

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE JUNTAS SOLDADAS POR PROCESSO ROBOTIZADO DO AÇO API 5L X80, UTILIZADO EM DUTOS PARA TRANSPORTE DE PETRÓLEO*

Siderley Fernandes Albuquerque¹
Theophilo Moura Maciel²
Marco Antônio dos Santos²
Raimundo Quindere Cruz Neto³

Resumo

Devido à descoberta de petróleo em um gigantesco reservatório situado na região litorânea entre os estados de Santa Catarina e Espírito Santo, a malha dutoviária brasileira irá aumentar consideravelmente nos próximos anos, assim como a necessidade de novos sistemas dutoviários capazes de transportar óleo e gás a pressões cada vez mais elevadas. A soldagem de tubulações no Brasil ainda é realizada de forma manual com processo ao Arco Elétrico e Eletrodo Revestido, fortemente dependente da habilidade do soldador; com a utilização de soldagem robotizada, tem-se maior controle dos parâmetros de soldagem, com possibilidade de obtenção de juntas de boa qualidade, além do ganho considerável em produtividade. O objetivo deste trabalho é analisar a tenacidade ao impacto charpy na ZTA de juntas soldadas do aço API 5L X80 utilizadas para transporte de petróleo quando submetidas a processo FCAW-G robotizado com o arame AWS E111T1-K3MJ-H4 para passes de enchimento e acabamento, com Ar + 25%CO₂ como gás de proteção, e processo GTAW com o arame ER80S-Ni1 para passe de raiz, utilizado Ar + 25%CO₂ como gás de proteção. Os resultados obtidos são comparados com o processo SMAW manual, utilizando como consumíveis os eletrodos AWS ER 7018 e E9010-G; as soldagens foram realizadas na posição plana e vertical ascendente; com os resultados obtidos de energia absorvida em ensaio de impacto charpy, com entalhe localizado na ZTA, foram correlacionados estes valores com a microestrutura presente na ponta do entalhe dos corpos de prova.

Palavras-chave: Aço API5LX80; Ensaio charpy; Microestrutura; Soldagem robotizada.

EVALUATION OF IMPACT RESISTANCE OF API 5L X80 STEEL, WELDED JOINTS USED ARE PIPELINE FOR OIL TRANSPORT

Abstract

Due to the discovery of oil in a gigantic reservoir located in the coastal region between the states of Santa Catarina and Espírito Santo, Brazil's pipeline network will increase considerably in the coming years, as well as the need for new pipelines systems capable of carrying oil and gas pressures each even higher. The welding of pipes in Brazil is still performed manually process with the Arc and stick welding, however, the use of automation in welding becomes extremely important because of the high number of welds to be carried out both in pipe manufacturing and in assembling them and the possibility of obtaining good quality together. The objective of this study is to analyze the toughness charpy impact HAZ of welded joints of API 5L X80 steel used to transport oil when subjected to FCAW-G robotic process with AWS E111T1-K3MJ-H4 for filling and finishing passes, with Ar + 25% CO₂ as shielding gas, and GTAW manual process with ER80S-Ni1 wire for root pass, used Ar + 25% CO₂ as shielding gas The results are compared with the manual SMAW process using consumables as the AWS ER 7018 and E9010-G electrodes; Welding was performed in the ascending flat and upright; with the results of energy absorbed in charpy impact test with notch located in the HAZ, these values with this microstructure on the edge of the notch of the specimens were correlated.

Keywords: Steel API5LX80; Charpy test; Microstructure; Robotic welding.

¹ Departamento de Engenharia Mecânica/UFCG, e Centro de Inovação e Tecnologia Industrial (CITI)/ SENAI, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

² Departamento de Engenharia Mecânica/UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

³ Departamento de Engenharia de Petróleo e Gás/UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A demanda energética brasileira apresenta uma projeção cada vez mais crescente, o que tem intensificado os investimentos no setor de petróleo e gás, como também a procura por técnicas de menor custo para montagem de dutos, a fim de se reduzir custos; diante deste cenário, a solução tem sido o emprego de tubos com menor espessura de parede e processos de soldagem de maior produtividade.

A utilização de aços de alta resistência e baixa liga apresenta as características essenciais para projetos de tubulações, como alta resistência a esforços, boa tenacidade e boa soldabilidade, resultado de uma combinação de baixo teor de Carbono e processos termomecânicos de fabricação.

Uma classificação de aços indicados para o transporte de petróleo e gás é especificada na API 5L [1], sendo o aço em estudo classificado como API 5L X80, vários trabalhos citam a boa soldabilidade deste aço [2, 3, 4].

Dependendo da taxa de resfriamento, após a soldagem do aço API 5L X80 tem-se a formação do microconstituente A-M, que pode gerar zonas de fragilização localizada que degradam a tenacidade na região de grãos grosseiros da zona termicamente afetada - ZTA GG [2].

Para que se tenha boa tenacidade na zona termicamente afetada - ZTA é importante observar a quantidade, tipo e distribuição do constituinte A-M presente [5]; Davis e King [6] destacam que a presença do constituinte A-M não é necessariamente nociva, depende da sua fração volumétrica, morfologia e dureza.

Para melhorar a tenacidade à fratura na ZTA, são selecionados procedimentos de soldagem que reduzam a fração volumétrica da martensita e do constituinte A-M e gerem crescimento no percentual de microestruturas mais tenazes; Bhadeshia & Honeycombe [7] e Almeida et al [8] mencionam o benefício da bainita inferior por proporcionar boas propriedades de resistência e tenacidade.

A produção nacional deste aço é recente e sua soldagem circunferencial por processos automáticos encontra-se em fase de implementação.

O processo de soldagem manual por eletrodo revestido SMAW (Shielded Metal Arc Welding) tem ampla utilização por ser de simples aplicação em todas as posições de soldagem e versátil quanto aos locais de execução. Uma desvantagem é sua baixa produtividade quando comparada à dos processos automáticos e a necessidade de maior mão de obra qualificada de soldagem.

Os processos automáticos têm grande produtividade em virtude às altas taxas de deposição de material, boa penetração, boa qualidade do metal de solda, maior controle das variantes de soldagem e menores equipes de trabalho comparado com o processo SMAW.

Um dos processos mais interessantes para a utilização em soldagem transversal de tubos é o de arame tubular FCAW (Flux Cored Arc Welding) que, além das vantagens citadas, inclui benefícios metalúrgicos oriundos dos agregados contidos nos fluxos que podem favorecer as propriedades mecânicas do metal de solda. Quanto às vantagens operacionais inclui-se sua possibilidade de utilização em processos de soldagem automatizados devido ao abastecimento continuado de arame.

O estudo atual faz uma análise da microestrutura, tenacidade ao impacto charpy e da variação da extensão da ZTA ao longo de juntas soldadas do aço API 5L X80, utilizando processo GTAW de forma manual (Gas Tungsten Arc Welding) no passe de raiz, SMAW de forma manual e FCAW robotizado no enchimento e acabamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foram chapas de aço API 5L X80, cuja microestrutura do metal base é apresentada na Figura 1; esta chapa possui espessura de 19 mm e composição química apresentada na Tabela 1; a composição química foi obtida por espectroscopia de massa.

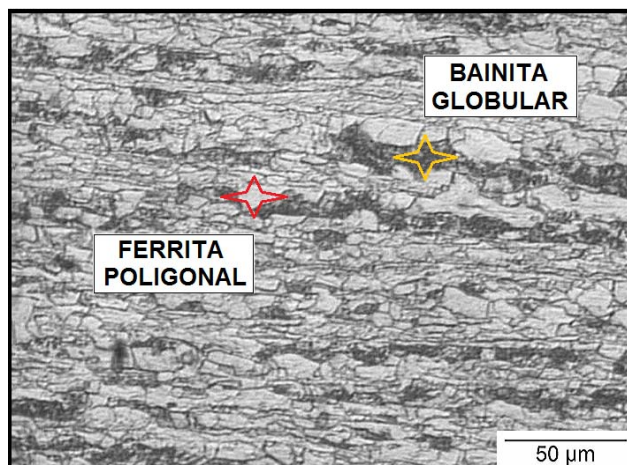


Figura 1 – Microestrutura do metal base do aço API 5L X80.

Tabela 1 - Composição Química em peso porcentual do aço API 5L X80 (Fe=97,912%).

C	Mn	Si	Al	P	V	Cr	Ni	Mo	S	Cu	Nb	Ti	W (?)
0,08	1,80	0,24	0,04	0,01	0,02	0,15	0,01	0,19	0,00	0,01	0,07	0,01	0,00
2	8	2	4	5	8	7	8	7	5	1	6	1	0

Fonte: Fundação Altivo S/A.

Após o corte da chapa, preparou-se o chanfro em $\frac{1}{2} V$; em seguida, as chapas foram soldadas utilizando-se as seguintes variações de consumíveis, processos e procedimentos de soldagem: (a) processos manuais a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW) para preenchimento da junta e passe de raiz, utilizando como consumível o eletrodo AWS ER 7018 com diâmetro de 2,4 mm para passe raiz e o eletrodo AWS E9010G com 3,2 mm para os passes de enchimento e acabamento; (b) processo TIG manual na raiz e ao Arco Elétrico com Arame Tubular (FCAW) robotizado nos passes de enchimento e acabamento, utilizando como consumível o arame ER80S-Ni1 com diâmetro de 2,4 mm e argônio como gás de proteção no processo TIG, e o arame AWS E111T1-K3MJ-H4 com diâmetro de 1,2 mm e argônio com 25% CO₂ como gás de proteção no processo FCAW.

A escolha do arame tubular se deu pela maior produtividade e melhor eficiência na soldagem robotizada, assim como pela disponibilidade no mercado e compatibilidade com o sistema robótico.

A fim de se avaliar o efeito da posição de soldagem, as juntas foram soldadas nas posições plana e vertical ascendente. As amostras foram nomeadas de acordo com o procedimento utilizado e a posição de soldagem; assim, para soldagem manual com eletrodo revestido, utilizou-se a nomenclatura MP para posição plana, e MA na posição vertical ascendente; para o procedimento robotizado com arame tubular no enchimento e TIG na raiz, utilizou-se a nomenclatura RP para posição plana e RA para posição vertical ascendente.

Na Tabela 2 têm-se os principais parâmetros usados, assim como a determinação do aporte térmico para cada procedimento de soldagem; procurou-se manter o aporte térmico semelhante para todos os procedimentos de soldagem.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados.

Procedimento de soldagem	Corrente de Soldagem (A)		
	Passe de Raiz	Passe de enchimento	Passe de acabamento
MP	100	90	90
MA	100	90	90
MS	100	90	90
RP	230	137	142
RA	230	157	157
Amostra/ Posição de Soldagem	Velocidade de Soldagem (mm/s)		
	Passe de Raiz	Passe de enchimento	Passe de acabamento
MP	1,66	1,31	1,62
MA	0,87	1,18	0,76
MS	1,19	1,82	2,08
RP	2,27	2,66	2,66
RA	1,78	3,00	3,00
Amostra/ Posição de Soldagem	Tensão (V)		
	Passe de Raiz	Passe de enchimento	Passe de acabamento
MP	19	19	19
MA	19	19	19
MS	19	19	19
RP	10	23,5	23,5
RA	10	23,5	23,5
Amostra/ Posição de Soldagem	Aporte Térmico (kJ/mm)		
	Passe de Raiz	Passe de enchimento	Passe de acabamento
MP	1,14	1,31	1,06
MA	2,18	1,45	2,25
MS	1,60	0,94	0,82
RP	1,01	1,21	1,21
RA	1,29	1,23	1,23

Foram realizados um total de 13 passes para o processo MP, 8 passes para o processo MA, e para os processos RP e RA foram realizados 10 passes cada; o controle do número de passes não foi possível para o caso MP e MA em virtude do escorrimento do cordão na soldagem fora de posição e na perda de metal decorrente da retirada de escória.

As amostras foram lixadas e devidamente polidas, sendo atacadas com Nital 2% para identificação dos microconstituintes na ZTA por microscopia óptica; a microestrutura, microdureza e a variação da extensão da ZTA foram analisadas em quatro regiões distintas ao longo da junta, conforme Figura 2.

Para uma análise mais detalhada da extensão da ZTA, optou-se por dividir a junta soldada, ao longo da espessura, em três regiões específicas, totalizando assim as 20 medições propostas em cada lado da junta soldada, sendo:

- 6 medidas na região adjacente aos passes de acabamento;
- 11 medidas na região adjacente aos passes de enchimento;
- 3 medidas na região adjacente ao passe de raiz;

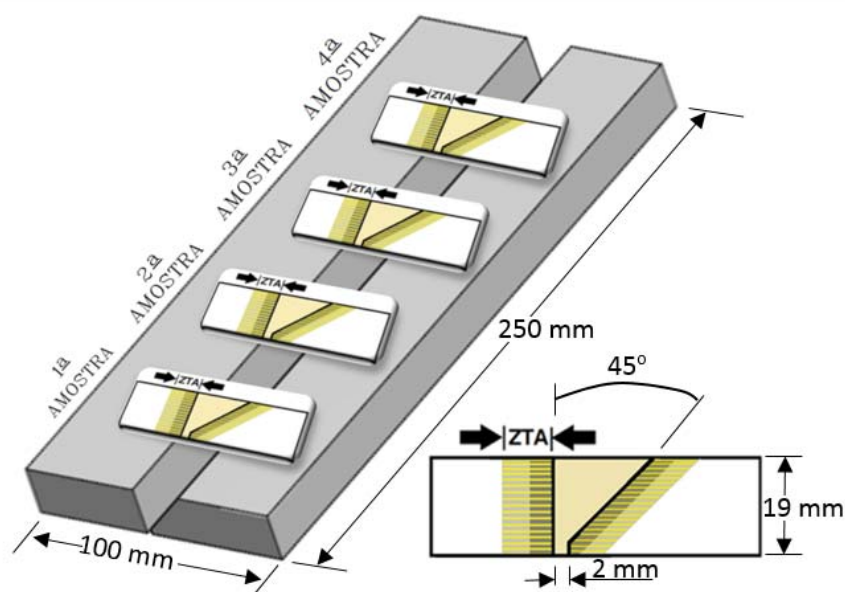


Figura 2 – Representação esquemática da metodologia utilizada para determinação da extensão da ZTA.

Para realização dos ensaios Charpy será utilizado uma máquina de impacto acoplada a um computador para leitura e tratamento de dados. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, utilizando um pêndulo com capacidade de gerar 300J. O dimensionamento dos corpos de prova foi realizado de acordo com a norma ASTM E23 [9]. Foram usinados 5 corpos de prova com entalhe posicionado à 1mm da linha de fusão, conforme Figura 3. Após o ensaio de impacto, cada corpo de prova fraturado foi seccionado em duas partes, uma para quantificar o percentual de microconstituintes na ponta do entalhe utilizando-se microscopia óptica e outra para analisar o aspecto da região de fratura utilizando-se microscopia eletrônica de varredura.

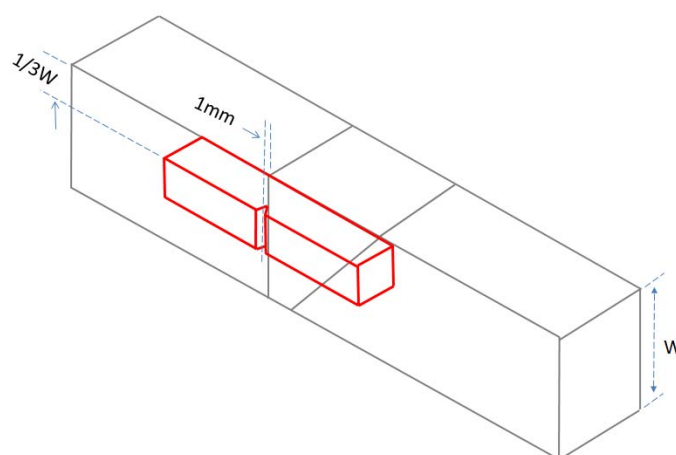


Figura 3 – Retirada de corpo de prova charpy da junta soldada.

Para determinação do perfil de microdureza apenas no lado da junta com chanfro reto, foram realizadas 5 indentações, distanciadas entre si de 3 diagonais; as medições foram realizadas na região de grãos grosseiros da ZTA (GG) e na região de grãos finos da ZTA (GF), de acordo com a Figura 4.

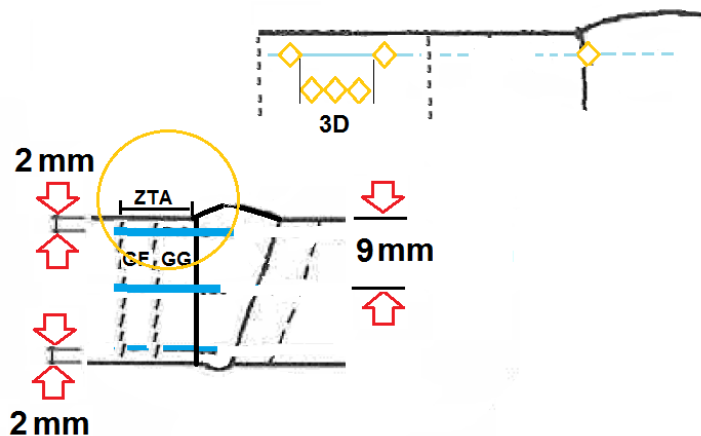


Figura 4 – Metodologia para análise de microdureza.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

A ZTA, mais especificamente a região de grãos grosseiros, é considerada uma zona crítica e muito favorável ao surgimento de trincas, podendo apresentar microconstituintes frágeis como a martensita, além de constituintes A-M que dependendo da sua morfologia pode induzir a formação de trincas [5].

Considerando apenas a primeira amostra ao longo da junta (ver Figura 1), foi calculada uma média geral da extensão da ZTA para cada região, e os valores obtidos são apresentados na Tabela 3; as amostras soldadas com procedimento de soldagem manual (MP e MA) apresentaram valores médios de extensão de ZTA superiores as amostras soldadas com procedimento RP e RA, principalmente na região de enchimento.

De acordo com a Tabela 3, e considerando a região da ZTA adjacente aos passes de enchimento, já que apresenta uma área mais significativa, tem-se redução de 22,2% na extensão da ZTA do procedimento MP para o procedimento RP, e redução de 54,5% na extensão da ZTA do procedimento MA para o procedimento RA.

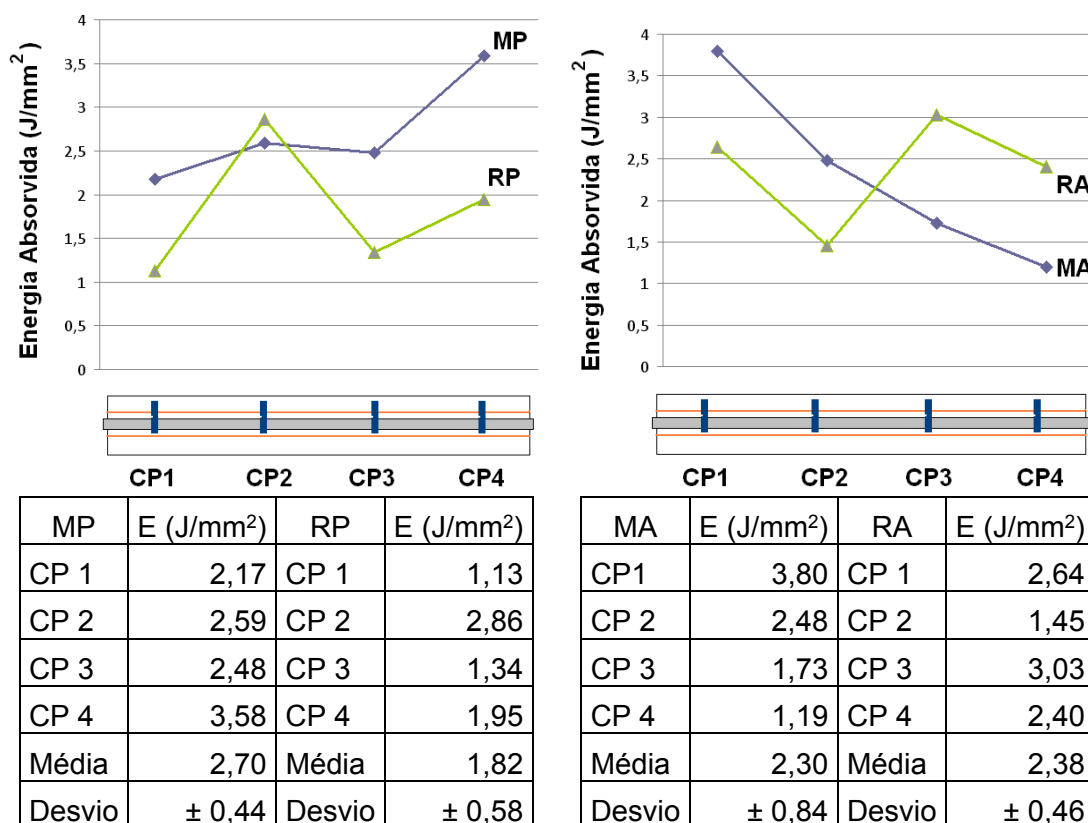
Tabela 3 - Valor médio de extensão da ZTA (mm)

PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	REGIÃO DA ZTA	EXTENSÃO (mm)
MP	ACAB	2,3 ± 0,4
	ENCH	3,6 ± 1,2
	RAIZ	5,3 ± 0,8
MA	ACAB	6,6 ± 0,4
	ENCH	5,5 ± 0,7
	RAIZ	3,7 ± 0,3
RP	ACAB	3,6 ± 1,9
	ENCH	2,8 ± 0,3
	RAIZ	3,0
RA	ACAB	3,5 ± 2,1
	ENCH	2,5 ± 1,1
	RAIZ	4,7

Nos resultados da Tabela 3 observa-se que a extensão da ZTA é menor nos procedimentos RP e RA, consequência da maior velocidade de soldagem empregada. De acordo com a Tabela 3, no procedimento MA, os valores de extensão da ZTA adjacente a região de enchimento e acabamento foram os maiores encontrados, isto ocorreu pelo maior aporte térmico observado nos passes de acabamento (relacionado à baixa velocidade de soldagem) e sua influência sobre os passes de enchimento; o soldador encontra maior dificuldade na soldagem vertical ascendente, tanto pela posição de soldagem quanto pelo escorrimento do cordão de solda sob o efeito da gravidade. Logo, ao invés de serem feitos 10 passes (como no procedimento RA), foram realizados 8 passes.

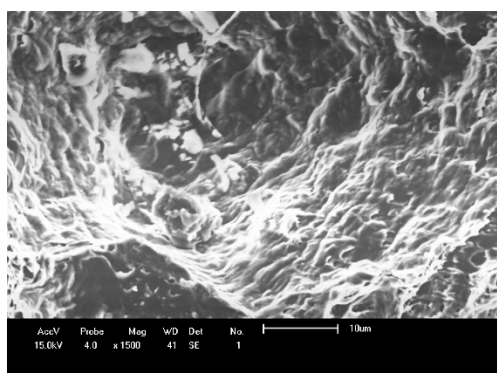
Percebe-se que controle do aporte térmico se torna importante na soldagem multipasse do aço API 5L X80, principalmente para o caso de soldagem manual, onde o controle dos parâmetros de soldagem é realizado pelo soldador.

Os resultados apresentados no ensaio de impacto charpy mostram que as soldagens realizadas pelo processo robotizado apresentaram uma melhor uniformidade nos valores médios, considerando a posição de soldagem utilizada, como pode ser observado na Figura 5.

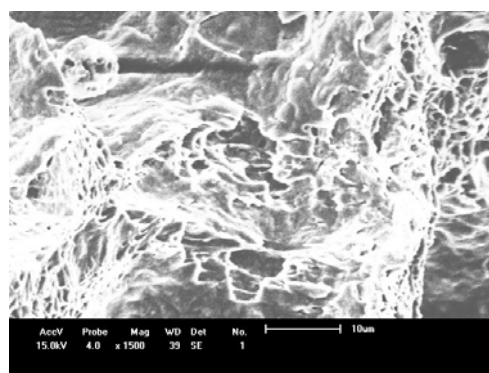


a) b)
Figura 5 – Energia absorvida em ensaio de impacto charpy – Posição plana (a) Posição vertical ascendente (b)

Nas Figuras 6, 7, 8 e 9 têm-se as superfícies de fratura do ensaio de impacto charpy que foram obtidas por Microscopia Óptica de Varredura (MEV); pode-se observar que as soldagens realizadas pelo processo robotizado apresentaram fratura do tipo dúctil com a presença de dimples, já as soldagens realizadas pelo processo manual apresentaram fratura mista. Os resultados de superfície de fratura podem explicar o porquê de o processo robotizado apresentar menor dispersão e energia de absorção ao impacto intermediária.



(a)



(b)

Figura 61 - Soldagem Manual Plana. Energia absorvida em ensaio de impacto charpy. a)151J, b) 215J

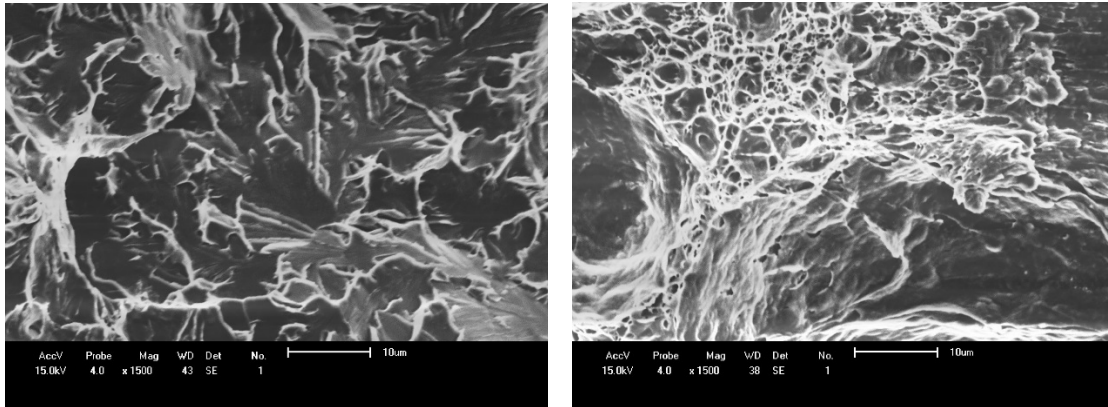


Figura 7 - Soldagem Manual Ascendente. Energia absorvida em ensaio de impacto charpy. a) 94J, b) 228J

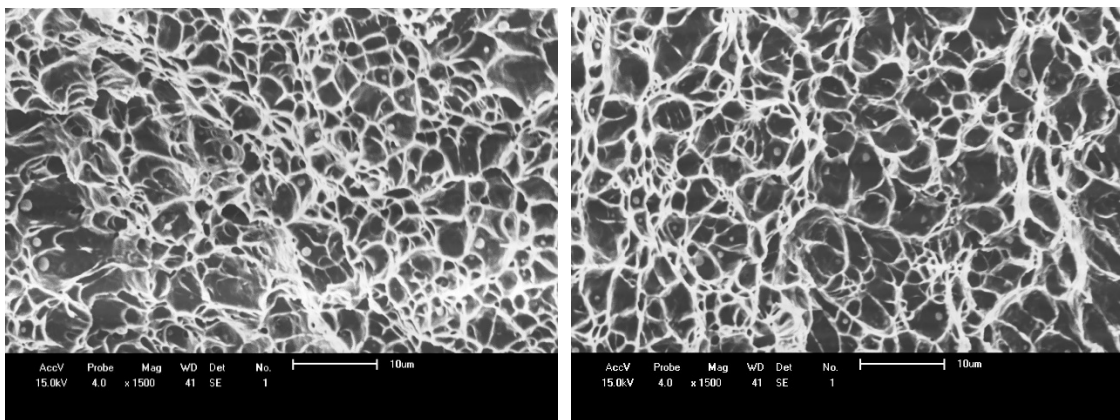


Figura 8 - Soldagem Robotizada Plana. Energia absorvida em ensaio de impacto charpy. a) 104J, b) 150J

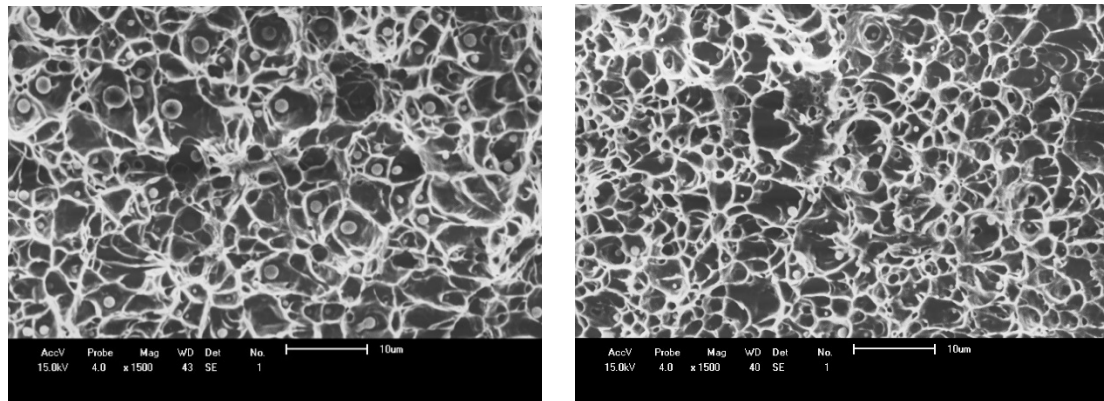


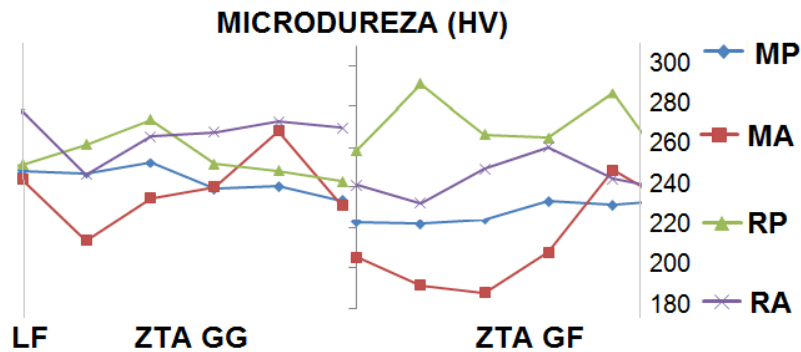
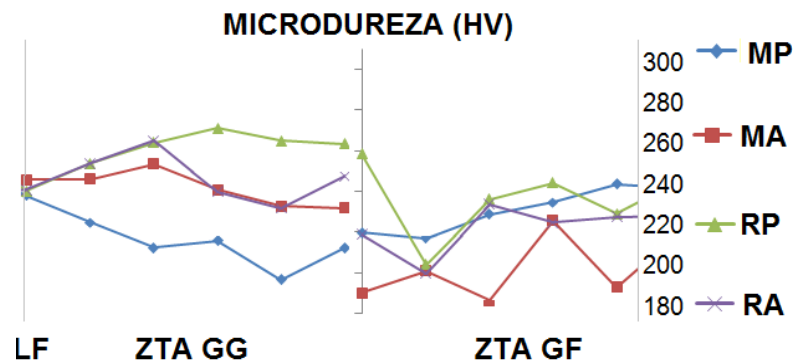
Figura 9 - Soldagem Robotizada Ascendente. Energia absorvida em ensaio de impacto charpy. a) 112J, b) 212J

Com valores de microdureza na ZTA das regiões adjacentes aos passes de acabamento, enchimento e raiz, foi determinado o valor médio em cada região, conforme apresentado na Tabela 4, onde pode-se perceber que os valores de dureza tanto na região de grãos finos quanto na região de grãos grosseiros nas ZTA's obtidas com a soldagem manual, foram em geral inferiores àqueles obtidos com a soldagem automatizada.

Tabela 4 - Valores médios de microdureza na ZTA (HV).

PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	REGIÃO DA ZTA	ACAB	ENCH	RAIZ
MP	GF	227 ± 5	229 ± 11	217 ± 7
	GG	243 ± 7	214 ± 10	251 ± 8
MA	GF	208 ± 24	199 ± 16	225 ± 28
	GG	239 ± 19	241 ± 9	248 ± 38
RP	GF	273 ± 15	234 ± 20	226 ± 7
	GG	256 ± 12	263 ± 6	250 ± 5
RA	GF	245 ± 10	221 ± 13	223 ± 11
	GG	264 ± 10	248 ± 12	264 ± 17

Nas Figuras 10, 11 e 12 têm-se os valores médios de microdureza na ZTA das regiões adjacentes aos passes de acabamento, enchimento e raiz respectivamente, ou seja, considerando o lado da junta com chanfro reto.

**Figura 102** - Medidas De Microdureza Na ZTA Adjacente Aos Passes De Acabamento Na Região De Grão Grosso (GG) E Grão Fino (GF).**Figura 11** - Medidas de microdureza na ZTA adjacente aos passes de enchimento na região de Grão Grosso (GG) e Grão Fino (GF).

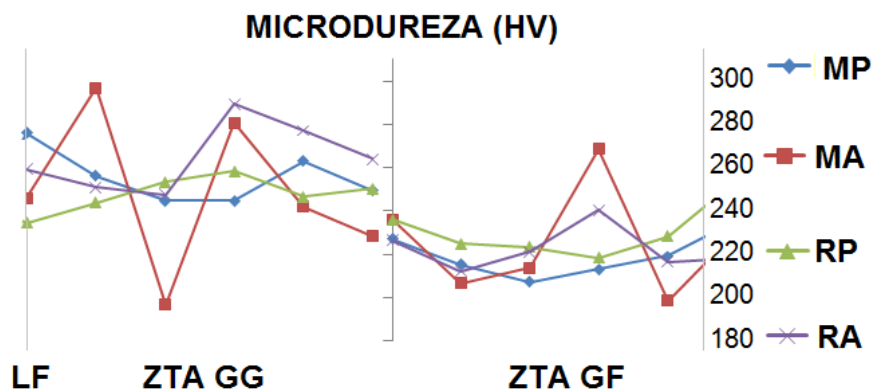


Figura 12 - Medidas De Microdureza Na ZTA Adjacente Ao Passe De Raiz Na Região De Grão Grosseiro (GG) E Grão Fino (GF).

De acordo com os resultados de microdureza apresentados, e considerando as medidas realizadas na região adjacente aos passes de acabamento, tem-se que nos procedimentos manuais a redução da taxa de resfriamento aumenta a possibilidade de Ferrita de Widmasttaten na ZTA, e queda significativa na resistência mecânica da junta, o que é preocupante para os aços ARBL, cujo principal objetivo é possuir alta resistência mecânica associada à boa tenacidade [7].

Durand [3], Linnert [10] e Ordóñez [4] também observaram que na soldagem mutipasse de aço API 5L X65 e X80, o aumento na energia de soldagem propiciou uma redução da taxa de resfriamento, causando aumento do tamanho de grão na ZTA com a conseqüente queda de dureza nesta região.

No passe de enchimento não se observa uma diferença muito significativa nos valores de microdureza, entretanto, para o processo manual os valores médios de dureza continuam inferiores aos obtidos com os procedimentos empregando processo automatizado.

Já nos passes de raiz observa-se uma irregularidade elevada nos valores de microdureza nas soldagens executadas com o procedimento MA, apresentando picos de alta e baixa dureza, que pode ser atribuído à presença isolada de fases com elevada dureza; as maiores temperaturas do procedimento com maior energia de soldagem foram suficientes para promover a dissociação dos carbeto, microconstituente do A-M [11], o que pode ter provocado os pontos de alta dureza localizados.

4 CONCLUSÃO

Com a soldagem utilizando processo FCAW de forma robotizada, foi possível obter uma ZTA mais uniforme ao longo da junta soldada; ambos os passes de Raiz, Enchimento e Acabamento apresentam aporte térmico semelhante e inferior ao apresentado pelo processo manual, levando em consideração a posição da soldagem (plana ou ascendente).

Os valores de microdureza na ZTA apresentaram um ligeiro aumento quando soldadas com processo FCAW robotizado, com uma microestrutura mais refinada que as juntas soldadas com processo SMAW manual.

Tendo em vista que o aporte e a taxa de resfriamento influenciam diretamente na microestrutura da ZTA, o processo de soldagem de forma manual possibilita a formação de microestrutura que favorece a queda significativa na resistência

mecânica da junta. Em contrapartida as juntas soldadas pelo processo FCAW robotizado demonstrou resistência mais uniforme ao longo de toda a peça.

REFERÊNCIAS

- 1 American Petroleum Institute - API 5L, Specification for Line Pipe. Washington, 42nd ed. January 2000. 153 p.
- 2 Silva, M. C. Determinação Experimental da Tenacidade à Fratura da Zona Termicamente Afetada de Junta Soldada de Aço API 5L X80. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, p. 114. 2009. (Tese de doutorado).
- 3 Durand, R. Z. S. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Soldagem Circunferencial do Aço API 5L X80 por Processos de Soldagem Semi-Automática com Proteção Gasosa. Dissertação de Mestrado – PUC. 2007.
- 4 Ordóñez, R. E. C. Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L X80 com Diferentes Arames Tubulares. Unicamp. São Paulo - SP, p. 130p. 2004. (Dissertação de Mestrado)
- 5 Laitinen, R. Improvement of Weld HAZ Toughness at Low Heat Input by Controlling the Distribution of A-M Constituents. University of Oulu- Academic Dissertation. Oulu, Finland, p. 204. 2006. (ISBN:951-42-8001-6/ ISSN: 0355-3213).
- 6 Davis, C. L.; King, J. E. Cleavage initiation in Intercritically Reheated Coarse-Grained Heat Affected Zone: Part I. Fractographic evidence. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 25A, p. 563–573, March 1994.
- 7 Bhadeshia, H. K. D. H.; Honeycombe, R. W. K. Steels – Microstructure and Properties. 3. ed. [S.l.]: Published by Elsevier Ltd., 2006.
- 8 Almeida, D. M., Maia, N. S., Bracarense, A.Q., Medeiros, E. B., Maciel, T. M., Santos, M. A., “Characterization of Steel Pipeline Damage Using Acoustic Emission Technique”. Soldagem & Inspeção, v. 11, p. 309-316, 2007.
- 9 ASTM E23. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials - ASTM E23-02a, 2001.
- 10 Linnert, G. E. welding Metallurgy – Carbon and Alloy Steels. 4th ed. Miami: American Welding Society, 1994. 940 p.
- 11 Fairchild, D. P., Local Brittle Zones in Structural Welds, in Welding Metallurgy of Structural Steel, 1987, p. 303-318.