

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Determinação da Tenacidade à Fratura de Juntas Soldadas Constituídas de Aços Inoxidáveis Ferríticos Utilizados na Indústria do Petróleo

AUTORES:

Polliana Alexandre Soares

Temístocles de Souza Luz

Marcelo Camargo Severo de Macêdo

Cherlio Scandian

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Espírito Santo

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DE JUNTAS SOLDADAS CONSTITUÍDAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Abstract

This work aims to study the fracture toughness of welded joints. The tested material was a ferritic stainless steel 410S which is used in construction of equipment for the petrochemical industry, for example. We tested two different conditions: "as-received" and "welded" material. The specimens were prepared according to ASTM E 1820-01 and the criterion of fracture mechanics employed was the Resistance Curve (R-Curve). The fracture toughness was checked and the welded material presented the best result.

Introdução

O projeto convencional na engenharia baseia-se em evitar falhas por colapso plástico, e a disciplina que estuda "analiticamente" a fratura, e a possibilidade de ocorrência desta, em corpos submetidos a carregamentos diversos e contendo defeitos (trincas) preexistentes é a Mecânica da Fratura, baseando-se, nas propriedades dos materiais. A propriedade normalmente especificada em códigos de engenharia é a tensão de escoamento convencional ou, em componentes mecânicos, a faixa de dureza.

Desta forma a tensão de projeto será a tensão que levaria o componente ao colapso plástico dividido por um fator de segurança. Este fator de segurança pode ser de 1,5 para vasos de pressão fabricados em aço laminado, de 4 para aplicação similar com aço fundido e variando de 5 até 10 para cabos de aço.

Conforme este procedimento o fator de segurança não considera a possibilidade de fratura por um modo alternativo como a fratura frágil. Geralmente é aceito que o fator de segurança evita a ocorrência de fraturas frágeis. Entretanto, na prática, tem-se verificado que isto nem sempre é verdadeiro. Existem situações em que falha de componentes ocorre a partir de trincas com tensões aplicadas abaixo da tensão de projeto. Em termos de engenharia este é um tipo de fratura frágil incentivada por concentradores de tensões que agem, normalmente, no sentido de restringir a deformação plástica.

Em serviço é comum a ocorrência de trincas junto a regiões de altas tensões como filetes, rasgos de chaveta, reduções bruscas de seção e outras descontinuidades. Os defeitos tipo trinca mais comuns são: trincas de solidificação; trincas de hidrogênio em soldas; decoesão lamelar e trincas nucleadas em serviço por fadiga ou corrosão sob tensão.

Normalmente estes defeitos são detectados e avaliados quanto as suas dimensões por técnicas de ensaios não destrutivos. O objetivo da Mecânica da Fratura é a de determinar se um defeito tipo trinca irá ou não levar o componente a fratura catastrófica para tensões normais de serviço permitindo, ainda, determinar o grau de segurança efetivo de um componente trincado. O grande mérito da mecânica da fratura é a de possibilitar ao projetista valores quantitativos de tenacidade do material permitindo projetos que aliem segurança e viabilidade econômica. A mecânica da fratura quando aplicada à fadiga e a corrosão sob tensão permite a operação segura de componentes com defeitos prévios e/ou trincas nucleadas em serviço.

É evidente que a presença de uma trinca afeta a resistência de um componente. Desta forma durante o crescimento da trinca a resistência estrutural vai sendo minada. O controle de fratura tem o objetivo de prevenir a fratura devido a defeitos e trincas frente a carregamentos em serviço.

Uma forma de prevenir a fratura é fazer com que a resistência não caia abaixo de determinado limite. Isto significa que deve ser evitado que as trincas atinjam tamanhos críticos. São apresentados, assim, dois problemas a serem resolvidos: calcular o tamanho de defeitos admissíveis (deve-se determinar como o tamanho da trinca afeta a resistência global) e calcular o tempo de operação em segurança (definição do tempo necessário para uma determinada trinca alcançar o tamanho crítico).

A ferramenta matemática para possibilitar a análise de defeitos permissíveis é a mecânica da fratura. Ela fornece os conceitos e equações utilizadas para determinar como as trincas crescem e quanto podem afetar a resistência de estruturas.

A mecânica da fratura divide-se em: mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) e mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP). A primeira, normalmente, é utilizada em situações em que a fratura ocorre ainda no regime linear-elástico. Isto pode ocorrer para ligas de altíssima resistência mecânica ou mesmo em liga com resistência moderada desde que empregadas em uma espessura razoável. É a espessura que ditará se o regime é o estado plano de deformação (estado triaxial de tensões) em que a mecânica da fratura linear-elástica é aplicável ou o estado de tensão plana (biaxial de tensões) em que a mecânica da fratura elasto-plástica é aplicável.

O objetivo deste trabalho é a determinação da tenacidade à fratura de juntas soldadas constituídas de aços inoxidáveis ferríticos utilizados na indústria do petróleo, especialmente em petroquímicas. Na indústria do petróleo, tanto no que tange à extração como no refino, empregam-se várias estruturas metálicas que, por razões de construção-montagem ou razões de serviços (corrosão sob tensão, fadiga, fluência), contêm trincas. Uma maneira elegante e racional de tratar essas trincas, quanto à integridade das estruturas, é através dos critérios de falha pertinentes à mecânica da fratura.

As estruturas metálicas contêm defeitos intrínsecos e defeitos oriundos de montagem (estruturas soldadas, por exemplo) e a mecânica da fratura através dos seus critérios é capaz de fornecer respostas “mecânicas” confiáveis. Se uma estrutura contendo trinca nas juntas soldadas se rompe poderá ter prejuízos humanos e ambientais. Visto isto, torna-se importante a utilização desses critérios para atestar a confiabilidade das estruturas na indústria do petróleo.

Metodologia

Uma forma de prevenir a fratura é fazer com que a resistência não caia abaixo de determinado limite. Isto significa que deve ser evitado que as trincas atinjam tamanhos críticos. Duas vertentes são propostas: calcular o tamanho de defeitos admissíveis e/ou calcular o tempo de operação em segurança. A ferramenta que possibilita a análise de defeitos permissíveis é a mecânica da fratura determinando, também, a taxa de crescimento das trincas e como isso afeta a resistência mecânica da estrutura.

Métodos Utilizados

Neste trabalho foi utilizada a curva de resistência (Curva R). A construção da Curva R, resumidamente, é feito através da correlação entre os valores máximos dos tamanhos de abertura da trinca (*Crack-Opening Displacement*, $COD_{\max}$ ou $\delta_{\max}$) em função dos respectivos tamanhos máximos de trinca (a), representados, respectivamente, pela Figura 1 e Figura 2.

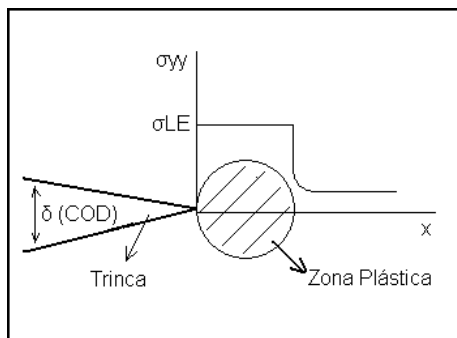


Figura 1 – Abertura na ponta da trinca.

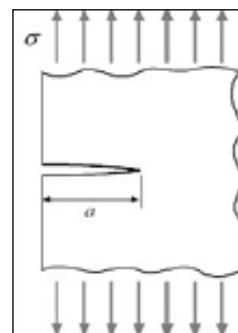


Figura 2 – Tamanho da trinca.

Obtendo, por exemplo, o seguinte gráfico mostrado abaixo:

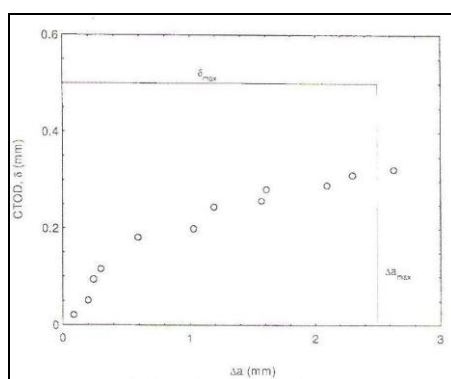


Figura 3 – Curva R.^[8]

A Figura 3 fornece a relação entre o tamanho e a abertura máxima da trinca sem que ocorra a ruptura do material. Assim, com os ensaios nos corpos de provas espera-se obter uma metodologia de como as trincas afetam a resistência das estruturas, montando, assim, a sua curva de resistência.

O corpo de prova (Figura 4) foi confeccionado na norma ASTM E 1820 – 01, no Laboratório de Pesquisa em Usinagem – LAUS da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

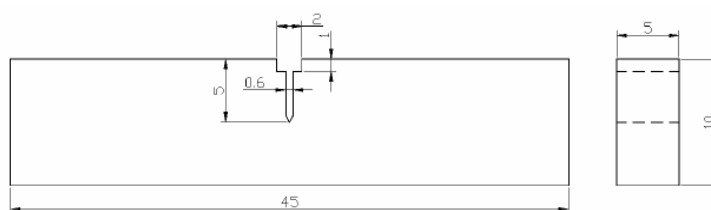


Figura 4 – Medidas do corpo de prova.

A Figura 5 mostra uma foto do corpo de prova usinado faltando, ainda, o devido polimento previsto em norma.

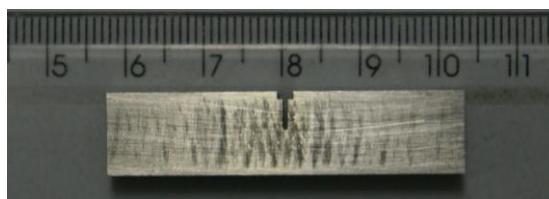


Figura 5 – Corpo de prova.

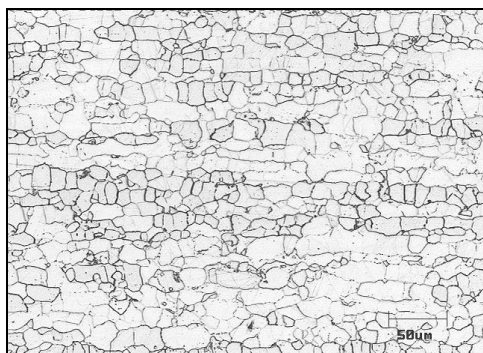
Os ensaios dos corpos de prova foram realizados em máquina de tração servo-hidráulica MTS modelo 810 com capacidade de 10 e 100 kN, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF). A deformação da amostra durante o ensaio de tração é acompanhada pela deformação elástica da própria máquina. O módulo de elasticidade obtido de uma curva registrada diretamente pela máquina de tração é bem diferente daquele característico do material. Por isto que a máquina de tração simula a rigidez infinita, ou seja, compensa a deformação sofrida por ela.

A ranhura realizada na extremidade externa do entalhe, por eletro-erosão, cujo objetivo é fixar o dispositivo que mede a abertura de trinca (Clip-in Displacement Gage). Abriu-se em cada corpo de prova uma pré-trinca de fadiga, de forma a obter um raio de curvatura na extremidade da trinca tendendo a zero (muito pequeno), proporcionando o caso mais crítico para realizarem-se os ensaios.

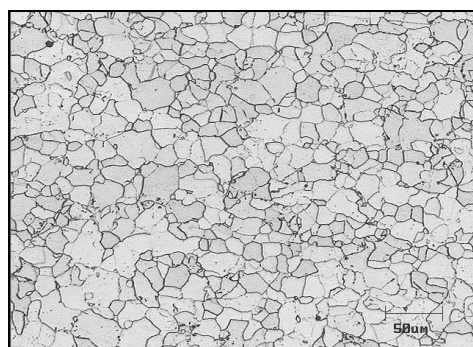
Materiais Utilizados

O material do corpo de prova é o aço inoxidável ferrítico 410S, que é usado em construções de equipamentos para a indústria petroquímica. O aço 410S é considerado ter boas características de soldabilidade para uma ampla variedade de aplicações. Possui grande capacidade de absorção de energia ao impacto, sendo até 100% superior à capacidade do aço carbono comum. As fotomicrografias mostradas nas Figuras 6(a) e 6(b) representam as duas condições, um tipo de tratamento, em forno tipo contínuo, e em dois sentidos, longitudinal à laminação e transversal a laminação.

Utilizaram-se duas condições diferentes, sendo elas: MBC material de base no estado como recebido, obtido em processamento contínuo, isto é, através de tratamento termo-mecânico, com entalhe na direção de laminação e SEC1 material MBC soldado com um aporte térmico 1,4 kJ/mm e entalhe na ZTA na direção de laminação. Neste projeto, para cada condição utilizaram-se dois corpos de prova.



(a)



(b)

Figura 6 – (a) Microestrutura do aço tratado em forno tipo contínuo, como recebido, no sentido longitudinal à laminação. (b) Microestrutura do aço tratado em forno tipo contínuo, como recebido, no sentido transversal à laminação.

As propriedades mecânicas para o aço 410S após os tratamentos são especificadas na Tabela 1.

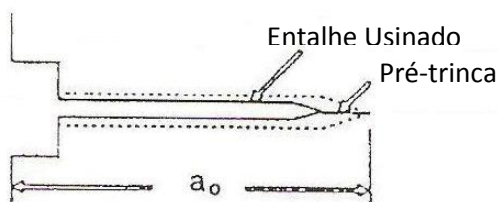
Tabela 1 – Propriedades mecânicas para o aço experimental no modo como recebido.

Tratamento	Limite de escoamento.	Limite de Resistência	Alongamento	Dureza
	(MPa)	(MPa)	(%)	HRB
Contínuo	296,8	412,0	39,8	79
	290,8	411,2	38,7	
	296,1	416,8	39,0	
Média	294,6	413,3	39,2	

O material de depósito (ou seja, o material de solda) é o arame 309LSi.

Resultados e Discussão

O corpo de prova foi confeccionado segundo a norma ASTM E 1820 – 01, porém foi constatado um erro no entalhe usinado, onde o valor de a_o foi apenas o tamanho do entalhe, visto que o valor de a_o , pela norma, é o tamanho do entalhe acrescido do tamanho da pré-trinca obtida em fadiga, como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Tamanho de a_o .^[8]

Este erro acarretou, com isso, uma dificuldade na abertura da pré-trinca, dificultando assim o confinamento da zona plástica. Foram medidas para cada corpo de prova cinco medidas de a_o para obter a média, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Medidas de a_o .

	CP	1ª a_o mm	2ª a_o mm	3ª a_o mm	4ª a_o mm	5ª a_o mm	Média mm	Variação Min. %	Variação Max. %
1º	MBC	5,2	5,29	5,29	5,29	5,24	5,2725	1,4	0,3
2º	MBC	5,17	5,2	5,2	5,2	5,02	5,17375	3,0	0,5
3º	SEC1	5,37	5,59	5,59	5,59	5,29	5,53	4,3	1,2
4º	SEC1	5,45	5,67	5,67	5,67	5,36	5,60	4,3	1,2

Como visto na Tabela 2, a média do tamanho da pré-trinca varia entre 0,27 a 0,60 mm, sendo o ideal, uma pré-trinca no tamanho mínimo de 1,3 mm, como previsto pela norma ASTM E 1820 – 01. A carga aplicada no ensaio é apresentada na Tabela 3, sendo o valor de P_m a carga máxima suportada pelo corpo de prova e P_Q a carga aplicada no ensaio.

Tabela 3 – Cargas aplicadas nos ensaios.

	CP	P _Q (N)	P _m (N)	P _m /P _Q
1º	MBC	1064	2170	2,04
2º	MBC	1148	2258	1,97
3º	SEC1	1404	3654	2,60
4º	SEC1	1450	4074	2,81

Nota-se que, para a mesma condição (SEC1), a carga máxima suportada pelo quarto corpo de prova é 420 N maior que o terceiro corpo de prova da mesma condição. Os dados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados obtidos nos ensaios.

	CP	v _{pl} (mm)	B (mm)	W (mm)	S (mm)	z (mm)	E (MPa)	ν	r _p (mm)
1º	MBC	1,04	4,98	9,86	40,00	0,00	192264	0,3	0,440
2º	MBC	0,99	4,99	9,89	40,00	0,00	192264	0,3	0,440
3º	SEC1	1,30	4,99	9,96	40,00	0,00	192254	0,3	0,440
4º	SEC1	2,39	4,98	9,95	40,00	0,00	192264	0,3	0,440

Com esses valores calculou-se o fator de intensidade de tensão e o tamanho de abertura da trinca. Esses valores foram calculados através das equações descritas na norma ASTM E 1820 – 01, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores obtidos dos cálculos.

	CP	K (N/mm ^{3/2})	K _Q (MPa.m ^{1/2})	K _m (MPa.m ^{1/2})	δ (mm)
1º	MBC	1679,5	26,0	53,1	0,294
2º	MBC	1669,7	26,9	52,8	0,291
3º	SEC1	2976,6	36,2	94,1	0,359
4º	SEC1	3431,7	38,6	108,5	0,631

Sendo K_m a Tenacidade à Fratura e K_Q o fator de intensidade de tensões. Nota-se através dos valores obtidos que o tamanho máximo de abertura de trinca do corpo de prova na condição MBC é menor que na condição SEC1, sendo este suportando uma carga máxima maior. Os valores obtidos para a condição MBC nos dois corpos de prova foram próximos, enquanto na condição SEC1 a diferença dos resultados nos dois corpos de prova se deve, provavelmente, as heterogeneidades metalúrgicas na ZTA.

Observando a Tabela 5, verifica-se que a tenacidade à fratura do aço 410S na condição SEC1 é quase duas vezes maior que na condição MBC. Com isso é possível verificar que o aço na condição SEC1 possui uma melhor resistência à propagação de trinca.

Esperava-se, a priori, que o material soldado possuindo uma trinca em sua ZTA tivesse valores menores de tenacidade à fratura que o material pré-trincado no estado “como recebido”. Assim, torna-se necessário e interessante uma investigação da microestrutura, via microscopia óptica e eletrônica de varredura, além de ensaios de microdureza Vickers, na região da ZTA. Provavelmente, o tamanho de grão e fases metalúrgicas de alta tenacidade na ZTA influenciam positivamente os valores de tenacidade à fratura.

Conclusões

Apesar das limitações quanto ao tamanho dos materiais disponíveis, a priori, para obtenção dos corpos de prova, os resultados obtidos via mecânica da fratura são quantitativamente precisos.

O material soldado contendo uma trinca em sua ZTA apresenta tenacidade à fratura superior ao material de base pré-trincado.

Agradecimentos

A ANP (PRH-29) pela sessão da bolsa de IC a mim concedida.

Ao laboratório de TRICORRMAT da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), onde foi realizado o trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisa em Usinagem – LAUS da Pontifica Universidade Católica do Paraná (PUCPR), pela usinagem dos corpos de provas.

Ao Professor Telmo Roberto Strohaecker da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela realização dos ensaios.

Ao engenheiro de laboratório Leandro Pereira Costa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) pela realização dos ensaios.

Referências Bibliográficas

- [1] Cherlio Scandian. Tese de Doutorado. França, 2000.
- [2] William D. Callister, Jr.. Ciência e Engenharia de Materiais. Editora LTC, quinta edição, 2002.
- [3] Apostila de Fernando Luiz Bastian, Herick Marques Caminha Junior e Marcelo Melo Moraes. Mecânica da Fratura. Novembro/1987.
- [4] Maurizio Ferrante. Seleção de Materiais, Editora Edufscar, segunda edição, 2002.
- [5] T. L. Anderson. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. Editora CRC Press, second edition, 1995.
- [6] C. Bottrel Coutinho. Materiais Metálicos para Engenharia. Editora QFCO, 1992.
- [7] Sergio Solto Maior Tavares. Aços Inoxidáveis. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2009.
- [8] Norma ASTM E 1820 – 01
- [9] Richard W. Hertzberg. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. Editora John Wiley & Sons, third edition, 1989.
- [10] Melvin F. Kanninen and Carl H. Popelar. Advanced Fracture Mechanics. 1985.