

# TENACIDADE À FRATURA DE SOLDAS DE MASTRO DE SONDAS DE PERFURAÇÃO\*

*Abraão Santos Silva<sup>1</sup>  
Otavio Monteiro de Oliveira<sup>2</sup>  
Bruno Souza Fernandes<sup>3</sup>  
Alessandra Gois Luciano de Azevedo<sup>4</sup>  
Sandro Griza<sup>5</sup>*

## Resumo

Juntas soldadas são regiões críticas quanto a fraturas. Neste estudo foi analisada a tenacidade à fratura de soldas de reparo de tubos de mastros de sonda de perfuração de petróleo. Foram escolhidos os tubos principais de sustentação dos mastros. Seções do mastro são corriqueiramente reparados por soldagem TIG de raiz e preenchimento por eletrodo revestido. Estes processos provocam modificações metalúrgicas na zona termicamente afetada da solda, o que pode ter reflexo na tenacidade à fratura dos tubos. Foram produzidos corpos de prova para medir a tenacidade à fratura do metal base e da zona afetada termicamente. Os resultados indicaram que não houve redução de tenacidade a fratura devido as alterações microestruturais da zona afetada e isto foi associado ao procedimento de soldagem multipasses utilizado.

**Palavras-chave:** Mecânica da fratura; Sonda de perfuração; Soldagem.

## FRACTURE TOUGHNESS OF WELDED DRILLING RIGS MAST

### Abstract

Welded joints are critical regions for instable fractures. In this study we analyzed the fracture toughness of the oil drilling rig mast pipe repair welds. The main pipe support the masts were chosen. Mast sections are routinely repaired by TIG welding and root filling by sheathed electrode. These processes cause metallurgical changes in the heat affected zone of the weld, which can be reflected in the fracture toughness of the tubes. Specimens were produced to measure the fracture toughness of the base metal and heat affected zone. The results indicated that there was no reduction in fracture toughness due to the microstructural change of the affected area and it was associated with multipass welding procedure used.

**Keywords:** Fracture mechanics; Drilling rig; Welding.

<sup>1</sup> *Engenheiro de Materiais, Pesquisador, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Petrobras, Aracaju, Sergipe, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenharia de Materiais, Estudante, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheira Mecânica, Doutora em Engenharia Mecânica, professora adjunta, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia de Materiais, professor efetivo, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A tenacidade à fratura refere-se ao quanto um material resiste à propagação de uma trinca. A tenacidade à fratura é um valor próprio do material, e pode ser estabelecido por diversos valores, entre eles os parâmetros:  $K_{Ic}$  e CTOD. Estes são referentes à Mecânica da Fratura Linear Elástica e Mecânica da Fratura elastoplástico, respectivamente [1].

A mecânica da fratura (MF) é uma ciência relativamente nova, proveniente da necessidade de entendimento do comportamento de estruturas sujeitas a presença de defeitos. O desenvolvimento da MF foi estimulado após grandes tragédias no cenário mundial como: O afundamento do navio “*Titanic*” e dos navios das séries “*Liberty*”; da queda dos aviões “*Comet*” e a plataforma petrolífera “*Keilland*” em 1980 [2].

A mecânica da fratura considera os defeitos presentes no material diante de uma tensão local. A intensidade de tensões na ponta da trinca é o que define a severidade da carga, e permanece em estado aceitável até que se atinja um valor crítico chamado de tenacidade à fratura do material,  $K_{1C}$ .

A mecânica da fratura realiza uma análise sobre a resistência que cada material tem a propagação de uma trinca até uma condição instável, ou seja, é uma estimativa quantificada do comportamento da fissura. Esta avaliação é prevista por normas tais como a ASTM 399 [3], ASTM1820 [4] e BS 7448 [5]. O resultado é uma resposta sobre a segurança operacional do conjunto determinada por um fator de intensidade de tensões na ponta da trinca,  $K_t$ , que não poderá atingir o seu valor máximo  $K_{1C}$  intrínseco de cada material [6].

O fator de intensidade de tensões ( $K$ ) varia de acordo com a espessura do material, onde a medida que se diminui a espessura do material passa-se de um estado plano de deformações para um estado plano de tensões. A Equação 1 apresenta o critério para que ocorra o estado plano de deformação [1].

$$B \geq 2,5 * \frac{K_{1C}^2}{\sigma_{YS}^2} \quad (1)$$

Onde:

- B- Largura do corpo
- $K_{Ic}$ - Fator de Intensidade de tenções
- $\sigma_{YS}$ - Tensão de escoamento

Sondas de perfuração para a extração de petróleo possuem em sua forma intrínseca mastros estáticos responsáveis em realizar as operações com os tubos de perfuração. Em muitas situações, estes mastros são reparados para manter a sua integridade estrutural. Todos estes reparos envolvem soldagem.

Toda junta soldada provoca alterações metalúrgicas em torno do cordão de solda. Esta região chamada de zona termicamente afetada ou ZTA é compreendida pela faixa onde o metal de base sofreu alterações devido ao alto ciclo térmico sofrido pelas altas temperaturas atingidas em sequência a um resfriamento abrupto.

Apesar de seguir rigorosas normas no processo de soldagem de reparos, a tenacidade à fratura da ZTA pode ser alterada em relação ao do metal base. Caso ocorra o aparecimento de trincas neste equipamento, estas poderão se propagar de formas diferenciadas dependendo dos valores de tenacidade a fratura de cada região. Desta forma este estudo tem como objetivo obter valores de tenacidade à fratura (CTOD), tanto nas regiões próximas ao cordão de solda (ZTA) quanto no metal de base, a fim de compará-los.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo visa obter uma relação entre a tenacidade à fratura do material base e de uma pequena parte da ZTA, chamada de região de grãos grosseiros. Esta última geralmente provoca regiões mais fragilizadas devido ao tamanho de grão ter sido aumentado devido à exposição a altas temperaturas em certo tempo durante a soldagem. O estudo realizado visa pesquisar as intervenções de reparo nos tubos estruturais verticais do mastro da sonda de perfuração. Historicamente ocorre a necessidade de reparo deste mastro quando apresentam fissuras oriundas das solicitações cíclicas. Redução de espessura procedente de corrosões alveolares também é critério para reparar este equipamento.

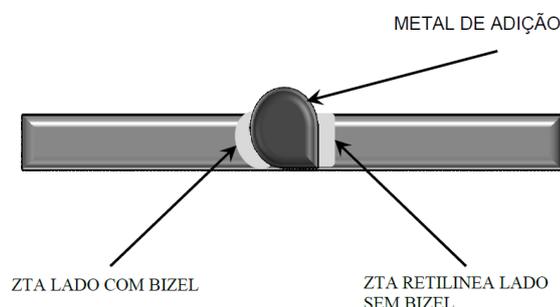
O tubo do mastro tem as seguintes dimensões e características: material: aço ao carbono micro ligado com manganês; diâmetro externo: 6"; espessura: 16 mm.

Devido às limitações de espessura de projeto, tensão de escoamento e módulo de elasticidade conclui-se que não se pode obter um ensaio de  $K_{Ic}$  válido por não conseguir ensaiar em estado plano de deformações. Como o material analisado é um aço ao manganês (SAE 1320) com tensão de escoamento de 405 MPa e módulo de elasticidade de 206 GPa [7] a espessura teria de ser muito maior que 100 mm, impossibilitando o teste de  $K_{Ic}$ . Devido a esta limitação optou-se em adotar o parâmetro elastoplástico CTOD - "Crack Tip Open Displacement". O corpo de prova a ser confeccionado será conforme permitido pela BS 7448: Part 2:1997. Esta norma foi escolhida por permitir curvatura nos corpos limitada a (2,5%) W.

### 2.1 Determinação do Tipo de Chanfro

Extraíu-se de um trecho intacto de reparos anteriores um pedaço de aproximadamente 500 mm que em seguida foi cortado em dois. Um deles usinou-se um chanfro angular e o outro em formato retilíneo formando um bivel em formato de semi-V ou "K" conforme ilustrado na Figura 1.

A necessidade do chanfro semi-V ou "K" é para obter a ZTA o mais retilínea possível, para propagação da trinca do corpo de prova em uma microestrutura mais homogênea [8]. Como o objetivo do estudo é a avaliação da junta soldada em duas posições, determinou-se que o alvo para posicionamento do entalhe para a realização do ensaio CTOD será a ZTA grosseira. Segundo a norma BS 7448, ao determinar-se a microestrutura a ser analisada, esta deve compor no mínimo 75% da seção a ser fraturada.



**Figura 1** - Preparação inicial para soldagem do tubo para retirada dos corpos.

Para aumentar as chances de se obter uma ZTA uniforme soldou-se um cordão na face reta do chanfro com (GTAW-"Gas Tungstein Arc Welding") com corrente

contínua direta a (14.4 V-140 A com o eletrodo ER-70S-3 de 1/8"). Este processo é comumente chamado de "amanteigamento".

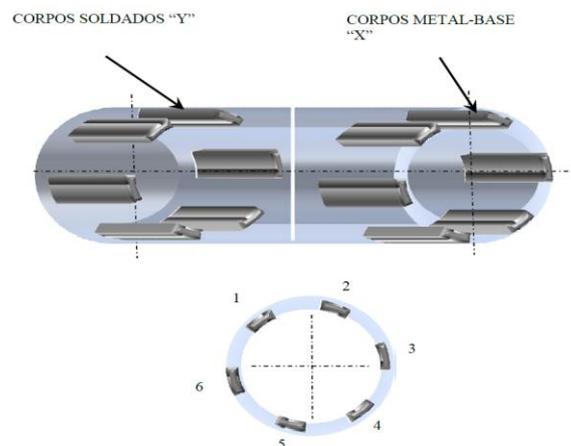
Posteriormente iniciou-se a soldagem dos dois tubos. Para a raiz soldada foram empregados os mesmos parâmetros do processo anterior e para os passes de enchimento foi utilizado o processo com eletrodo revestido ou SMAW- "*Shield Metal Arc Welding*". Este último, do tipo E7018 com diâmetro de 1/8" realizou o restante da soldagem em multipasses com 120 A em corrente contínua até o final do preenchimento. Este procedimento é aplicado normalmente nos reparos deste equipamento, somente se diferenciando pelo tipo do chanfro. O tubo já soldado foi usinado em torno mecânico para retirar a excentricidade entre os tubos e uniformizar a espessura com 10 mm.

A partir desta usinagem pôde-se retirar o desalinhamento dos corpos obedecendo as tolerâncias impostas pela norma BS-7448.

Os tubos estruturais são na grande maioria dos reparos soldados com um cordão circular em toda a circunferência do tubo. Os corpos de prova foram retirados do tubo experimental de acordo com a Figura 2 sendo distribuídos com cordão de solda "Y" e somente com metal de base "X". Os corpos foram dispostos perpendiculares ao cordão de solda, porém o entalhe ficou posicionado paralelo ao cordão de solda, classificando o corpo como "NP".

Para os casos de corpos "Y", ou seja, ZTA grosseira há a necessidade de micrografia para determinação da posição exata dos grãos grosseiros. Todos os corpos "Y" foram devidamente lixados com lixas para aço de granulometria até 1200 Mesh, e posteriormente polidos com pasta de diamante sintético com granulometria de 6  $\mu\text{m}$ . Em seguida foi realizado o ataque com uma solução de Nital a 5% (ácido nítrico 5% diluído em álcool) revelando a microestrutura no microscópio ótico a magnificação de 50X.

Ao visualizar a amostra no microscópio ótico, pôde-se marcar com um risco a posição para futura construção do entalhe. A posição ficou definida como afastada aproximadamente em 1mm da fronteira do metal de adição. A marcação para o entalhe foi realizada na face reta da junta semi-V. Realizada a marca, os corpos foram encaminhados para confecção dos entalhes por eletro-erosão, de acordo com a figura 3.

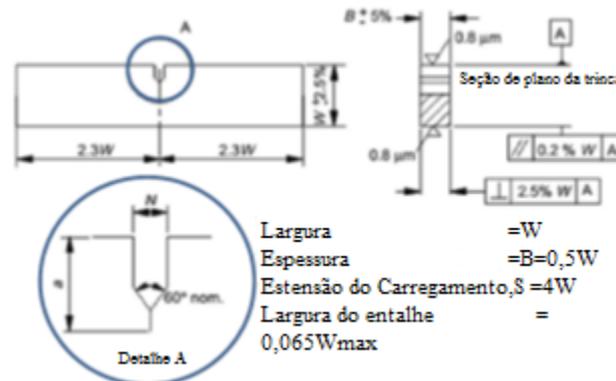


**Figura 2** – Esquema de retirada dos corpos de prova.

As dimensões estabelecidas para o corpo de prova são:

- B – 10mm;
- W – 20mm;

- S – Maior que 80mm menor que 100mm;
- a – Deve estar entre 0,45W e 0,70W. (9mm e 14mm).
- N – 1,3mm;



Comprimento nominal da trinca,  $a = 0,45W$  a  $0,7W$

**Figura 3** – Geometria do entalhe destacado no círculo azul. [5]. Adaptado pelo Autor.

A medida (a) compreende toda seção considerando já a existência da pré trinca de fadiga que deve estar no parâmetro citado acima. Desconsiderando a pré-trinca usamos o entalhe com a profundidade mínima de 9mm.

Na face superior dos corpos foram realizados quatro furos de 2,5 mm e em seguida aplicou-se o macho de roscar M3x0,5 mm. Estes furos foram feitos para fixação da cunha que prende o “clip-gage”, responsável pelo registro do deslocamento COD. Confeccionou-se uma base e três pontos para dispor os corpos na máquina de ensaio.

Os corpos foram relixados para retirada da marca de alvo nos corpos do tipo “Y” e obter uma superfície com acabamento em lixa de grão 1200 em ambas as faces para visualização da pré-trinca.

Em seguida os corpos foram colocados na máquina “MTS Landmark” modelo 3010 com célula de carga de 100 kN e controlador “flex-test” 40. O Software utilizado foi o “Multipurpose Elite” e “Multipurpose Testware”.

Iniciando os testes estimulou-se a pré-trinca de fadiga para se obter um (a0), com uma força calculada pela Equação 4, com uma frequência de 30 Hz.

$$F_f = \frac{B(W-a)^3 * (\sigma_y + \sigma_R)}{4S} \quad (4)$$

Onde:

- B-espessura do corpo
- W-Largura do corpo
- a- Pré trinca
- $\sigma_y$ -Tensão de escoamento
- $\sigma_R$ -Tensão de ruptura

Uma medida aceitável de trinca de fadiga é no mínimo de 1,3 mm da linha de usinagem, e também compreendida na faixa de 0,45W até 0,55W. Esta trinca é obtida pela própria máquina de ensaio através da estimulação por fadiga do corpo sob flexão. O comprimento total da trinca (a0), pode ser limitado com a ajuda da máquina de ensaio, pois através da leitura do “clip-gage” o “software” da máquina consegue determinar o ponto máximo de abertura da trinca.

Imediatamente depois da abertura da pré-trinca, pôde-se ensaiar o material exercendo uma força na superfície contrária a abertura do entalhe (mesma posição

também na abertura da pré trinca), contudo de forma constante com a aplicação de uma carga monotônica. Os corpos são ensaiados em uma base disposta em três pontos até que aconteça uma queda brusca de resistência limitada pela máquina.

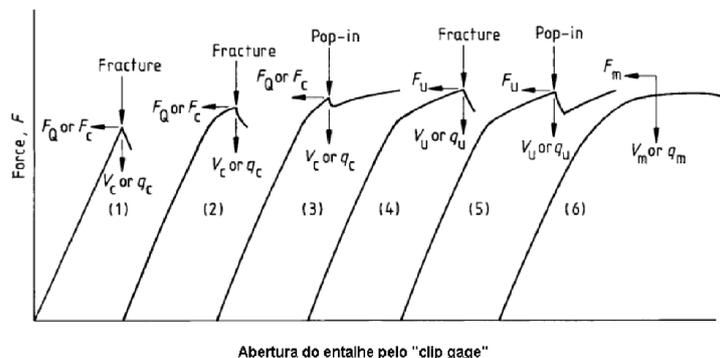
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de flexão nos fornece valores de força em (kN) e deslocamento do “clip-gage” (mm). Através destes pontos foi confeccionado um gráfico Força “versus” COD. A partir deste gráfico foi necessário tratar as informações para conseguir dois valores indispensáveis no cálculo do CTOD:

- Fm- Força máxima alcançada.
- Vp- Componente plástico do comportamento do deslocamento de abertura do entalhe.

O valor de F pode ser assumido de diversas formas a partir do comportamento do material, ou seja, caso apareçam “pop-ins” nos ensaios, como nos gráficos (5) e (3) da Figura 4. “Pop ins” são manifestações do material devido a um crescimento instável em uma região de baixa tenacidade seguida de um crescimento estável em uma região vizinha de mais tenacidade [1]. Nestes casos deverão assumir valores diferentes. Como os ensaios não manifestaram “pop-ins” maiores que 5% assumiu-se o cálculo de Fm como no tipo (6) ilustrado na Figura 4.

Para o cálculo de Vp precisa-se, primeiramente, de uma regressão linear no trecho elástico do ensaio, estendendo-o o suficiente para alcançar valores próximos ao máximo da curva obtida, vide gráfico (6) na Figura 4. A partir do ponto máximo da curva (Fm – eixo “Y”) obtém-se o valor (COD – eixo “X”) correspondente a este ponto. Com uma reta paralela ao eixo “X”, que passa no ponto máximo, obtém-se outro ponto no cruzamento da reta projetada a partir do comportamento elástico do material. A diferença dos valores CODs é o valor de Vp.



**Figura 4** – Modos de comportamento do gráfico Força x COD [5].

Para a validação dos ensaios precisa-se medir a pré-trinca, realizada em nove medidas igualmente espaçadas. As duas medidas externas devem estar afastadas da extremidade do corpo no máximo a 1% de B. Primeiramente faz-se uma média das duas medidas externas. Em seguida somam-se esta média com os sete pontos restantes dividindo novamente por oito, obtendo (a0).

Esta média pondera a significância das medidas externas que se comportam diferentemente das outras devido ao comportamento da propagação de fadiga. Para os corpos de tipo “X” a diferença aceitável é de 10%, já para corpos do tipo “Y” podem ter diferenças de 20% devido às alterações metalúrgicas oriundas da

soldagem. Com os valores de  $F_m$  e  $V_p$  pode se calcular o valor do CTOD através da Equação 5:

$$CTOD = \left[ \frac{F \cdot S}{B \cdot W^{1,5}} * f \left( \frac{a_0}{W} \right) \right]^2 * \frac{(1-\nu^2)}{2 * \sigma_Y * E} + \frac{0,4(W-a_0) * V_p}{(0,4W + 0,6a_0 + z)} \quad (5)$$

Onde:

- F- força aplicada;
- S-“span” ou distância dos centros dos roletes;
- B- Espessura dos corpos de prova;
- W- largura do corpo de prova;
- $\nu$ - Coeficiente de Poisson;
- z- Altura da cunha do “clip-gage”.
- $a_0$ - Pré trinca;
- $V_p$ - deformação plástica.

O índice  $f(a_0/w)$  para corpos de flexão SEM(B) foi conforme usando a Equação 6:

$$f \left( \frac{a_0}{W} \right) = \frac{3 * \left( \frac{a_0}{W} \right) * \left( 1 - \left( \frac{a_0}{W} \right) \right) * \left( 2,15 - \left( \frac{3,93 a_0}{W} \right) + \left( \frac{2,7 a_0^2}{W^2} \right) \right)}{2 * \left( 1 + \frac{2 a_0}{W} \right) * \left( 1 - \frac{a_0}{W} \right)^{1,5}} \quad (6)$$

Através do ensaio obteve-se uma tabela com duas colunas principais: COD(mm) e Força (N). O gráfico está ilustrado na Figura 5 em vermelho. Com o auxílio de outro “software” o BrOfficeCalc da empresa ORACLE, pode-se obter a força máxima ( $F_m$ ) apontada com um triângulo preto no gráfico da Figura 5. A partir deste valor foi realizada uma regressão linear da parte elástica do gráfico vermelho (valores de 0 a 4,5 kN) obtendo a equação: ( $Y=49,661X$ ). Em seguida foi adicionada uma nova coluna na tabela do BrOfficeCalc com a fórmula da equação para obter valores de força até que fosse possível aproximar a força máxima ( $F_m$ ). Este valor ( $F$ ) está representado pelo quadrado preto do gráfico azul na Figura 5.

Com os dois valores “Y”, ( $F_m$ ) do ensaio e ( $F$ ) da equação de regressão linear pode-se adquirir os seus respectivos valores “X” que são os valores de COD em milímetros. O valor do COD da força máxima ( $F_m$ ) foi subtraído do COD da força obtida da regressão ( $F$ ) obtendo o ( $V_p$ ) que é a parcela exclusivamente plástica da abertura do COD.

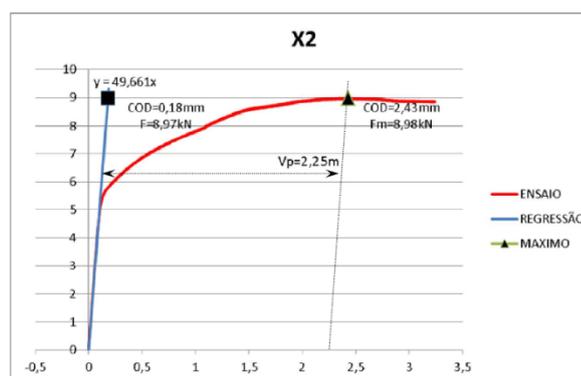
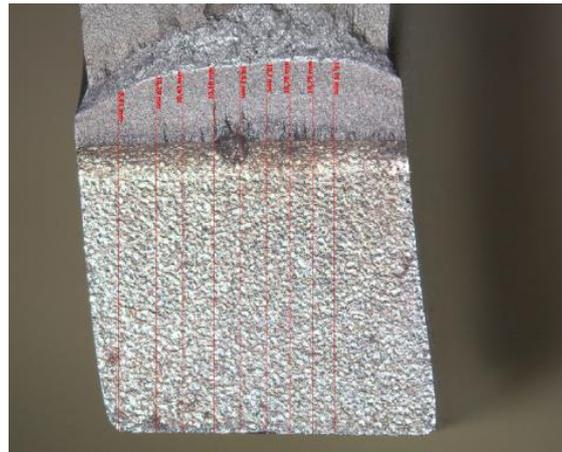


Figura 5 – Gráfico Tensão X COD do corpo X2 com valores máximo de  $F_m$  e  $V_p$ .

Com os corpos já ensaiados foi analisada, com o auxílio de uma lupa, uma das superfícies de fratura para realizar as medidas e o registro fotográfico. As nove medidas estão representadas pelas cotas em vermelho da extremidade do corpo até o final da pré-trinca aberta, conforme pode ser observado na Figura 6.

A partir das nove medidas fez-se uma média entre as duas medidas externas (laterais). A partir desta primeira média somou-se com as sete medidas restantes, dividindo-se por oito, obtendo (a0). Esta média foi realizada desta forma devido à trinca de fadiga assumir um formato circular na frente da trinca, e sendo mais acentuada nas extremidades.

A curvatura da trinca de fadiga é aceitável até um limite 10% entre (a0) e a medida da cota para materiais não soldados. A tabela anexada na Figura 6 apresenta os valores calculados. Caso alguma medida exceda os 10% em relação ao (a0) o ensaio deverá ser anulado. O mesmo procedimento foi feito para as outras amostras, gerando a tabela 1.



A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
9,81	10,29	10,43	10,56	10,62	10,70	10,76	10,75	10,76
-6,00%	-1,40%	-0,06%	1,19%	1,76%	2,53%	3,10%	3,01%	3,10%
MÉDIA LATERAL								10,29
MÉDIA CENTRAL								10,59
MÉDIA TOTAL								10,44

**Figura 6** – Imagem de uma das seções do corpo X2 com as cotas de comprimento da pré trinca.

**Tabela 1:** Valores de COD (mm) de todos os CP's ensaiados.

CORPO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	MÉDIA		
										CEN.	LAT.	TOTAL
X2	9,81	10,29	10,43	10,56	10,62	10,7	10,76	10,75	10,76	10,59	10,29	10,44
X3	10,08	10,21	10,32	10,47	10,6	10,73	10,91	10,96	10,8	10,60	10,44	10,52
X4	10,08	10,37	10,4	10,37	10,3	10,27	10,19	10,06	9,85	10,28	9,97	10,12
Y1	11,3	10,57	10,19	10,99	9,35	11,31	11,13	10,54	9,88	10,58	10,59	10,59
Y2	10,05	10,4	10,89	11,06	11,02	11,06	11,99	11,06	10,33	11,07	10,19	10,63
Y3	10,12	10,35	10,3	10,2	10,14	10,19	10,16	10,22	9,98	10,22	10,05	10,14

Para o cálculo do CTOD de cada corpo foram adotados os seguintes dados de entrada nas Equações(5) e (6).

- Tensão de escoamento  $\sigma_y = 405$  MPa;
- Módulo de elasticidade  $E = 206$  GPa;
- Medidas do corpo de prova:  $B = 10$ mm e  $W = 20$ mm;
- Distância dos apoios fixos:  $S = 80$  mm;
- Altura da cunha do “clip-gage”:  $Z = 2$ mm;
- Coeficiente de Poisson;  $\nu = 0,33$

A Tabela 2 apresenta os valores de  $f(a/W)$  e CTOD calculados.

**Tabela 2 – Valores de  $f(a/W)$  e CTOD calculados dos corpos de prova.**

	$f(a/W)$	CTOD (mm)	CTOD MÉDIO (mm)	CTOD Desv. Padrão (mm)
<b>X2</b>	2,86	0,56	0,63	0,07
<b>X3</b>	2,9	0,63		
<b>X4</b>	2,72	0,7		
<b>Y1</b>	2,82	0,73	0,82	0,09
<b>Y2</b>	2,95	0,82		
<b>Y3</b>	2,72	0,91		

Os valores de CTOD apresentados pelos ensaios e em seguida pelos cálculos não apresentaram grandes variações entre as mesmas espécies de corpos X ou Y, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Os valores médios de CTOD dos corpos soldados “Y” ( $0,82 \pm 0,07$ mm) superaram os valores médios dos corpos não soldados “X” ( $0,63 \pm 0,09$  mm) em 30,15%. Quanto maior o valor de CTOD mais tenaz é o material, ou seja, maior deformação antes de atingir fratura instável. No estudo realizado por [9], os corpos soldados apresentaram um decréscimo de tenacidade em torno de 16%, contudo não ficou explícito em qual região da solda realizou-se o entalhe de abertura.

O valor de CTOD é uma representação de tenacidade a fratura elasto-plástico que denota a maior abertura na ponta da trinca antes que se propague instavelmente [1]. O acréscimo de tenacidade à fratura dos corpos soldados “Y” pode ser explicado devido à aplicação de soldagem multipasses no procedimento de soldagem que provoca alívio de tensões, e recristalizações, conforme observado por [10].

Como limitação desse estudo, destaca-se que apenas um segmento de tubo foi testado. Seria mais adequado produzir mais corpos de prova de pelo menos mais dois tubos soldados a fim de obter uma diferença estatística aceitável entre as duas regiões do tubo. No entanto, os resultados desse estudo indicam a tendência de não se perder tenacidade a fratura a partir do procedimento de reparo aplicado.

Neste sentido os reparos que envolvam substituições de seções dos mastros das sondas de perfuração não impactarão significativamente no desenvolvimento das trincas (que eventualmente possam aparecer) independentes de sua localização; seja na ZTA ou no Metal de Base.

#### 4 CONCLUSÃO

A tenacidade à fratura nos corpos soldados apresentou valores maiores em relação aos valores dos corpos não soldados.

Portanto, o procedimento utilizado nos reparos de soldagem circunferenciais nos mastros das sondas de perfuração não impactou significativamente nos valores de

tenacidade a fratura do material. Apesar de apresentarem modificações metalúrgicas devido à soldagem, os corpos ensaiados não apresentaram alterações expressivas na resistência à propagação a trinca no regime elastoplástico.

### Agradecimentos

CNPQ, Finep, Capes, FAPES, PETROBRÁS,

### REFERÊNCIAS

- 1 Donato; G. V.P., Hippert; E., Curso Mecânica da Fratura. Universidade Petrobras. 2011.
- 2 Branco; C.M., Fernandes; A. A., Castro; P. M. S. T., Fadiga de Estruturas Soldadas. Fundação Calouste Gulbenkian. 2ª Edição. Lisboa. 1999.
- 3 ASTM E399. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Toughness  $K_{IC}$  of Metallic Materials. 2009.
- 4 ASTM E1820. Standard Test Method of Measurement of Fracture Toughness. 2008.
- 5 BS 7448-1: Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of  $K_{IC}$ , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials. London, 1997.
- 6 Anderson; T.L., Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications: Taylor & Francis. Third Edition. 2005.
- 7 Oliveira, O. M.; Relatório de estágio supervisionado; UFS; 2012.
- 8 Zumpano; P. J., Ferreira; I., Tenacidade a fratura na zona afetada pelo calor de aços 2,25Cr-1Mo. Revista Ibero-americana de Engenharia Mecânica, Vol 9, nº1, p 135-142, 2005.
- 9 Polliana; A. S.; et al; Determinação da tenacidade à fratura do aço API X65 utilizado em tubos na indústria de petróleo e gás. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2012.
- 10 Azevedo, A. G. L. de; Aplicação da técnica de dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045, Fortaleza, Ceará, Setembro de 2002, 108p, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará.