



AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM METAL DE SOLDA DE UMA JUNTA SOLDADA DE UMA TUBULAÇÃO DE AÇO ARBL

Maria Cléa Soares de Albuquerque

e-mail: mclea@openline.com.br

Idalécio Evangelista de Lima

e-mail: Idallecio@yahoo.com

Theóphilo Moura Maciel

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba – Campus II

Rua Aprígio Velloso, 882; Bodocongó; Campina Grande – PB; CEP: 58.109-970

e-mail: theo@dem.ufpb.br

***Resumo.** Foi avaliada a influência da granulometria e das dimensões de corpos de prova sobre a tenacidade de uma junta soldada de uma tubulação de aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) API 5L- X60. Para tanto foram realizados testes de resistência ao impacto Charpy e de tenacidade à fratura CTOD em corpos de prova de diferentes espessuras e usinados de diferentes regiões do metal de solda. Os resultados obtidos indicaram uma significativa variação nos valores de tenacidade com a redução da espessura e do ligamento dos corpos de prova, demonstrando, assim, a importância da consideração dos limites dos estados de tensão plana e deformação plana na avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas de aços ARBL.*

***Palavras-chave:** Metal de solda, aços ARBL, Ensaio Charpy, Ensaio CTOD.*

1. INTRODUÇÃO

As tubulações que fazem a exploração de produtos, tais como petróleo e gás natural, estão sempre sujeitas ao risco de fratura frágil, devido à sua instalação em maiores profundidades marítimas e em regiões de condições adversas (Cunha & Pope, 1983 e Pereira et al., 1988). Nestes tipos de estruturas, as regiões da solda são as mais vulneráveis a este tipo de falha (Cunha & Pope, 1983).

Devido a isto e à aplicação cada vez mais crescente de aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) na fabricação destas tubulações, é que a Indústria Petrolífera vem estudando o desenvolvimento de novos consumíveis de soldagem, que resultem na obtenção de juntas soldadas com propriedades mecânicas compatíveis às do metal de base, ou seja, com elevada resistência mecânica e tenacidade (Teixeira et al. 1990 e Guimarães et al., 1996).

A soldagem das tubulações, em virtude das grandes seções transversais, exige a utilização de processos de alta energia e alta taxa de deposição, como o processo Arco Submerso. (Ferrante & Silvestre; 1988, Teixeira et al. 1990). Esse processo de soldagem, aliado à técnica multipasse, ou seja, à deposição de mais de um cordão de solda, gera na junta modificações microestruturais relevantes, sendo necessário, portanto, a avaliação da tenacidade do metal de solda, que se torna influenciada, entre outros fatores, pelo percentual de grãos colunares e recristalizados e pela espessura do metal de base (Ronald, 1970; Cunha & Pope, 1983; Pereira et al., 1988; Towers, 1986).

Com relação à avaliação da tenacidade de juntas soldadas, pode-se citar o emprego, cada vez mais crescente da mecânica da fratura através do ensaio CTOD, em complementação ao ensaio Charpy. A validade destes ensaios é feita através de ensaios metalográficos relacionando as microestruturas da junta com os valores de tenacidade obtidos (Teixeira et al., 1990).

Neste sentido, este trabalho teve por objetivo avaliar a influência da granulometria e da espessura de corpos de prova usinados de diferentes regiões de um metal de solda multipasse de uma junta soldada de uma tubulação de aço API 5L- X60, através de ensaios de resistência ao impacto, Charpy, e de tenacidade à fratura, CTOD.

2. MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Material

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho consistiu de um metal de solda de uma junta soldada longitudinal de uma tubulação de aço ARBL com especificação API 5L-X60, proveniente de Angra dos Reis, RJ, e cedida pela PETROBRÁS. A solda longitudinal apresentava chanfro em duplo V, com um passe externo e outro interno ao tubo.

A tubulação, com diâmetro interno de 24” e espessura média de 17,5 mm, foi soldada pelo processo de soldagem Arco Submerso, entretanto, os parâmetros de soldagem utilizados são desconhecidos do fornecedor. A composição química do metal de solda e do metal de base é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do Metal de Base (MB) e do Metal de Solda (MS) em percentagem em peso

Material	Elementos Químicos									
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V	Mo
MB	0,13	0,011	0,019	1,28	0,36	0,0	0,12	0,0	0,03	0,0
MS	0,11	0,018	0,020	1,64	0,68	0,03	0,04	0,08	0,018	0,20

2.2 Procedimento Experimental

Ensaio de resistência ao impacto

Os corpos de prova Charpy foram usinados de diferentes regiões do metal de solda com dimensões de 55 x 10 x 5 mm (região I), e 55 x 10 x 7,5 (região II), conforme ilustra esquematicamente a Figura 1. Em seguida foram ensaiados segundo a norma ASTM E23, 1981, a -20°C , 0°C e à temperatura ambiente.

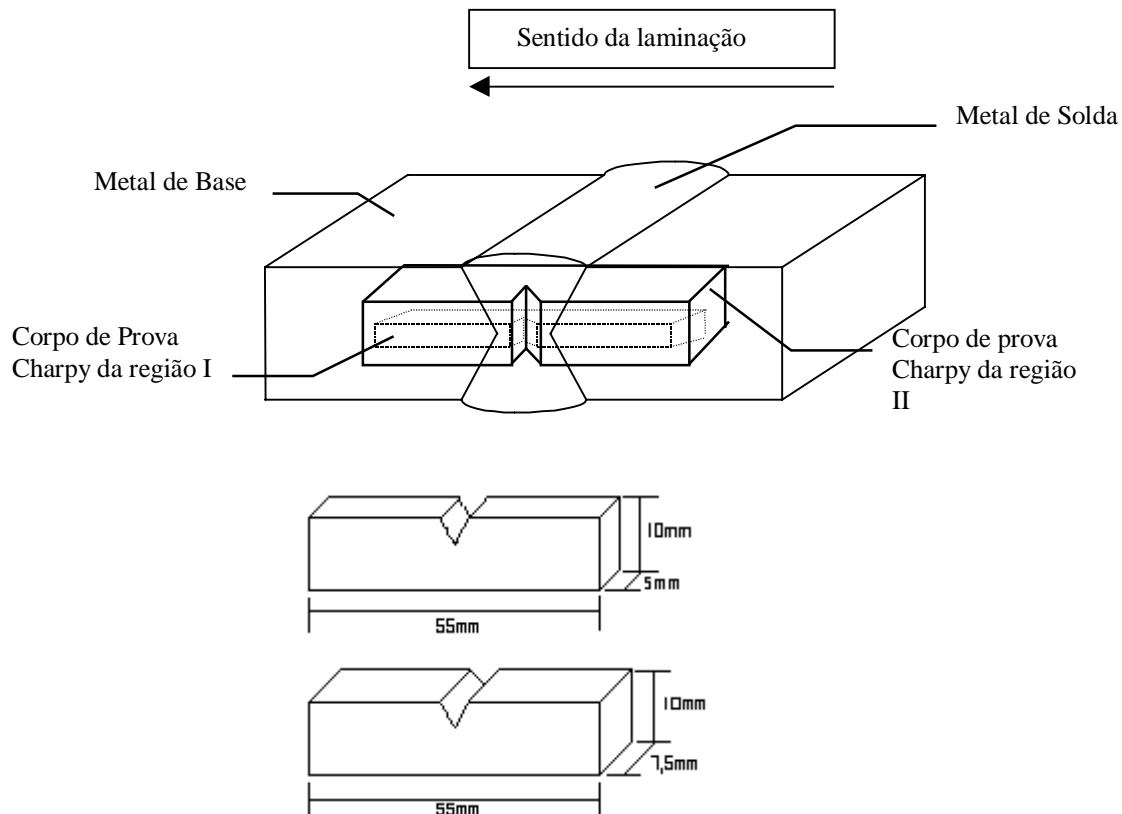


Figura 1 – Ilustração esquemática do posicionamento de usinagem dos corpos de prova Charpy no metal de solda.

Ensaio de tenacidade à fratura CTOD

O ensaio de tenacidade à fratura CTOD foi conduzido segundo a norma BS - 5762/79 (1979), à temperatura ambiente, para obtenção do valor de tenacidade sob a carga máxima, δ_{\max} .

Os corpos de prova foram usinados com geometria preferencial e razão $a/W = 0,5$, (a = comprimento da trinca e W = largura da amostra) conforme ilustração esquemática apresentada na Figura 2. Em seguida foram pré-fissurados por fadiga, utilizando-se uma razão de carga $R = 0,1$, fator de intensidade de tensão máximo K_{\max} = para os corpos de prova da região I e K_{\max} = para os corpos de prova da região II. O carregamento em dobramento em três pontos obedeceu a relação de distância entre os apoios de $4W$, conforme estabelece a norma supra -citada.

Após os ensaios, foram feitas análises metalográficas na superfície de fratura dos dois tipos de corpos de prova utilizados nos ensaios Charpy e CTOD para determinação dos percentuais relativos de grãos colunares e recristalizados e, em seguida, nestas mesmas amostras, foram feitas medidas de dureza Vickers com carga de 5 Kg.

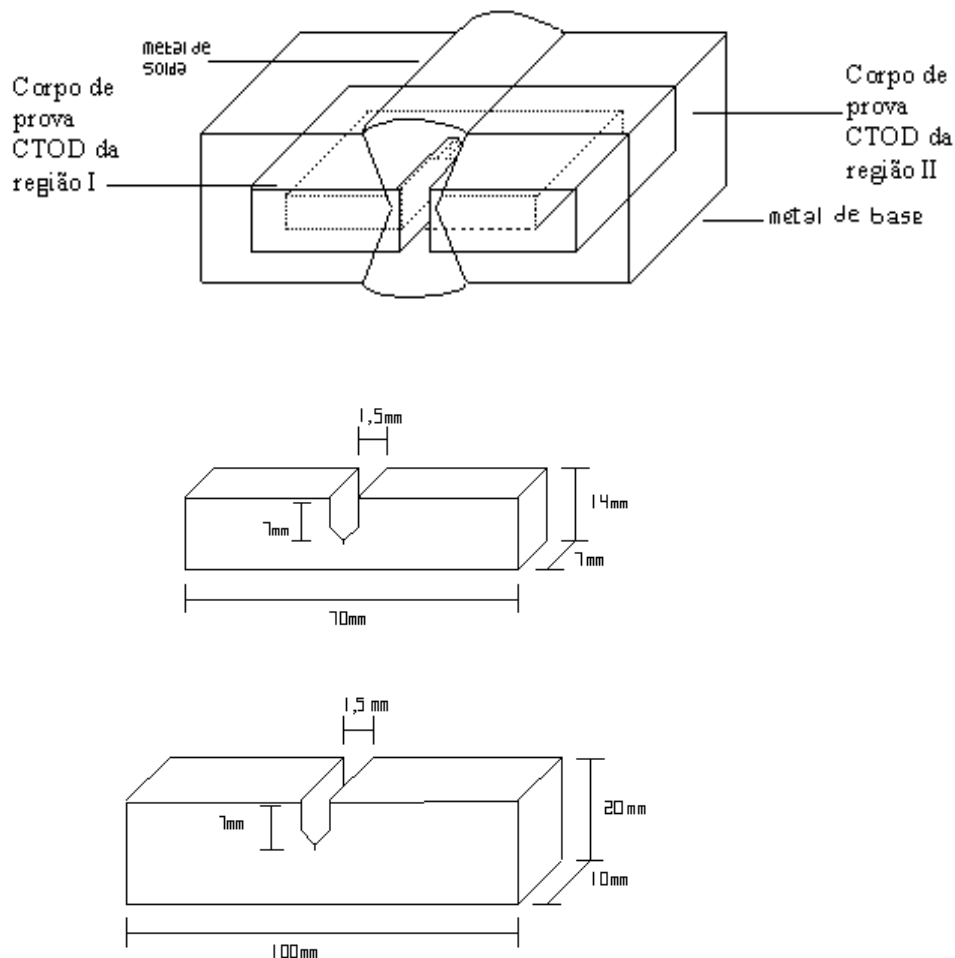


Figura 2 – Ilustração esquemática do posicionamento de usinagem dos corpos de prova CTOD no metal de solda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de resistência ao impacto Charpy

A Tabela 2 e a Figura 3 apresentam os resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy realizado em três temperaturas (-20°C , 0°C e Temperatura ambiente) para corpos de prova com diferentes espessuras, ou seja 5 mm (Região I) e 7,5 mm (Região II), e usinados de duas regiões distintas do metal de solda, conforme ilustração esquemática apresentada na Fig. 1.

Pode-se verificar através dos valores apresentados na Tabela 2 e pelo gráfico da Fig. 3, que os corpos de prova de menor espessura, ou seja usinados da Região I, absorveram uma quantidade menor de energia de impacto, principalmente para os ensaios realizados a 0°C e à temperatura ambiente. Este resultado pode ser atribuído ao efeito da redução da espessura dos

corpos de prova, uma vez que os percentuais de grãos colunares e recristalizados foram aproximadamente iguais para os corpos de prova das duas regiões, assim como os seus valores de dureza, cuja diferença não ultrapassou 10%, como mostram os dados apresentados na Tabela 3. Outros trabalhos também confirmaram essa dependência dos valores de energia com a espessura das amostras (Fahey & Kula, 1963; Hartbower & Orner, 1963).

Tabela 2. Valores médios de energia de impacto (J) e de energia Relativa (J/mm^2) dos corpos de prova Charpy com diferentes espessuras e usinados de diferentes regiões do metal de solda.

Corpo de Prova	Temperatura	Energia Média de Impacto (J)	Energia Relativa (J/mm^2)
Região I	- 20°C	39,7	0,99
	0°C	41	1,03
	T. Ambiente	56,7	1,42
Região II	- 20°C	37,3	0,62
	0°C	55	0,92
	T. Ambiente	79	1,32

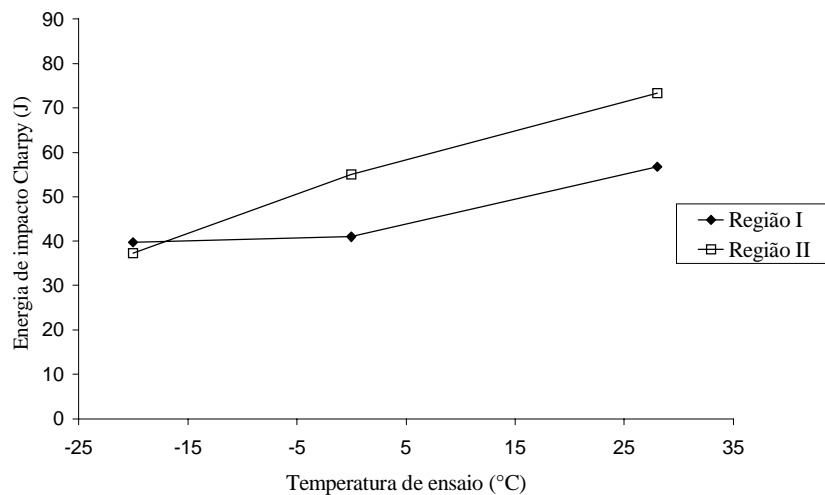


Figura 3 - Gráfico de energia média de impacto Charpy absorvida em três temperaturas por corpos de prova com diferentes espessuras, ou seja 5 mm (Região I) e 7,5 mm (Região II)

Dividindo-se os valores de energia média de impacto pela área transversal do ligamento dos corpos de prova, foram obtidos os valores de energia relativa, apresentados na Tabela 2, a

qual é considerada uma medida mais apropriada para análise dos resultados de ensaios que tratam de variação de espessura (Towers, 1986).

Através da análise da Tabela 2 e do gráfico da Fig. 4 pode-se observar que os valores de energia relativa apresentaram uma tendência de aumentar com a redução da espessura dos corpos de prova. Estes resultados concordaram com os obtidos por Towers (1986), que estudou o efeito da redução da espessura dos corpos de prova Charpy na temperatura de transição dúctil-frágil de alguns tipos de aços, e entre estes o metal de solda de uma junta soldada de uma tubulação de aço API 5L-X60. Neste estudo Towers observou que quanto menor a espessura menor a temperatura de transição e maior a energia absorvida por unidade de área do ligamento.

Um importante fator que se relaciona com este efeito da espessura é o estado de tensão da amostra. Esta dependência de tamanho é ilustrada esquematicamente pelo gráfico apresentado na Fig. 5. Para valores mais altos da espessura, a energia relativa se mantém constante. Nesta porção da curva, a fratura ocorre quase que totalmente sob condições de deformação plana ou seja a fratura é dita frágil. A medida que a espessura diminui, ocorre um aumento gradativo da energia relativa, denotada fisicamente pelo aumento da proporção da zona de fratura oblíqua (“shear lips”) na superfície de fratura, até alcançar o pico da curva, que corresponde à espessura máxima na qual a fratura é dita 100% (cem por cento) dúctil, ou seja, a espessura máxima na qual a fratura ocorre sob condições de tensão plana. O decréscimo nos valores de energia relativa em amostras de espessuras muito pequenas refletem o fato do volume de deformação plástica ser limitado pelo tamanho físico da amostra (Ronald, 1970).

Os resultados obtidos para este caso particular mostraram, portanto, que com a redução da espessura dos corpos de prova ocorreu uma redução da triaxialidade de tensões, favorecendo os mesmos a fraturarem sob condições de transição de deformação plana para tensão plana.

Tabela 3. Quantidade percentual média de grãos colunares e recristalizados dos corpos de prova Charpy usinados da região I e II do metal de solda

Região do Metal de Solda	Dureza Média (HV-5Kg)	Percentual dos tipos de Grãos (%)	
		Colunares	Recristalizados
Região I	236,27	28,9	71,1
Região II	245,03	33,9	66,1

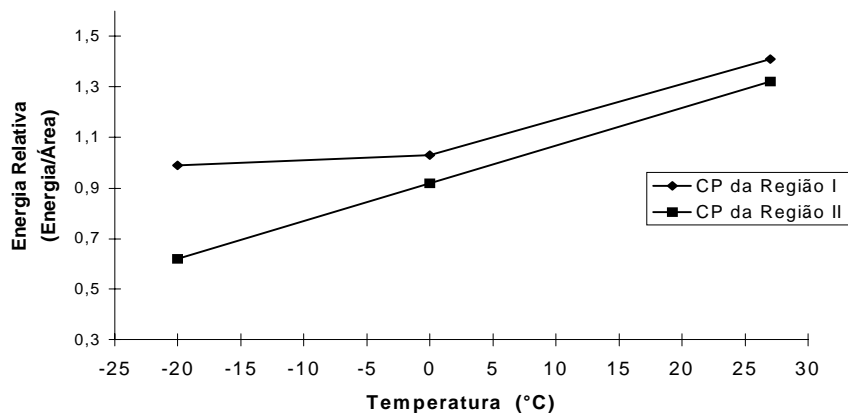


Figura 4 - Gráfico de energia relativa em função da temperatura de ensaio para os corpos de prova do metal de solda usinados da Região I e da Região II:

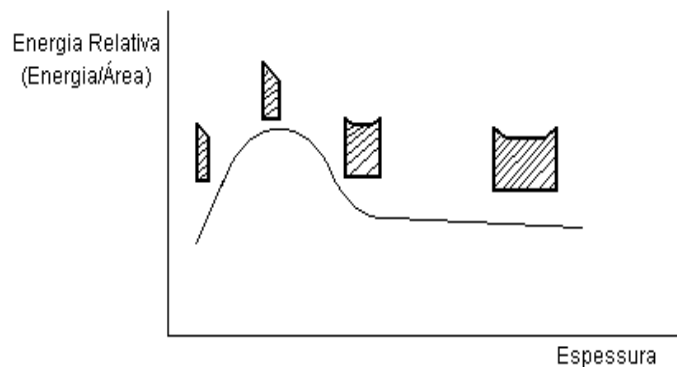


Figura 5- Gráfico esquemático da energia relativa de impacto Charpy em função da espessura da amostra (Ronald, 1970)

3.2 Ensaio de tenacidade à fratura CTOD

A Tabela 4 apresenta os resultados do ensaio de CTOD realizado em corpos de prova com diferentes dimensões e usinados de duas regiões distintas do metal de solda, ou seja, Região I ($W = 14$ e $B = 7$) e Região II ($W = 20$ e $B = 10$), conforme ilustração esquemática apresentada na Figura 2. Na Figura 6 foram plotados os valores de δ_{max} em função do ligamento b ($b = W - a$) e da espessura para os dois tipos de corpos de prova. Para o corpo de prova CTOD do tipo preferencial, ao contrário do tipo subsidiário, o valor da espessura coincide com o do seu ligamento.

Pode ser observado através da Tabela 4 e Figura 6 a influência marcante, tanto da espessura, quanto do ligamento, sobre os valores de δ_{max} , uma vez que o percentual de grãos colunares e recristalizados foi aproximadamente igual para os corpos de prova usinados das duas regiões, assim como os seus valores de dureza, como mostram os dados apresentados na Tabela 5.

Este comportamento tem sido observado por vários pesquisadores (Green & Knott, 1975; Munz et al., 1976; Pisarski, 1981; Santos, 1981; Cunha & Pope, 1983; Pereira et al., 1988, Nascimento, 1995). Entretanto, apesar do número significativo de publicações, esta dependência dos valores de tenacidade com as dimensões dos corpos de prova não consegue

ser explicada, ou seja, não se sabe estabelecer se há um predomínio da espessura ou do ligamento sobre os valores de δ_{max} , ainda mais quando, aparentemente, os resultados deveriam se apresentar de maneira inversa. Com a redução da espessura dos corpos de prova ocorre uma diminuição da triaxialidade de tensões e portanto um favorecimento ao estado de tensão plana e, conseqüentemente, o comportamento dúctil do material.

O que se sabe é que o campo de tensões criado à frente da trinca de fadiga contida nos corpos de prova para ensaios de tenacidade apresenta uma dependência tanto da espessura quanto do ligamento e qualquer alteração nestes terá uma influência direta sobre aquele campo de tensões, pois alteram as características de triaxialidade do sistema.

A impossibilidade de explicação dos resultados obtidos permitiu a inferência de algumas hipóteses. Apesar dos resultados de dureza não apresentarem significativas variações, em virtude dos pontos analisados, não se pode descartar a possibilidade da presença de algum tipo de defeito metalúrgico, microestruturas frágeis ou à concentração de inclusões, na região de onde foram usinadas as amostras, ter provocado a queda nos valores de tenacidade. Uma outra possibilidade diz respeito à restrição à deformação plástica, causada pelo tamanho físico reduzido das amostras.

Qualquer que seja o mecanismo responsável pelo comportamento da tenacidade mostrado na Figura 6, vale ressaltar que no caso de metais de solda não se pode garantir a mesma reprodução dos resultados para análise comparativa com outros tipos de cordões, utilizando outros parâmetros de soldagem, visto que fatores como microestrutura e/ou inclusões, ciclo térmico de soldagem, entre outros poderiam superar o efeito da triaxialidade (Pisarski, 1981).

Tabela 4. Valores médios e desvio padrão do CTOD de máxima carga obtidos para os corpos de prova com diferentes dimensões e usinados de duas regiões distintas do metal de solda

Corpo de prova	Medidas	δ_{max} (mm)
Região I	Média	0,09
	Desvio Padrão	0,014
Região II	Média	0,102
	Desvio Padrão	0,02

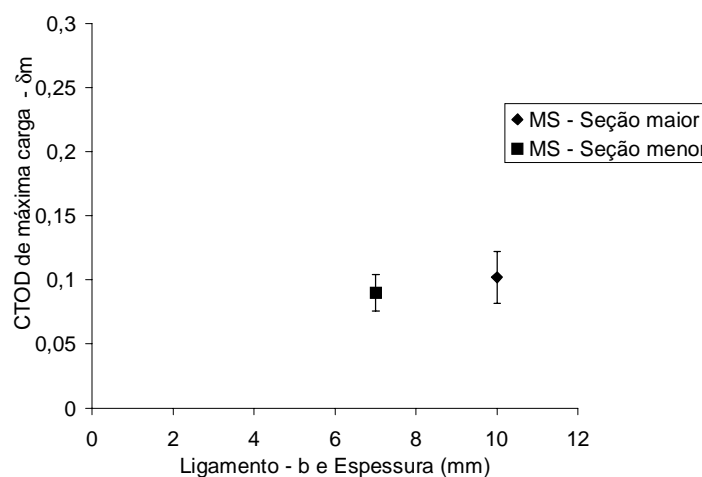


Figura 6 – Relação entre os valores de δ_{max} e dos ligamentos b e espessura para os corpos de prova com diferentes dimensões e usinados de duas regiões distintas do metal de solda.

Tabela 5. Quantidade percentual média de grãos colunares e recristalizados dos corpos de prova CTOD usinados das regiões I e II do metal de solda

Região do Metal de Solda	Dureza Média (HV-5Kg)	Percentual do tipo de Grãos (%)	
		Colunares	Recristalizados
Região I	268,1	44,4	55,6
Região II	271,6	42,8	57,2

4. CONCLUSÕES

O decréscimo dos valores de energia de impacto Charpy observado nos corpos de prova usinados com menor seção foi atribuído ao efeito da redução da espessura, uma vez que não houve significativa variação nos percentuais de grãos colunares e recristalizados e nas medidas de dureza dos corpos de prova das duas regiões.

O aumento da energia relativa com a redução da espessura dos corpos de prova Charpy, evidenciou a necessidade da consideração dos estados de tensão e deformação plana na avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas obtidas por processo multipasse.

O decréscimo dos valores de tenacidade com a redução das dimensões dos corpos de prova nos ensaios CTOD pode ser atribuído:

- à restrição à deformação plástica causada pelo tamanho físico reduzido das amostras e/ou
- à presença de algum tipo de defeito metalúrgico, microestruturas frágeis ou uma concentração de inclusões na região de onde foram usinadas as amostras, impossibilitados de serem detectados por uma simples análise de dureza.

Agradecimentos

À PETROBRÁS por nos ter cedido gentilmente o tubo, à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASTM, E 23: 1981, "Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, p. 273-295
- BS 5762: 1979, "Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing", The British Standards Institution, p. 1-12.
- Cunha, P. C. R., Pope, A. M., 1983, Influência da espessura na tenacidade à Fratura de Juntas Soldadas, XXXVIII Congresso da ABM, Julho, São Paulo, vol. 4, p. 389-399.
- Fahey, N. H., Kula, E.B., Proc. ASTM, 1963, vol. 63, p.1147.
- Green, G., Knott, J. F., 1975, On effects of thickness on ductile crack growth in mild steel, J. Mech. Phys. Solids, vol. 23, p. 167-183.

- Guimarães, S., Araujo, V. L., Zeemann, A., 1996, A qualidade do metal de base e dos consumíveis na soldagem de aços estruturais, XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 29 de Julho a 2 de Agosto, Blumenau, SC, p. 435-445.
- Hartbower, C. E., Orner, G. M., Metallurgical variables affecting fracture toughness in High-Strength Sheet Alloys, 1963, Welding Journal, vol 42, p.111-S.
- Munz, D., Galda, K. H., 1976, Effect of specimen size on fracture toughness of a titanium alloy, Mechanics of crack growth, STP 590, American Society for Testing and Materials, p. 219-234.
- Nascimento, J. J. S., 1995, O efeito da espessura do corpo de prova sobre os valores de tenacidade à fratura dos aços da classe API 5L- X70 e ASTM A516-GR65, Dissertação de Mestrado, UFPB, Campus II, Campina Grande, PB, p.101.
- Pereira, L. C., Strohaecker, T. R., Bastian, F. L., Santos, M. A., 1988, Influência das dimensões dos corpos de prova na avaliação do comportamento à fratura de aços para tubulações, 1º Congresso ALAMET e 3º Colóquio Latino Americano de Fadiga e Fratura dos Materiais, Rio de Janeiro, p. 837-849.
- Pisarsk, H. J., 1981, Influence of thickness on critical Crack Opening Displacement (COD) and J values, International Journal of Fracture, vol.17, n. 4, p. 417-440.
- Pisarsk, H. G., Fracture Toughness of some materials used in fabricating fixed offshore structures, 1981, 13º Annual Offshore Technology Conference, Houston.
- Ronald, T. M. F., 1970, The relation between the fracture behavior of 4340 bend specimens and the observation of tempered martensite embrittlement, Metallurgical Transactions, vol 1, n. 9, p. 2583–2592.
- Santos, M.A., 1981, Estudo do comportamento à fratura de um aço para tubulações da classe API 5L – X70, Tese de doutorado, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, p. 484.
- Teixeira, J. C. G., Filho, J. C., Pope, A. M., 1990, Tenacidade à fratura da região de grãos grosseiros da zona afetada pelo calor de uma aço temperado e revenido para estruturas offshore, XVI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Dezembro 2-5, Caxambu, MG, p. 123-138.
- Towers, O. L. J., 1986, Testing sub size Charpy specimens – Part 1 – The influence of Thickness on the ductile/brittle transition, Metal Construction, vol. 18, n. 3, p. 171-176R

EVALUATION OF THE WELD METAL MECHANICAL PROPERTIES OF A WELDED JOINT OF HSLA PIPELINE STEEL

Abstract

The effects of the specimens dimensions and granulometry on the values of toughness of a high strength low alloy (HSLA) pipeline steel API 5L – X60 welded joint were investigated. Charpy impact tests and CTOD at maximum load (δ_{max}) in specimens machined of different places of the weld metal were made. The results showed significative variations of toughness values with the specimens thickness and/or ligament, evidencing the importance of limits of plane strain and plane stress on the estimation of the mechanical properties of HSLA steels welded joints.