

Mecânica da fratura aplicada em juntas soldadas do aço astm A672 GR B em tubulações de processo**Fracture mechanics applied to welded joints in astm A672 GR B steel in process pipes**

DOI:10.34117/bjdv6n7-385

Recebimento dos originais: 03/06/2020

Aceitação para publicação: 16/07/2020

Anderson da Mota Saint' Clair

Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais pela Fundação Centro Universitária Estadual da Zona Oeste do Rio de Janeiro (Uezo)

Instituição: PETROBRÁS S.A. - Terminal Cabiúnas

Endereço: Rodovia Amaral Peixoto, 188 - Cabiúnas, Macaé - RÍo de Janeiro - RJ – Brasil

E-mail: saintclair4@yahoo.com.br

Mauro Carlos Lopes Souza

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Instituição: Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste do Rio de Janeiro (Uezo)

Endereço: Av. Manuel Caldeira de Alvarenga, 1023 – Campo Grande – Rio de Janeiro – RJ
Brasil

E-mail: mauroclsouza@hotmail.com

Bruno Reis Cardoso

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Instituição: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Eletrobrás Cepel

Endereço: Av. Horácio Macedo, 354, Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

E-mail: brunorc@cepel.br

Vladimir Ivanovitch Monine

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Universidade Politécnica de São Petersburgo – Rússia

Instituição: Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ)

Endereço: Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

E-mail: monvlad@mail.ru

Carlos Alberto Martins Ferreira

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Instituição: Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste do Rio de Janeiro (Uezo)

Endereço: Av. Manuel Caldeira de Alvarenga, 1023 – Campo Grande – Rio de Janeiro – RJ Brasil

E-mail: professorcarlosferreira@gmail.com

Neyda de la Caridad Om Tapanes

Doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (IQ/UFRJ)

Instituição: Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste do Rio de Janeiro (Uezo)
Endereço: Av. Manuel Caldeira de Alvarenga, 1023 – Campo Grande – Rio de Janeiro – RJ Brasil
E-mail: neydaom@yahoo.com

RESUMO

Este trabalho avaliou a geração de trincas internas em juntas soldadas em tubulações industriais de aço ASTM A672 grau B. Nessa abordagem foi utilizado o Diagrama de Falhas – FAD, que avaliou descontinuidades planares da estrutura da solda através de ensaios não destrutivos. Foram estudados parâmetros envolvendo mecânica da fratura e os efeitos micro estruturais que contribuem para a avaliação da integridade estrutural. As amostras foram obtidas do Sistema de Flare Geral da Unidade de Hidrotratamento de Diesel localizada no Complexo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro – COMPERJ. Os resultados mostraram que, em juntas soldadas, novos critérios podem ser inseridos na avaliação de defeitos em relação às propriedades mecânicas do material. Após analisar as tensões por difração de raios X, foi possível se avaliar as condições de operação da tubulação, posição, geometria da trinca e as tensões atuantes que contribuem para a análise de peças que seriam reprovadas em testes. Os resultados mostraram também que as tensões geradas sempre relacionam as condições operacionais na linha, envolvendo pressão e temperatura, resultou em posicionamento no diagrama de falhas, em regiões seguras que demonstraram a inexistência de probabilidade de falha do material.

Palavras-chave: Metalurgia da Soldagem, Integridade Estrutural, Mecânica da Fratura.

ABSTRACT

This study evaluated the generation of internal cracks in welded joints in industrial pipes of steel ASTM A672 Grade B. In this approach it was used the Failure Diagram - FAD, which evaluated planar discontinuities in welded structure through non-destructive testing. Mechanical parameters were studied involving fracture and micro structural effects that contribute to the structural integrity assessment. The samples were obtained from the Flare System of the Diesel Hydrotreating Unit located in the Petrochemical Complex of the State of Rio de Janeiro - COMPERJ. The results showed that in welded joints, new criteria can be entered in the defect evaluation in relation to the mechanical properties of the material. After analyzing the stress by X-ray diffraction, it was possible to evaluate the operating conditions of the pipe, position, geometry and active tension that contribute to the analysis of parts that would be disapproved in tests. The results also showed that the stresses generated always relate operating conditions on the line, involving temperature and pressure, resulting in positioning in the failure diagram in secured regions which demonstrated the absence of probability of failure of the material.

Keywords: Welding Metallurgy, Structural integrity, Fracture Mechanics.

1 INTRODUÇÃO

No projeto de uma estrutura que resista à fratura, há três variáveis críticas a serem consideradas: o nível de tensão; o tamanho da trinca e a tenacidade à fratura do material. A mecânica da fratura aborda relações matemáticas entre essas quantidades e é a principal ferramenta para análise de estruturas contendo defeitos. A avaliação da integridade estrutural em juntas soldadas pela da mecânica da fratura, representa uma contribuição no desenvolvimento de procedimentos precisos de

avaliação de defeitos; auxilia etapas do projeto, justificam reparos, favorecem o desempenho do equipamento e evita acidentes, danos pessoais, ambientais e econômicos (ANDERSON, 1991).

A mecânica da fratura linear elástica (MFLE) representa sua base conceitual e surgiu com estudos de Irwin (1961). Segundo a MFLE, tensões e deslocamentos próximos à ponta da trinca, podem ser descritos a partir de um parâmetro denominado G , taxa de liberação de energia e K , fator de intensidade de tensões. Todavia, este estudo é aplicado a materiais de reduzida ductilidade.

Para materiais com maior ductilidade, a teoria da fratura mecânica elasto-plástica (MFEP) identifica os parâmetros para caracterizar o processo de fratura dúctil, desenvolvendo técnicas experimentais para avaliar a resistência à fratura e na definição de métodos de análise. Os cálculos para aplicação dos conceitos desenvolvidos requerem análises complexas, com o uso de métodos numéricos, como o método de elementos finitos (BASTIAN, 1989).

O conceito aplicado é a relação entre as condições de carregamento aplicadas à estrutura e resistência do material, ao crescimento de trinca e fratura. Se a resistência do material à fratura for inferior às condições de tensão-deformação impostas pelo carregamento (e condições geométricas), na ponta da trinca, ocorrerá falha estrutural. As condições aplicadas na ponta da trinca são referidas como força motriz da trinca. Para evitar falhas, a resistência do material deverá ser superior à força motriz da trinca.

Rice *et. al* (1973) desenvolveram parâmetros que caracteriza o comportamento não linear na ponta da trinca: a integral J . Iniciou aí a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica. Nessa mesma época foi desenvolvido o parâmetro COD, usado em fraturas de estruturas soldadas. Coube a Shih (1983), demonstrar existir uma relação entre a integral J e COD. Assim, os conceitos foram unidos e criada a Mecânica da Fratura conhecida atualmente.

1.1 SOLDABILIDADE DOS AÇOS

Os processos de soldagem de metais resultam em propriedades bem complexas, pois, desenvolvem a sensibilidade à fratura da junta e a tenacidade requerida pelas condições de serviço e teste de temperatura.

A microestrutura formada e propriedades mecânicas da junta soldada de aços carbono (C-Mn), de baixa liga são questões que merecem atenção. Os parâmetros: corrente e polaridade, tensão de soldagem, aporte térmico, temperaturas de interpasses e tratamentos térmicos, devem ser observados com critério (FARIAS e QUITES, 1992).

Os fatores que definem a soldabilidade de um aço são: facilidade de ser soldado e seu comportamento em serviço. Dois fatores são fundamentais: suscetibilidade a Trincas a Frio e a Tenacidade da junta soldada (MODENESI, 2005).

O procedimento de soldagem adotado pode variar com o tipo de aço e sua aplicação. Assim, o procedimento para um aço carbono é muito mais simples que para um aço ligado. Os aços desenvolvidos recentemente apresentam uma soldabilidade superior aos antecessores e apresentam resistência à tração bem mais elevada (MARQUES, 2007).

A soldagem por fusão envolve aquecimento de uma pequena região, até atingir a temperatura de fusão localizada, com ou sem adição de metal (BOHORQUEZ, 1989).

A energia utilizada na soldagem gera notáveis alterações nos Metais de Base e Metais de Solda, fundidos, onde um fluxo térmico é estabelecido e, o mesmo, exerce profunda influência sobre muitos aspectos da junta soldada (MACHADO, 2000; GONÇALVES, 2020).

1.2 TENACIDADE, FRATURA DÚCTIL E FRATURA FRÁGIL

A tenacidade é a energia que o material absorve por impacto até sua fratura. Em geral, não é considerada diretamente no projeto de construção. Mas, é importante na seleção de aços estruturais utilizados em condições que resultem em risco de fratura frágil, caracterizada por fratura ocorrendo com deformação plástica do material (CALLISTER, 2000).

Segundo Callister (2000), a fratura dúctil ocorre através de um mecanismo baseado em micro ou macro cavidades (dimples) originados da presença de inclusões ou partículas de segunda-fase na matriz do material. Este mecanismo é baseado na presença de inclusões ou partículas de segunda fase, nucleação de cavidades e coalescimento das cavidades e ligação entre si (CALLISTER, 2000 e ASM METALS HANDBOOK, 1986).

Em geral, a fratura frágil ocorre em materiais que apresentam considerável restrição à deformação plástica. O acúmulo de energia devido a essa resistência é liberado num espaço de tempo curto e associado à presença de imperfeições no material que se transformam em trincas. Superada a resistência do material, incapaz de absorver energia, se propagam sob altas velocidades por não encontrarem resistência, como encruamento, para os materiais dúcteis (VAN VLACK, 1984).

1.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A difratometria de raios x é uma das principais técnicas de caracterização micro-estrutural de materiais cristalinos. É aplicada na engenharia e ciência dos materiais. A radiação atinge o material se espalhando elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons. O fóton de raios x, após interação com o elétron, muda sua trajetória, mantendo a mesma fase e energia do fóton incidente. Os átomos

cujos elétrons geram espalhamento, estão arranjados como uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda incidente. Assim, as relações de fase, entre os espalhamentos, tornam-se periódicos. Esses efeitos são observados em vários ângulos (CULLITY, 1978).

Os átomos que geram este espalhamento estando arranjados de maneira sistemática, como numa estrutura cristalina, apresentam entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente.

Considerando dois ou mais planos de uma estrutura cristalina, as condições para que ocorra a difração (interferência construtiva) vão depender da diferença de caminho percorrido pelos raios x e o comprimento de onda da radiação incidente. Essa condição é expressa pela Lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin \theta$), onde (n) é a ordem de difração; (λ) o comprimento de onda; (d) a distância interplanar e (θ) o ângulo de incidência do raio- x (medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos).

1.3.1 Tensões Residuais

Para um material com granulometria fina e isenta de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação dos planos.

De acordo com Monine *et al.* (2001), a presença de um estado de tensões, num determinado material, faz variar essas distâncias, devido à deformação elástica. Se a tensão aplicada for trativa, a distância entre planos perpendiculares a estas, aumentarão, enquanto que os planos paralelos no campo de tensões, a essas distâncias irão diminuir.

As distâncias interplanares que podem ser medidas indicam uma função de deformação, e assim, caracterizam o campo de tensões residuais atuantes. Aplicando a técnica de difração de raios- x , com o objetivo de se medir as distâncias interplanares, pode-se calcular as tensões residuais.

Na conformação de materiais metálicos é inevitável a ocorrência de tensões residuais. Elas têm sido indicadas e diferenciadas pelos processos tecnológicos que as produzem. Essas tensões são chamadas de tensões residuais de deformação, têmpera, nitretação, usinagem, conformação, soldagem, eletrodeposição, etc. (TIMOSHENKO, 1994)

As tensões num cilindro atuam nas direções longitudinais (σ_L) e circunferenciais (σ_C). O comprimento, o raio e a espessura são conhecidos por: L , r e t . No diagrama de corpo livre de um cilindro, tem-se no equilíbrio das forças, as devidas à pressão, que são iguais às que atuam nas paredes do cilindro e resultam em tensões longitudinais e circunferenciais (LARGURA, 2012). As tensões longitudinais podem ser definidas pela equação (1):

$$2PLr = 2Lt\sigma_c \rightarrow \sigma_c = Pr/t \dots\dots\dots (1)$$

Da mesma maneira, a equação (2), mostra as tensões na seção circunferencial:

$$P\pi r^2 = 2\pi Lrt\sigma_L \rightarrow \sigma_L = Pr/2t \dots\dots\dots (2)$$

1.4 PROPAGAÇÃO CRÍTICA OU FRATURA FRÁGIL

A propagação crítica se dá sem haver deformação plástica significativa. É típica do estado plano de tensões (EPD). Para essa condição, usa-se a Mecânica da Fratura Linear (MFLE), que pode ser traduzida pela seguinte equação: $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$, onde (Y) é o fator geométrico, (σ) a tensão normal aplicada e (a), a dimensão característica da trinca.

A equação acima foi determinada para casos onde a tensão externa aplicada pode ser considerada remota ou aplicada no infinito. Não há interações entre o campo de tensões externo e o campo de tensões na ponta da trinca. Mas, para condições usuais de trabalho essas interações ocorrem intensamente, o que torna necessária uma correção dos valores, através de um fator de correção geométrica conhecida como $f(a/w)$.

Pela MFLE, haverá propagação instável de uma trinca no momento que o valor de K_I , calculado pela equação acima superar o valor da tenacidade do material, K_{MAT} , obtido a partir de ensaios de tenacidade. Assim, o valor de K_{MAT} , passa a ser definido pela equação: $K_{MAT} = \sigma\sqrt{\pi a} f(a/w)$ (IRWIN, 1961).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Utilizou-se o aço carbono ASTM A672 Gr B60 adequado para serviços de média, alta pressão e temperaturas moderadas. Esta especificação abrange tubos contendo costuras e diâmetros iguais ou superiores a 16 polegadas. Para a fabricação destes tubos, são utilizadas chapas de especificação ASTM 515/516. Amostras foram obtidas da seção de uma tubulação de 20 polegadas de diâmetro, com espessura de parede de 10,3 mm empregada no Sistema de Flare Geral da Unidade de Hidrotratamento de Diesel localizada no Complexo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro – COMPERJ.

A tabela 1 apresenta os limites dos elementos químicos do material, estabelecidos pela norma ASTM A-515 Gr B60 que é utilizada para fabricação dos tubos com costura.

Tabela 1 – Elementos químicos previstos no aço ASTM A 515. Adaptado [ASTM]

ELEMENTO (%)	CARBONO	ENXOFRE	SILÍCIO	FÓSFORO	MANGANÊS
	Max. 0,24	Max. 0,035	0,25 – 0,4	Max. 0,035	Max. 0,9

Com base nas informações do projeto, dados do isométrico de construção da linha de interesse como, pressão de projeto ($3,5 \text{ Kgf/cm}^2$), pressão teste ($5,5 \text{ Kgf/cm}^2$) e operação ($1,8 \text{ Kgf/cm}^2$), classe de inspeção (classe IV), temperatura ambiente (23°C), temperatura de projeto (250°C) e operação (175°C) que foram empregadas nas equações matemáticas.

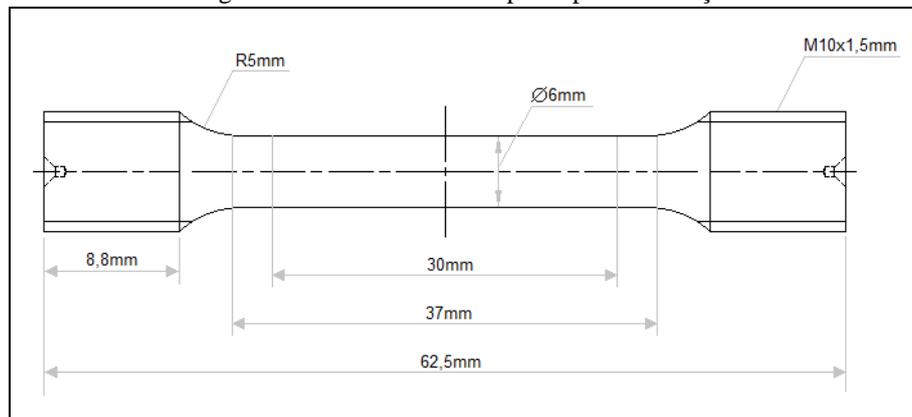
2.2 TESTES METALÚRGICOS E ENSAIOS MECÂNICOS

Após a obtenção da secção do tubo de 20 polegadas do material, as amostras fabricadas foram submetidas a ensaios mecânicos e metalúrgicos nos laboratórios do CEPEL.

2.2.1 Ensaio de tração

Foram confeccionados seis corpos de prova, pela norma DIN EM 10002-1e ensaiados à temperatura ambiente, com taxa de deformação convencional de $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e velocidade do ensaio de 1 mm/min (SAINT' CLAIR, 2014). As dimensões dos corpos de prova são exibidas na figura 1 e as fotos, na figura 2.

Figura 1 – Dimensões do corpo de prova de tração



Fonte: autores, 2019.

Figura 2 – Fotos dos corpos de prova



Fonte: autores, 2019.

2.2.2 Ensaio de Micro Dureza Vickers

Utilizou-se o equipamento BUEHLER modelo Micromet 5103, segundo as normas ASTM E 92-82 (2003) e ASTM E 384-05. No ensaio de micro dureza foram utilizadas cargas de 200 gf, em tempos de 10 segundos.

2.2.3 Ensaio de Impacto (Charpy)

O ensaio de impacto foi realizado a temperatura ambiente (25°C). Os corpos de prova Charpy conforme especificação ASTM A 370 e figura 3, foram retirados no sentido transversal a junta soldada. Tiveram o entalhe centralizado no cordão de solda, na posição vertical e os resultados obtidos correspondem às médias de três corpos de prova.

Figura 3 – Fotos dos corpos de prova submetidos ao ensaio Charpy



Fonte: autores, 2019.

2.2.4 Micrografia e Macrografia

Foi realizada a caracterização micro estrutural do metal base (MB), metal de solda (MS) e zona termicamente afetada (ZTA), da junta soldada, por microscopia óptica.

A microscopia é uma ferramenta muito útil no estudo e caracterização dos materiais ferrosos, principalmente para definir se o material foi tratado ou não de forma correta, além de determinar a composição química, distribuição das fases da estrutura cristalina, densidade, tamanho, forma e estabelecer associações entre as propriedades físicas determinadas e as estruturas ou defeitos presentes no material em questão (TAPANES, 2020).

A macrografia da seção transversal da junta soldada permite avaliar o aspecto da solda, áreas de interface entre o metal base, zona termicamente afetada e metal de solda depositado, sendo possível observar-se o número de deposição dos passes realizados.

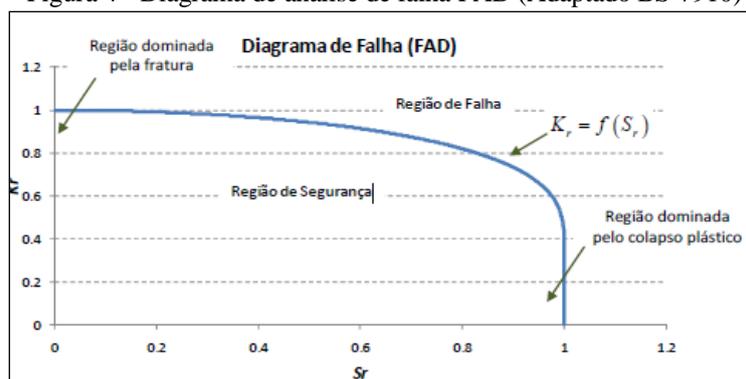
2.2.5 Análise de tensões por difração de raios-x

Utilizou-se o método de “ $\text{sen}^2\psi$ ” baseado na medida do ângulo de difração que caracteriza a posição angular da linha de difração. A principal equação deste método é a expressão da teoria de elasticidade para deformação ($\varepsilon_{\phi,\psi}$) em direção arbitrária.

2.2.6 Metodologia FAD (Failure Assessment Diagram)

Esta metodologia disponibiliza, como instrumento principal, o gráfico da figura 4 onde são plotados dois parâmetros principais num gráfico bidimensional. Estes parâmetros chamados (K_r) e (S_r) abordam a estrutura que contém o defeito em relação à fratura frágil e à fratura dúctil, respectivamente. Pelo diagrama FAD, haverá propagação frágil quando (K_r) superar o valor de (1), e haverá colapso plástico quando (S_r) cair fora da região segura.

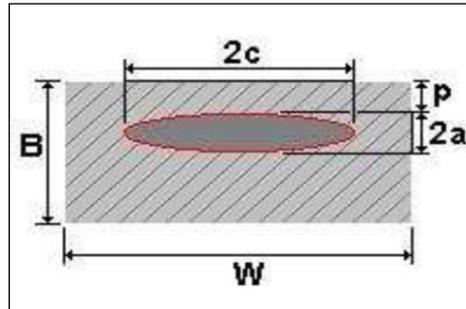
Figura 4 - Diagrama de análise de falha FAD (Adaptado BS-7910)



2.2.7 Critério para avaliação de descontinuidade

As trincas estudadas foram trincas simuladas e do tipo interna. Apresentando $t = B = 10,3$ mm, $c = 5$ mm, $p = 3$ mm, $a = 1$ mm até 3 mm e $w = 500$ mm. Sua geometria e dimensões são mostradas na figura 5.

Figura 5 – Trinca interna



Fonte: autores, 2019.

2.2.8 Determinação da tenacidade à fratura do material

(K_{MAT}) é definido como o valor de tenacidade do material, sendo calculada a partir da equação $K_{MAT} = 36,5 + 3,084 \exp [0,036(T - T_{ref} + 56)]$ descrita da norma API 579. É diretamente relacionada com a temperatura de referência e definida como a temperatura mínima que garante ao material um valor mínimo de tenacidade aceitável pelo código ASME em função do limite de escoamento do material. Valor foi obtido da tabela 9.2 M API 579-1/ASME FFS-1 2007.

$$K_{MAT} = 36,5 + 3,084 \exp [0,036 (23 - 10 + 56)]$$

$$K_{MAT} = 75,59 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$$

2.2.9 Critério de avaliação

Foi adotado o procedimento Nível 2 pela BS-7910 (FAD), considerado o nível mais utilizado em equipamentos de processo, auxiliado pelo diagrama da figura 1, onde foram posicionados valores dos parâmetros K_r e S_r obtidos nas análises.

Para a tensão longitudinal igual a 42,28 Mpa, obtida pelo cálculo da equação (2) usual em análise de resistência dos materiais, que fornecem o valor da tensão principal em função da pressão interna (P), do raio do cilindro (r) e da espessura de parede (t), esta foi considerada como tensão de membrana (P_m). A tensão (P_b) de flexão foi tratada como nula por não haver nenhuma mudança de seção significativa.

Para o valor de Y_{σ} descritos na tabela 2 e definido a partir de $K_I = Y_{\sigma} \sqrt{\pi a}$, sendo $Y_{\sigma} = Mfw$ $[K_{tm}M_{km}M_{mm}P_m + K_{tb}M_{kb}M_{mb} \{P_b + (K_m - 1)P_m\}]$ conforme anexo M da BS-7910:2005 item M.3.4.1.

Tabela 2 - Dimensões das descontinuidades e valores do produto de Y_{σ}

Trincas	w	a	c	p	B	Y_{σ}
A	500	1	5	3	10,3	339,53
B	500	2	5	3	10,3	329,28
C	500	3	5	3	10,3	312,82

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos-de-prova ensaiados apresentaram fratura na região do metal de base e caracterizando, assim, que o metal de solda depositado com os parâmetros de soldagem controlados adequadamente. Os limites de resistências dos corpos de provas apresentaram limites de escoamento (LE) em média igual a 294,5 Mpa e de resistências (LR) em média 449,5 Mpa, este superior ao fornecido na especificação do material igual a 415 Mpa.

3.2 ENSAIO DE DUREZA

As medidas de durezas, isoladas em diferentes pontos da junta soldada, estas abrangendo o metal base, zona térmica afetada e metal solda, apresentaram valores coerentes quando comparados as especificações de soldagem empregadas no processo de soldagem. Lado esquerdo: MB=141,6; ZTA=145,08; Lado direito: MB=137,88; ZTA=157,72 e MS=170,34.

3.3 ENSAIO DE CHARPY

Os resultados obtidos, dos ensaios de impacto de Charpy, para os corpos de prova na temperatura de 25°C do aço ASTM 515 Gr B 60 foram CP1= 77,47 J, CP2= 82,37 J e CP3= 53,93 J. As energias absorvidas foram elevadas quando comparados ao valor de tenacidade do aço naval AH 32, de alta resistência, que possui energia ao impacto de 34 Joules, a $T = 0^{\circ}\text{C}$. Assim, o Aço 515 G B60, oferece valores de tenacidades significativos.

3.4 ENSAIO DE MICROGRAFIA E MACROGRAFIA

A figura 6 exibe uma região da zona fundida. Percebe-se a formação de estrutura de granulação fina. Esta região atinge temperaturas superiores a 1500°, caracterizando a região de maior aporte térmico resultando em um forte crescimento de grão. A figura 7 exibe a região de metal de

solda, evidenciando uma microestrutura composta de ferrita acicular em menor quantidade, e bastante ferrita poligonal. A figura 8 exibe regiões de transição com aspectos de tamanho de grão diferenciados compostos por grãos colunares e finos.

Figura 6 – Microscopia Óptica da Zona Fundida – MO 240x



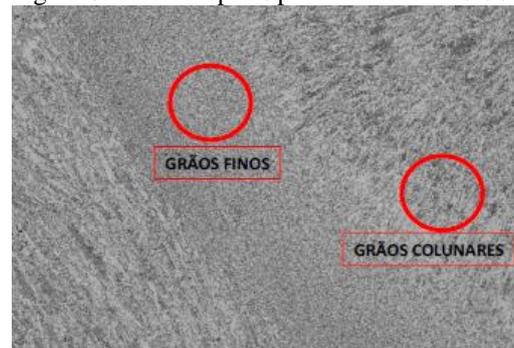
Fonte: autores, 2019.

Figura 7 – Microscopia Óptica do Metal de Solda – MO 400x



Fonte: autores, 2019.

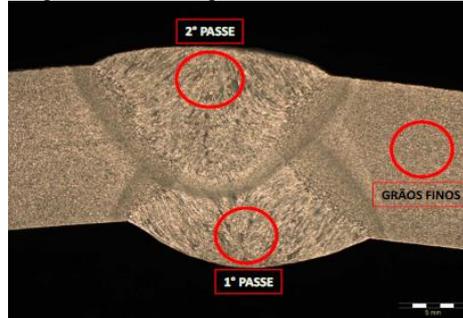
Figura 8- Microscopia Óptica da ZTA. MO 30x



Fonte: autores, 2019.

Comprovou-se, pela macrografia, que foram depositados 2 (dois) passes conforme mostrado na figura 9, observando-se ainda o efeito macroscópico do metal de solda constituído da região colunar (bruta de fusão) e a região reauecida do metal de solda surgida devido ao ciclo térmico exercido pelos passes.

Figura 9 – Macrografia da Junta Soldada.



Fonte: autores, 2019.

3.5 ENSAIO DE ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS

A amostra foi posicionada com diferentes ângulos de difração em relação ao feixe de raio x incidente. Assim, foram avaliadas as tensões transversais e longitudinais com seus resultados apresentados na tabela 3, onde evidencia ocorrência de tensões trativas e compressivas para as regiões denominadas P1, P2 e P3, porém, valores reduzidos quando comparados aos padrões de medição previamente calibrados.

Tabela 3 - Distribuição de tensão

Distribuição da tensão transversal		Distribuição da tensão longitudinal	
Tensão medida por XRD – Transversal (MPa)		Tensão medida por XRD – Longitudinal (MPa)	
Pontos	- σ_x	Pontos	- σ_y
P1 – Centro do cordão de solda	220	P1 – Centro do cordão de solda	100
P2 – Margem da solda	-90	P2 – Margem da solda	70
P3 – Metal base (15mm de margem)	-10	P3 – Metal base (15mm de margem)	-20

3.6 DETERMINAÇÃO DO VALOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO

Os valores obtidos de intensidade de tensões (K_I) e (S_r) foram calculados de acordo com as equações a seguir:

$$\text{Onde: } K_I = Y_\sigma \sqrt{\pi a}; K_r = \frac{K_I}{K_{MAT}}; S_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y}$$

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{P_b + 3P_m \alpha'' + [\{P_b + 3P_m \alpha''\}^2 + 9P_m^2 (1 - \alpha'')^2 + 4\frac{P \alpha''}{B}]^{0,5}}{3\{(1 - \alpha'')^2 + 4\frac{P \alpha''}{B}\}}$$

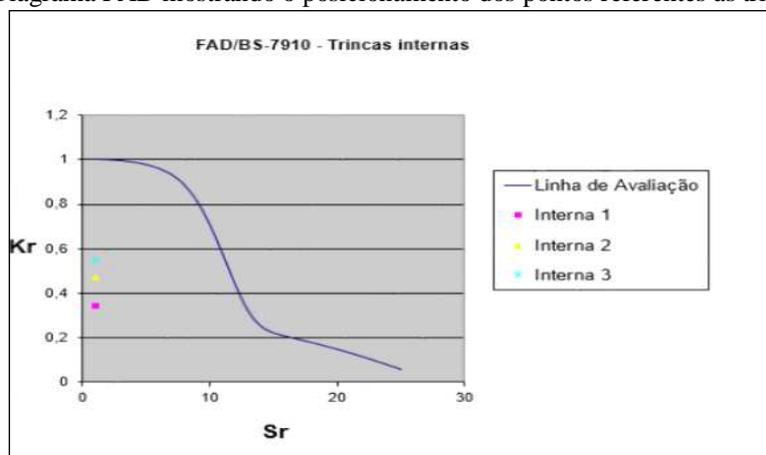
Os cálculos dos parâmetros da intensidade de tensão estão resumidos na tabela 4. Os resultados para as trincas A, B e C, serão interpretados a partir da posição dos pontos resultante no diagrama.

Tabela 4 - Parâmetros de cálculos

TRINCA	a (mm)	KI (MPa√m)	K _r	α''	σ _{ref}	P _m	P _b	S _r
A	1	19,03	0,34	0,063	44,55	42,28	0	0,22
B	2	26,09	0,47	0,127	46,88	42,28	0	0,23
C	3	30,36	0,55	0,190	49,26	42,28	0	0,24

O diagrama de falhas (FAD/BS-7910), para trincas internas, mostrado na figura 7, exibe a curva de K_r versus S_r, no qual apresenta os três pontos na região abaixo da curva.

Figura 10 - Diagrama FAD mostrando o posicionamento dos pontos referentes às trincas avaliadas.



Fonte: autores, 2019.

Cabe salientar que a aprovação destes defeitos com a utilização do diagrama de avaliação falha (FAD) contradiz os conceitos estabelecidos pelo ASME B 31.3, pois o sistema avaliado é caracterizado como classe IV de inspeção, onde estas trincas são inaceitáveis diante da identificação por meio de radiografia ou ultrassom. Contudo, este estudo apresentou critério alternativo de aceitação, reduzindo o nível de conservadorismo apresentado pelo código de projeto e dando ênfase às premissas como propriedades mecânicas do material, certificados de matéria prima e ensaios mecânicos.

Para uma primeira análise, entende-se que os parâmetros utilizados nas avaliações das tensões atuantes nos defeitos estudados e seus respectivos resultados plotados no gráfico na figura 10, estão na região aceitável e segura. Contudo, a pressão de projeto utilizada $3,5 \text{ Kgf/cm}^2$ é considerada uma pressão relativamente baixa diante das demais pressões empregadas em tubulações utilizadas em planta de refino.

Para a trinca com altura igual a 3,0 mm e considerada a mais crítica nesta primeira análise, gerou-se o valor de $K_r \leq 1$, assegurando a não ocorrência de propagação frágil do material. Para os pontos que se apresentaram dentro da curva FAD conforme figura 10, para condição normal de operação, o maior valor de K_I obtido para a trinca de 3,0 mm foi 30,36 conforme apresentado na tabela 4. Situou-se muito abaixo do limite K_{MAT} igual a $75,59 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$. Verifica-se que em situações semelhantes existe uma tendência do material a não falhar por fratura frágil.

A razão S_r apresentou valores na faixa de 0,22 a 0,24 e K_r na faixa 0,34 a 0,55 para a primeira análise caracterizando aprovação das trincas quando aplicada a norma BS-7910.

4 CONCLUSÃO

As tensões que atuam nos defeitos são aceitáveis e seguras. Por outro lado, a pressão de projeto foi considerada baixa, naquelas usadas em tubulações da planta. Mas, os resultados mostraram que trincas com altura de 3,0 mm não provocam propagação frágil do material estudado. Assim, para pontos dentro da curva FAD, em condições normais de operação, tende não ocorrer fratura frágil, sinalizando que o material não irá falhar. De acordo com a Norma BS-7910, os valores obtidos para a Razão S_r , as trincas surgidas podem ser aprovadas, sem risco para as tubulações. Cabe salientar que a aprovação destes defeitos com a utilização do diagrama de avaliação falha (FAD) contradiz os conceitos estabelecidos pelo ASME B 31.3, pois o sistema avaliado é caracterizado como classe IV de inspeção, onde estas trincas são inaceitáveis diante da identificação por meio de radiografia ou ultrassom. Contudo, este estudo apresentou critério alternativo de aceitação, reduzindo o nível de conservadorismo apresentado pelo código de projeto e dando ênfase às premissas como propriedades mecânicas do material, certificados de matéria prima e ensaios mecânicos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Mauro C. L. Souza, pelo uso do Laboratório de Tratamentos Térmicos – LTT/UEZO, instalado com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do RJ – FAPERJ.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Fitness-for-service: Recommended Practice API- 579.1ª Ed, New York: ASTM 2001.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for line pipe**. Washington, 2004. (API Specification 5L)

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Vasos de pressão, Seção VIII – Divisão II. Rio de Janeiro: **Instituto Brasileiro de Petróleo**, 1983.

ANDERSON, T. L., Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications [S. I.]: **Ed. CRC Press**, Boca Raton, Fl. USA, 1991.

ASM. Metals Handbook. Vol. 11. **Failures Analysis and Prevision**. 9ª Ed. USA: ASM, 1986.

BASTIAN, F. L, CAMINHA, H. M., MORAIS, M., Mecânica da Fratura, **Apostila do PEMM/COPPE/UFRJ**, 1989.

BOHORQUEZ, C. E. N., BUSCHINELLI, A. J. A., Previsão da Dureza Máxima na Zona Afetada pelo Calor. In: **Anais do ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM**, São Paulo, 1989,

BS 7910 -Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metal structures. **British Standards Institution**, London, 1999.

CALLISTER, J. R., Materials Science and Engineering - An Introduction, 5st Edition, **John Wiley & Sons**, 2000.

CULLITY, B. D., Elements of X-Ray Diffraction, 2nd Edition, **Addison Wesley**, 1978.

FARIAS, I. P., QUITES, A. M., Fatores que Influenciam a Microestrutura e as Propriedades Mecânicas do Metal de Solda do Aço C-Mn e Baixa Liga. In: Latin American Regional Welding Congress, 1992, Rio de Janeiro. **Anais: Associação Brasileira de Soldagem**, abril de 1992. P 371-386.

GONÇALVES, M.P.; BASTOS, J.S.; FERREIRA, C.A.M.; DIAS, J.S. Study of the effect of pre and post-heating on the waste joint of sar 80T steel by submerged arc welding process. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n.6, 2020, 38058-38077.

IRWIN, G. R., Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness. **In: Sagamore Research Conference Proceedings**, Vol. 4, 1961.

JÚNIOR, E.H. Investigação Experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência $J-\Delta a$ para previsão de colapso em dutos. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia. São Paulo, 2004.

LARGURA JR., L. C. Projeto de estruturas soldadas: **ISES: SENAI-RJ**. Rio de Janeiro:[s.n., s.d.].

MACHADO, I. G., Condução de Calor na Soldagem – Fundamentos e Aplicações, 1ª. Edição, Porto Alegre, 2000.

MARQUES, V. P., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., Soldagem – Fundamentos e Tecnologia, 5ª. Edição, **Editora UFMG**, 2005.

MODENESI, P. J., Introdução à Física do Arco Elétrico na Soldagem, 1ª. Edição, Editora UFMG, 2002,

MONINE, V. I., TEODOSIO, J. R., GUROVA, T. A., Study and service control of stress state of high-strength steel cables used in prestressed concrete structures. *Advances in X-Ray Analysis*, Newtown Sq., Pennsylvania, USA, v. 44, pp. 195-200, 2001.

RICE, J. R., PARIS, P. C., MERKELE, J. G., Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates Progress in Flaw Growth and Fracture Testing, **ASTM STP 536**, Philadelphia, Pa., V. 1, p 231-245, 1973.

SAINT' CLAIR, E. M., Mecânica da Fratura Aplicada em Tubulação de Processo, Dissertação de MSc. Apresentada ao Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais da **UEZO**, defendida em 2014.

SHIH, C. F., “Relationship between the J-integral and the Crack Opening Displacement for Stationary and Extending Cracks [S. I.]”: “**Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Vol. 29.

TAPANES, N.C.O; SANTOS, A.A.; SANTANA, A.I.C.; SILVA, N.C.; GAIDZINSKI, R.; PEREZ, R. S. Anticorrosive for the use of microalloyed steel in contact with high sulfur diesel in maritime vessels. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n.6, 2020, 36929-36949.

VAN VLACK, L. H., Elements of Materials Science, 1st. Edition, **Addison Wesley Publishing Company**, 1964.