeitos nos materiais, foi desenvolvido o projeto de componentes baseado na mecânica da fratura, que visa determinar se um defeito do tipo trinca irá ou não levar o componente à fratura catastrófica para tensões normais de serviço (Figura 1).⁽¹⁾

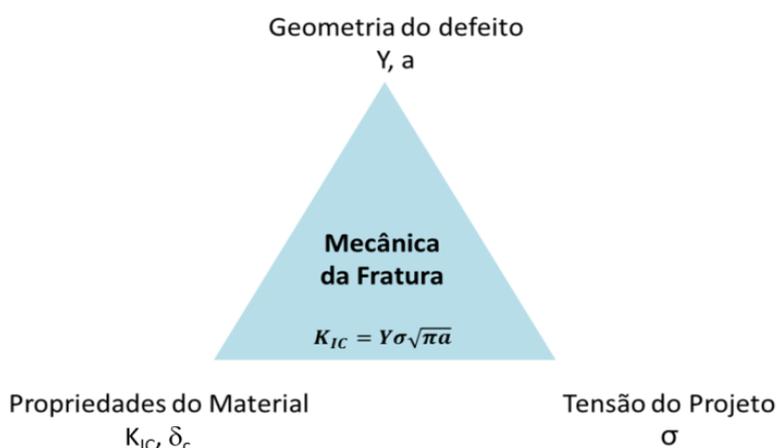


Figura 1. Considerações do projeto de componentes baseado na mecânica da fratura. A mecânica da fratura correlaciona o tipo e o tamanho do defeito (Y,a) com a tensão aplicada no componente (σ) e propriedades intrínsecas do material (K_{IC}, δ_c).

Procedimentos de mecânica da fratura para avaliação da integridade mecânica de componentes e estruturas, em condições elasto-plásticas, utilizam o parâmetro CTOD (δ) para quantificar o efeito de defeitos do tipo trinca nas propriedades mecânicas de materiais metálicos. O CTOD (δ) possui um significado físico, cuja representação esquemática da Figura 2 visa tornar mais simples a sua compreensão. Assim, o uso de normas técnicas, com condições padronizadas (BS 7448-1,⁽²⁾ ASTM E1290⁽³⁾ e ASTM E1820⁽⁴⁾), permite obter resultados que possam ser utilizados e reproduzidos em qualquer lugar.

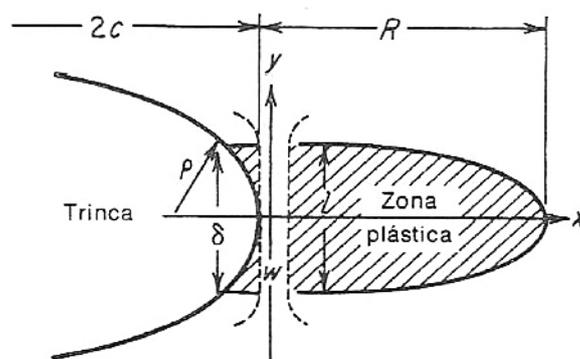


Figura 2. Representação esquemática do parâmetro CTOD (δ), apresentando o modelo do conceito de deslocamento na ponta da trinca. Sendo que há uma relação entre o comprimento (l) do material à

frente da trinca com o raio de curvatura da trinca (ρ) e da largura (w) com fatores microestruturais que controlam a ductilidade.⁽⁵⁾

Em resumo, o ensaio de CTOD consiste no carregamento de um corpo de prova, em tração ou flexão, dependendo do tipo de corpo de prova, confeccionado com um entalhe e uma pré-trinca obtida por fadiga. É utilizado o controle de deslocamento com taxa constante. O objetivo é determinar o valor de CTOD característico associado ao material. Este ensaio é apropriado para materiais que apresentem transição de comportamento dúctil-frágil, como os aços de estrutura ferrítica.

O processo de soldagem produz alterações na microestrutura dos materiais, podendo gerar redução de suas propriedades mecânicas, chegando ao ponto do material perder sua aplicabilidade. Nos aços de baixo carbono, estruturas distintas na região adjacente ao cordão de solda são resultados de ciclos térmicos e deformações durante a soldagem. Assim, pode-se considerar a zona termicamente afetada (ZTA) dos aços como sendo formada por:

- região de grãos grosseiros;
- região de refino de grão;
- região intercrítica; e
- região subcrítica.

A Figura 3 apresenta as diferentes regiões em que a ZTA é composta.

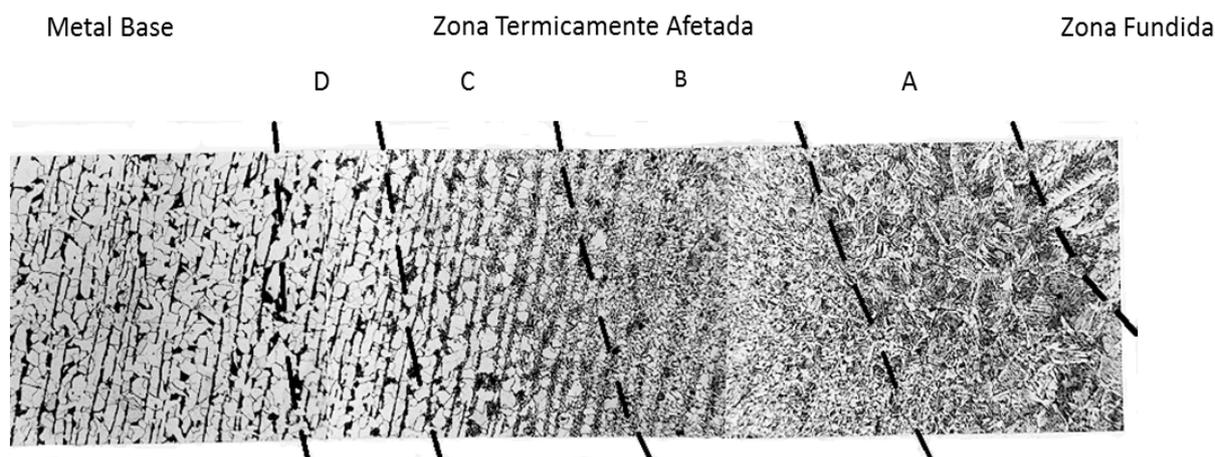


Figura 3. Microestrutura da zona termicamente afetada de um aço baixo carbono. As divisões aproximadas correspondem a: A - região de grãos grosseiros; B - região de refino de grão (Normalização); C - região intercrítica; e D - região subcrítica. Ataque: Nital + Picral. Aumento original: 100x.⁽⁶⁾

O uso de ensaios de CTOD para avaliar a integridade de estruturas *offshore* é utilizado por diversos autores na literatura. Santos et al.⁽⁷⁾ determinaram o CTOD crítico de juntas soldadas por atrito com pino não consumível de aço API 5L X80 com diferentes parâmetros de soldagem. Enquanto que Lee et al.⁽⁸⁾ avaliaram as propriedades de tração e de tenacidade à fratura, através de ensaios de micro tração e CTOD, do material base, do metal de solda e da zona termicamente afetada (ZTA) de um aço API X65, visando obter um diagrama de análise de falhas. Por fim, Coronado e Ceron⁽⁹⁾ avaliaram diferentes parâmetros de soldagem do processo FCAW, relacionando-os com os resultados do ensaio de CTOD.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade, através do ensaio de CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) e de micrografias, de uma junta soldada com processo de eletrodo tubular do aço API 2H Grau 50, utilizado em estruturas *offshore*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material ensaiado foi um componente soldado em forma de cruz composta por duas chapas de aço API 2H Grau 50 com espessura de 63,5 mm (2,5”), soldadas em ângulo com chanfro tipo K. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática do componente soldada.

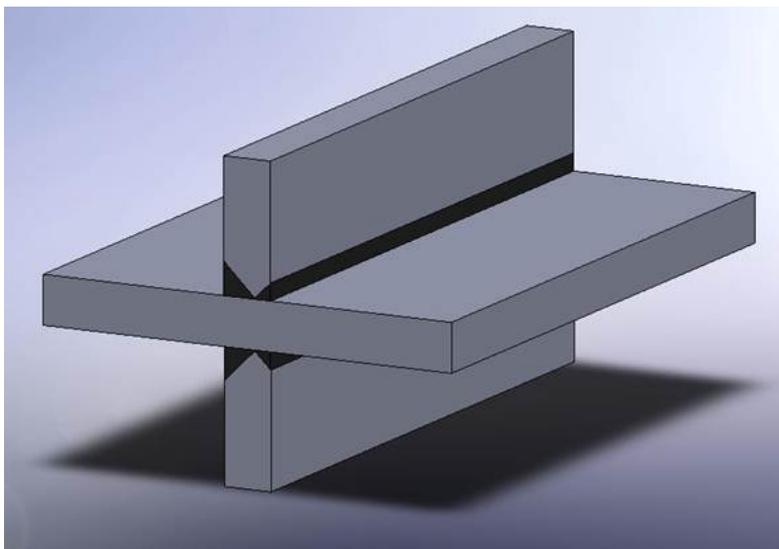


Figura 4. Representação esquemática do componente soldado, mostrando a geometria da junta.

A composição química do aço API 2H Grau 50 é apresentada na Tabela 1, sendo que o carbono equivalente (CE) é igual a 0,44. A tensão limite de escoamento e a resistência à tração desse material são 364 MPa e 576 MPa, respectivamente. A análise química e das propriedades mecânicas desse aço estão de acordo com os requerimentos especificados pela API Specification 2H.⁽¹⁰⁾

Tabela 1. Composição química do aço API 2H Grau 50

Elemento	C	Mn	P	S	Cu	Si	Ni
% em peso	0,140	1,500	0,015	0,003	0,160	0,360	0,090
Elemento	Cr	Mo	V	Ti	B	Al	Fe
% em peso	0,140	0,030	0,001	0,004	0,001	0,037	Bal.

Foi realizada a análise metalográfica no material base e observado que este aço é composto por uma estrutura formada por grãos de ferrita e colônias de perlita com bandeamento (Figura 5). Como esse material foi normalizado, é possível perceber grãos refinados.

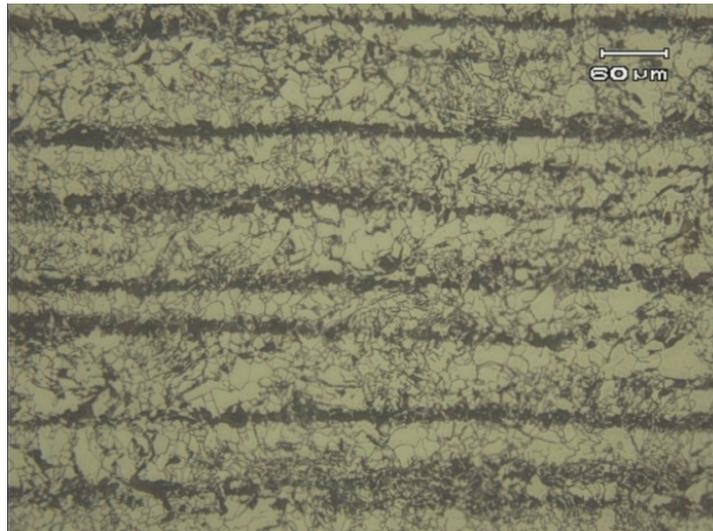


Figura 5. Microestrutura óptica do aço API 2H Grau 50, como recebido, apresentando na estrutura ferrita e perlita com bandeamento.

A metodologia do trabalho está presente no fluxograma da Figura 6. Após o recebimento das amostras na forma de cruz soldada em chanfro K, foram realizados cortes em serra fita e, posteriormente, todos os corpos de prova foram usinados em fresadora mecânica.

A usinagem do entalhe foi realizada através do processo de eletroerosão a fio, posicionando o entalhe de forma representativa com a condição a ensaiar através de um ataque químico, como pode ser observado na macrografia da Figura 7a. Enquanto que um desenho esquemático do corpo de prova do ensaio de CTOD do tipo *single edge notch bending* SE(B), com seção BXB, pode ser observado na Figura 8.

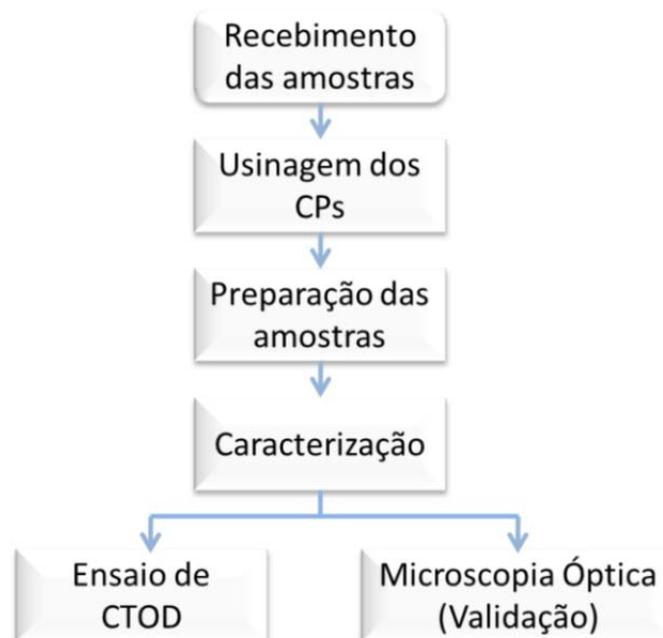


Figura 6. Fluxograma apresentando a metodologia do trabalho.

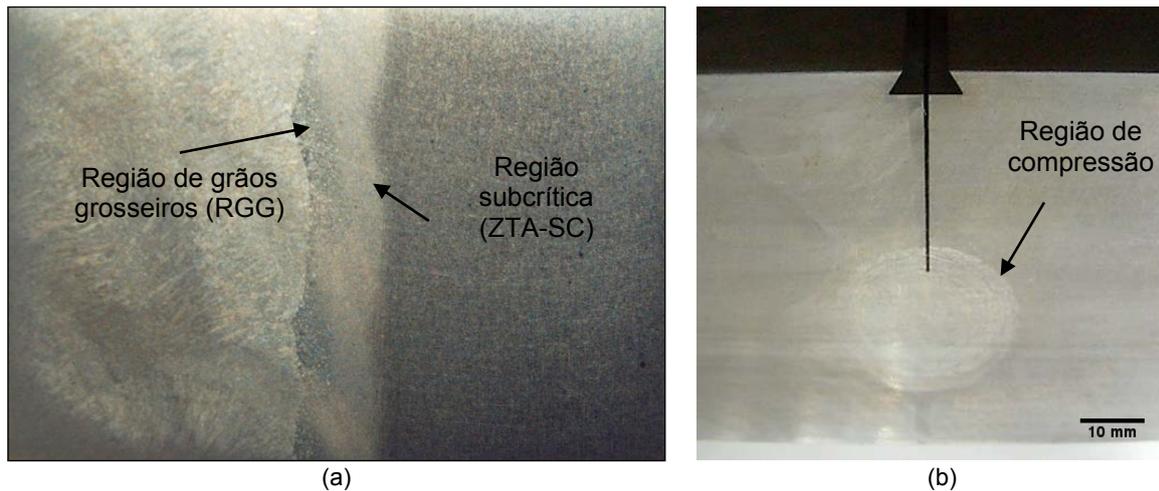


Figura 7. (a) Macrografia da junta soldada, com a indicação das regiões de interesse do ensaio; e (b) amostra após o processo de compressão lateral.

Foi realizado um processo de compressão lateral nos corpos-de-prova após a usinagem, com a finalidade de minimizar o efeito das tensões residuais, visando uma frente de propagação de trinca plana, conforme a norma BS 7448-2.⁽¹¹⁾ Uma amostra após o uso processo de compressão lateral pode ser vista na Figura 7b.

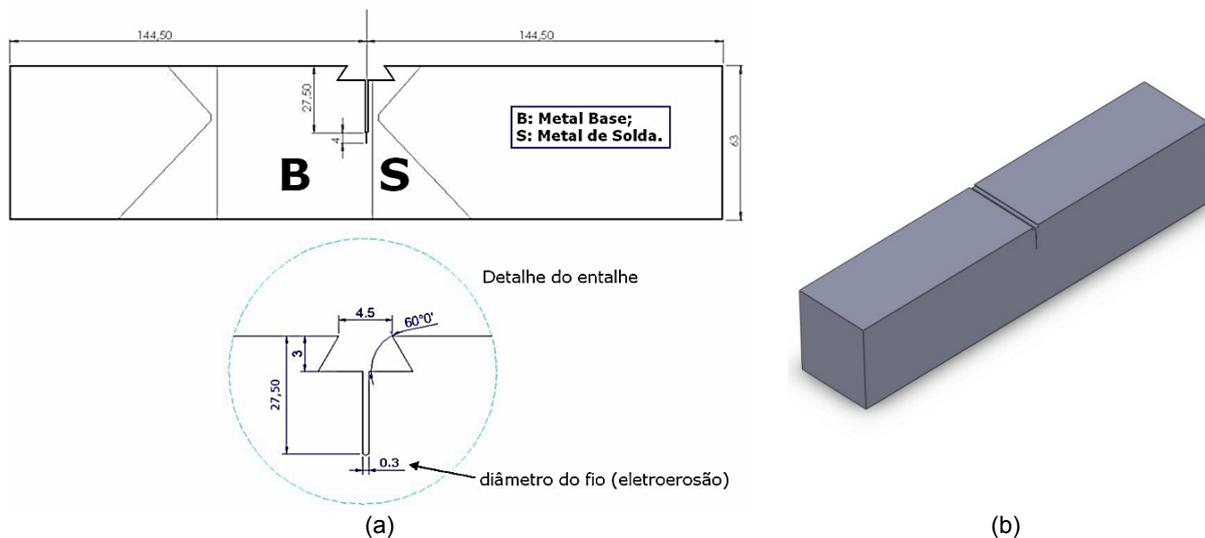


Figura 8. (a) Desenho esquemático do corpo de prova para os ensaios de CTOD. Em detalhe, a região onde o clip gauge é posicionado e o entalhe por eletroerosão a fio; (b) corpo de prova do tipo SE(B) com seção BXB. Todas as dimensões estão em [mm].

A pré-trinca de fadiga foi realizada em uma máquina servo-hidráulica marca MTS modelo 810, com capacidade máxima de 100 kN, utilizando o *software* MTS *Fracture Toughness TestWare*.

Os ensaios de CTOD foram realizados em uma máquina eletromecânica marca Instron modelo 5585H com capacidade de carga de 250 kN. A temperatura do ensaio foi mantida a 0°C, sendo esta a temperatura de projeto do componente, através da utilização de água e gelo e foi monitorada através do uso de um termopar mantido em contato com a peça. A Figura 9 apresenta a montagem do dispositivo e a Figura 10, o detalhe da cuba com o controle de temperatura.



Figura 9. Montagem do dispositivo.

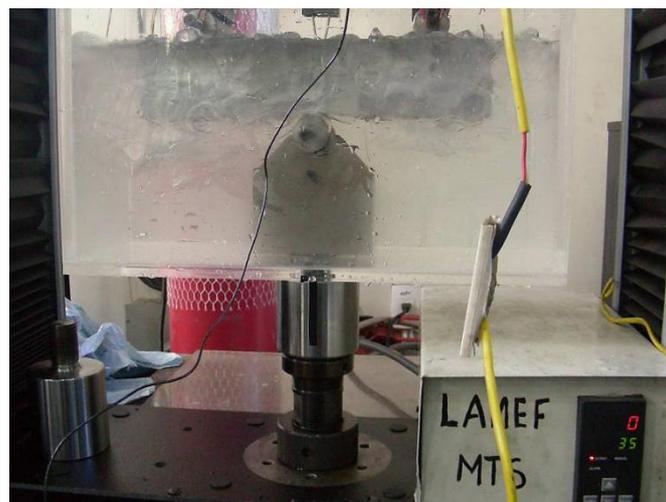


Figura 10. Detalhe da cuba, controle da temperatura e o corpo de prova imerso.

A análise metalográfica pós-ensaio deve ser utilizada em corpos de prova designados para ensaios em microestruturas específicas, conforme a norma BS 7448-2,⁽¹¹⁾ a fim de estabelecer se a ponta da trinca foi posicionada com sucesso na microestrutura alvo. Uma representação esquemática do procedimento da análise metalográfica é apresentada na Figura 11.

Nesse trabalho, a validação dos ensaios de CTOD foi embasada na norma Petrobras N-1678,⁽¹²⁾ assim foi utilizado seu procedimento de seccionamento e critério de validação para as duas microestruturas alvo (Região de Grãos Grosseiros e Zona Subcrítica). A análise ocorreu na superfície da trinca, ou seja, nas laterais dos corpos de prova via microscopia óptica com o reagente Nital 2%, sendo que o procedimento da norma N-1678⁽¹²⁾ é similar ao da BS 7448-2.⁽¹¹⁾

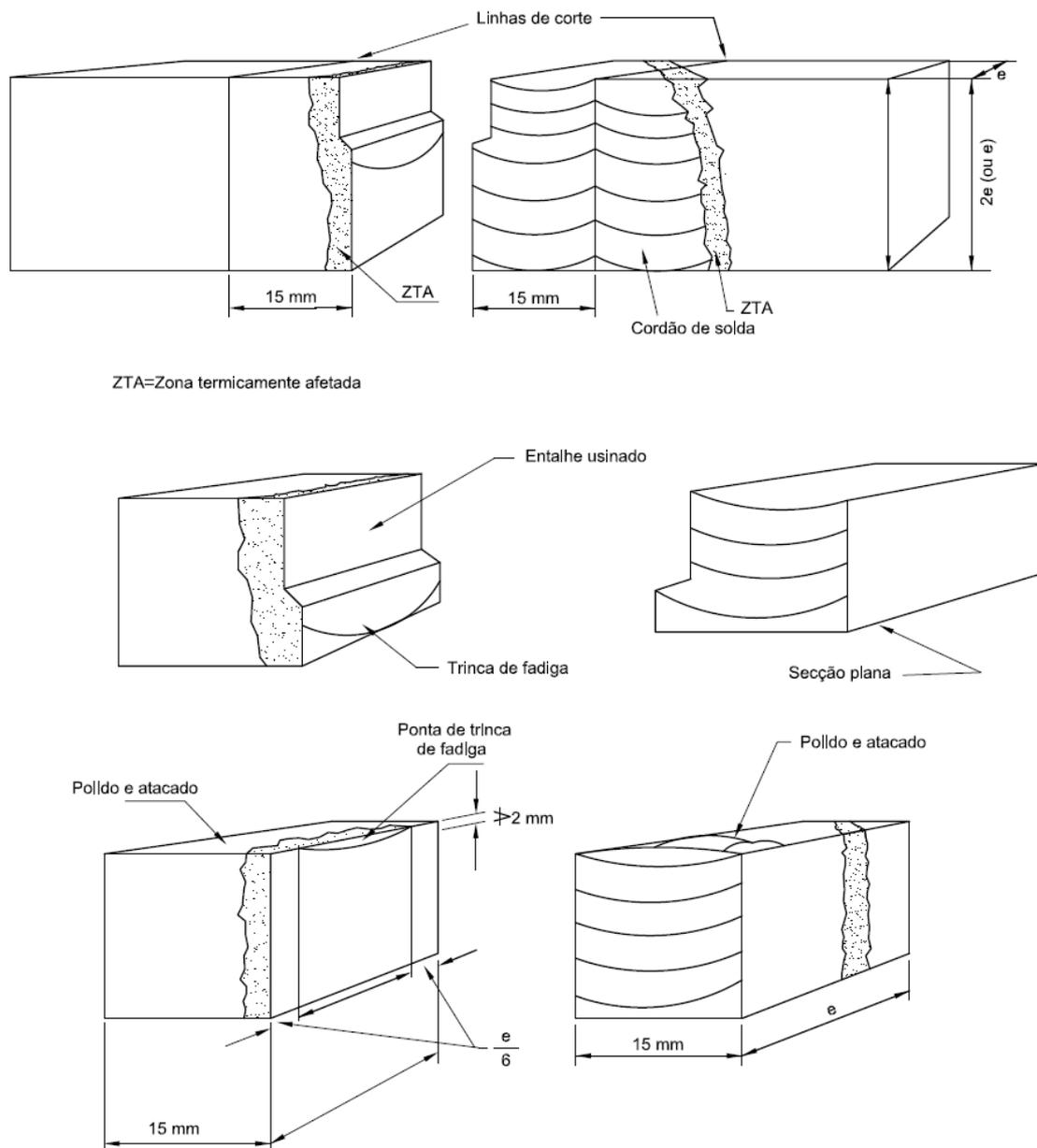


Figura 11. Representação esquemática da análise metalográfica para posicionamento da ponta trinca no ensaio de CTOD.⁽¹²⁾

3 RESULTADOS

3.1 Ensaio de CTOD

A Tabela 2 apresenta as medidas e os resultados dos nove corpos de prova ensaios nas duas condições de ensaio, ou seja, aonde foi posicionado o entalhe por eletroerosão: região subcrítica (ZTA-SC) e região de grãos grosseiros (RGG). Os corpos de prova utilizados apresentaram seção nominal de 63 mm x 63 mm e tamanho de trinca de 32,5 mm. Os valores de CTOD das amostras ZTA-SC-2 e RGG-3 não foram de carga máxima, já que estes ensaios foram terminados antes de alcançarem valores máximos ou críticos, conforme pode ser observado nas curvas carga (P) versus abertura na boca do entalhe (V) nas Figuras 12 e 13.

Tabela 2. Medidas e resultados do ensaio de CTOD para cada corpo de prova

Corpo de Prova	Condição	V_m (mm)	P_m (N)	CTOD δ_m (mm)
ZTA-SC-1	ZTA-SC	4,61	261.541	1,37
ZTA-SC-2	ZTA-SC	1,47	250.908	0,52*
RGG-3	RGG	1,22	252.126	0,45*
RGG-4	RGG	3,45	250.080	1,05
RGG-5	RGG	3,08	210.759	0,89
ZTA-SC-6	ZTA-SC	3,50	262.501	1,06
ZTA-SC-7	ZTA-SC	4,66	256.765	1,35
RGG-8	RGG	3,56	262.500	1,08
ZTA-SC-9	ZTA-SC	3,03	255.083	0,93

* Não é CTOD de carga máxima (δ_m).

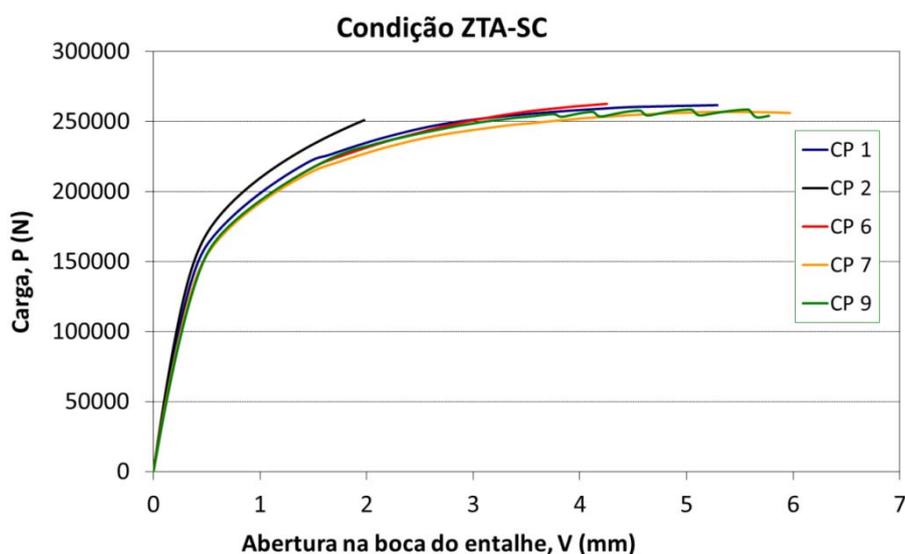


Figura 12. Curva carga versus abertura na boca do entalhe para as amostras da condição região subcrítica (ZTA-SC).

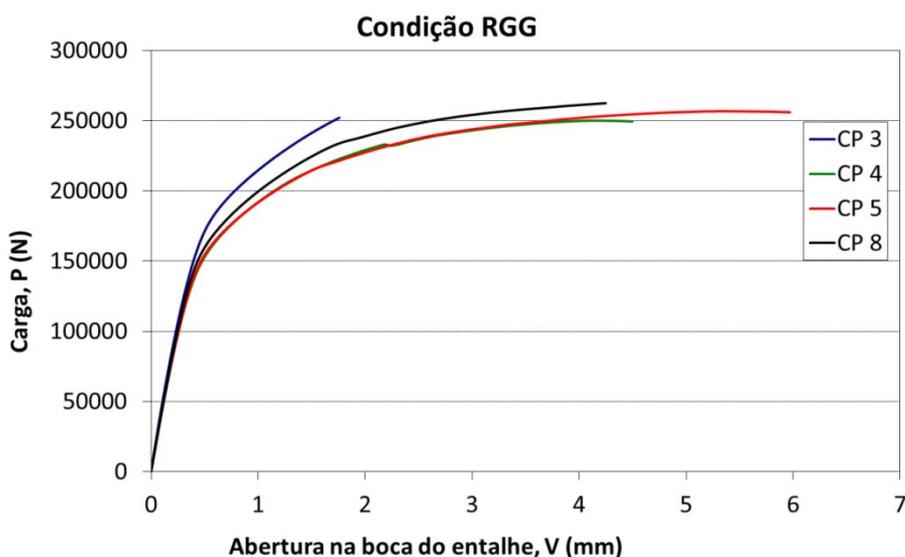


Figura 13. Curva carga versus abertura na boca do entalhe para as amostras da condição região de grãos grosseiros (RGG).

A medição do tamanho da trinca inicial (a_0) foi efetuada para todas as amostras após a realização do ensaio de CTOD, conforme a norma BS-7448-2.⁽¹¹⁾ A Figura 14 apresenta uma imagem de um das amostras para medição do tamanho de trinca.

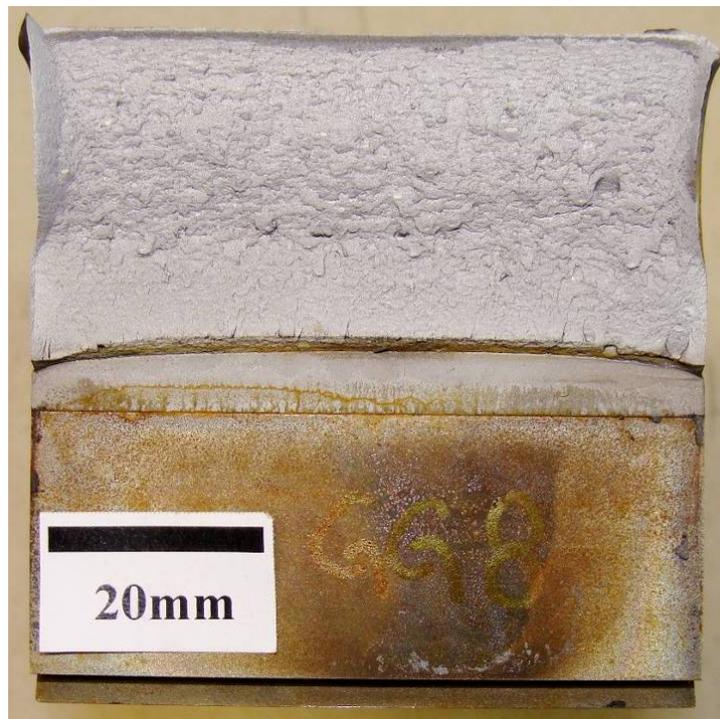


Figura 14. Corpo de prova para análise do tamanho de trinca.

3.2 Validação do Ensaio de CTOD

A Figura 15 apresenta micrografias representativas das condições ZTA-SC e RGG. A análise foi desenvolvida em três micrografias por parte seccionada, totalizando seis micrografias por amostra.

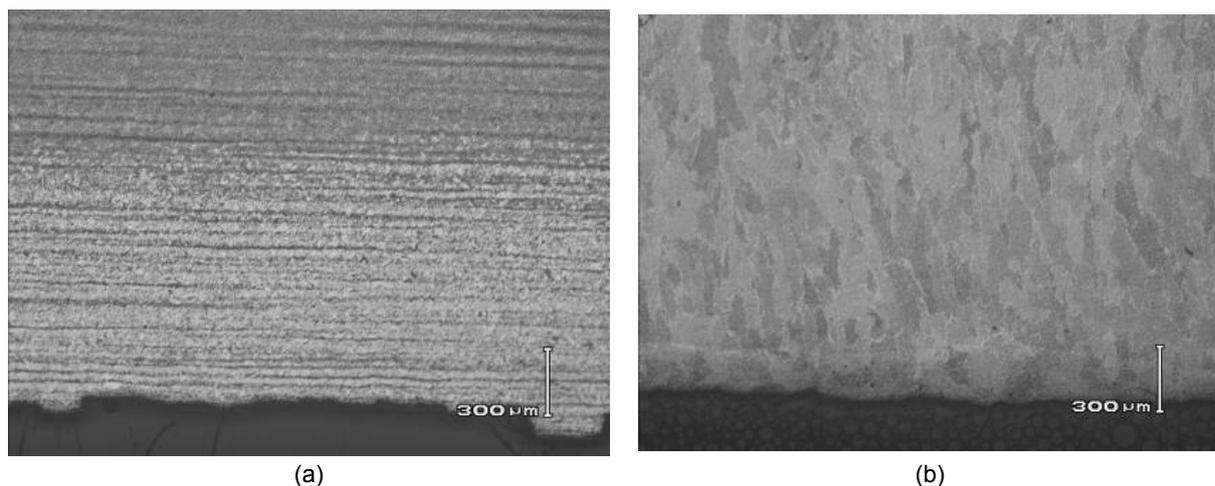


Figura 15. (a) Micrografia representativa da condição da região subcrítica (ZTA-SC); (b) micrografia representativa da condição da região de grãos grosseiros (RGG).

O resultado da validação do ensaio de CTOD é apresentado na Tabela 3. A verificação da posição da região de ensaio mostrou que o ensaio da amostra RGG-4

acabou ocorrendo na região subcrítica (ZTA-SC), enquanto que as outras amostras estavam de acordo com desejado.

Tabela 3. Resultado da validação do ensaio de CTOD

Corpo de Prova	Condição a ensaiar	Trinca pós-ensaio
ZTA-SC-1	ZTA-SC	ZTA-SC
ZTA-SC-2	ZTA-SC	ZTA-SC
RGG-3	RGG	RGG
RGG-4	RGG	ZTA-SC
RGG-5	RGG	RGG
ZTA-SC-6	ZTA-SC	ZTA-SC
ZTA-SC-7	ZTA-SC	ZTA-SC
RGG-8	RGG	RGG

Assim, pode-se calcular o valor médio de CTOD por condição, sendo que os corpos de provas que não obtiveram CTOD de carga máxima (ZTA-SC-2 e RGG-3) não foram considerados nos cálculos, visto que estes não são representativos das condições ensaiadas do material. A Tabela 4 apresenta os valores médios de CTOD por condição ensaiada.

Tabela 4. Valores médios de CTOD por condição ensaiada

Condição	CTOD δ_m (mm)
ZTA-SC	1,15
RGG	0,99

4 DISCUSSÃO

As dimensões dos corpos de prova estão todas de acordo com a norma BS 7448-2,⁽¹¹⁾ sendo que um dos resultados mais críticos é a pré-trinca de fadiga que deve estar entre a relação do tamanho de trinca sobre largura (a/W) de 0,45 a 0,55 e deve ter frente de propagação plana.

A comparação dos valores médios de CTOD, entre as duas condições da zona termicamente afetada, mostra que a região subcrítica apresenta maior tenacidade que a região de grãos grosseiros. O motivo desse comportamento é a diferença do tamanho de grão entre as duas regiões.

Godoy, Cavalheiro e Salani⁽¹³⁾ constataram valores semelhantes de CTOD para a zona termicamente afetada, sendo que eles utilizaram menor seção transversal dos corpos de prova (40 mm x 20 mm) e menor temperatura de ensaio (-15°C), que as desenvolvidas neste trabalho, em um aço API X65.

Os resultados obtidos em todos os corpos de prova atendem aos critérios mínimos exigidos pela maioria das normas de fabricação como, por exemplo, as normas N-1678⁽¹²⁾ e DNV-OS-F101.⁽¹⁴⁾ Segundo elas, são necessários valores mínimos de CTOD de 0,25 mm e 0,15 mm, respectivamente, para a temperatura de projeto do material.

5 CONCLUSÕES

A soldagem de aços estruturais de grande espessura remete a modificações na microestrutura da região adjacente ao cordão de solda, devido à necessidade do uso de processos com alto aporte de calor para que estes se tornem economicamente viáveis. Assim, há a possibilidade do processo impactar negativamente na

tenacidade do material. Logo, a avaliação da tenacidade à fratura das regiões da zona termicamente afetada e do metal de solda, torna possível compreender o comportamento de defeitos do tipo trinca em uma junta soldada aplicada em estruturas *offshore*.

Os resultados obtidos nesse trabalho são superiores a critérios mínimos de validação da maioria das normas de fabricação, assim a junta soldada apresentou propriedades adequadas para sua aplicação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- 1 STROHAECKER, T.R. Mecânica da Fratura. Notas de Aula. 2011.
- 2 BRITISH STANDARD. *BS 7448: Fracture mechanics toughness tests – Part I: Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*. London, 1991.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E-1290: Standard test method for crack-tip opening displacement (ctod) fracture toughness measurement*. West Conshohocken, PA, 1993.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E-1820: Standard test methods for measurements of fracture toughness*. West Conshohocken, PA, 1996.
- 5 DIETER, G.E. *Metalurgia Mecânica*, 2^a edição. Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro, 1981.
- 6 MODENESI, P.J. *Soldabilidade dos aços transformáveis*. UFMG. 2010.
- 7 SANTOS, T.F. A.; HERMENEGILDO, T.F.C.; AFONSO, C.R.M.; MARINHO, R.R.; PAES, M.T.P. Fracture toughness of ISO 3183 X80M (API 5L X80) steel friction stir welds. In: *Engineering Fracture Mechanics* 77, 2010, Campinas, São Paulo, Brasil. p. 2937-2945.
- 8 LEE, J.S; JU, J.B.; KIM, W.S; KWON, D. Weld crack assessments in API X65 pipeline: failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties. In: *Materials Science and Engineering A* 373, 2004, Seoul, South Korea. p. 122-130.
- 9 CORONADO, J.J.; CERON, C. Fracture mechanisms of CTOD samples of submerged and flux cored arc welding. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 53, 2010, Cali, Colombia. P. 145-151.
- 10 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Specification for carbon manganese steel plate for offshore structures*. API Specification 2H, 9^a edição. 2007.
- 11 BRITISH STANDARD. *BS 7448: Fracture mechanics toughness tests – Part II: Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*. London, 1997.
- 12 PETROBRAS N-1678 – *Estruturas Oceânicas – Aço*. Revisão G. 2009.
- 13 GODOY, J.M.; CAVALHEIRO, B.C.; SALANI, M. Tenacidade na junta soldada de aços API-DNV, fabricados por laminação controlada seguida de resfriamento acelerado. *Exposol, Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção*, 2008, Rio de Janeiro.
- 14 OFFSHORE STANDARD. *DNV-OS-F01 – Submarine Pipeline Systems*, Edition 2010.