

CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA E MECÂNICA DE TUBO DE AÇO API 5L X70 SOLDADO COM MULTIPASSES PELO PROCESSO SMAW EM CONDIÇÕES ESPECÍFICAS DE ENERGIA*

Angel Rafael Arce Chilque¹
Camila Rita de Souzar²
Wanderson Antônio Martins²

Resumo

O presente trabalho trata do estudo micrográfico e mecânico de junta soldada a multipasses de tubo de aço API 5L X70, pelo processo manual com eletrodo revestido (SMAW) para os passes de raiz, enchimento e acabamento na posição vertical 3G. Em acordo com API 1104, o consumível escolhido foi eletrodo revestido básico E 9018 – M, a fim de atender a parâmetros de soldabilidade e permitir a comparação dos resultados com trabalhos anteriores. Foram realizados ensaios macrográficos e micrográficos qualitativos da junta soldada e do metal de base, bem como a medição da microdureza Vickers (HV) ao longo da junta e medição do tamanho de grão da região de superaquecimento. Ensaios mecânicos de dobramento, tração e impacto também foram realizados. Os resultados dos ensaios Charpy foram correlacionados com a estrutura metalúrgica, tamanho de grão e microconstituintes presentes na junta soldada.

Palavras-chave: Aço API 5L X70; Gasodutos; Resistência ao impacto; Metalurgia da soldagem.

METALOGRAPHIC AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF PIPE LINE API 5L X70 WELDED WITH MULTIPASS SMAW WELDING PROCESS IN SPECIFIC CONDITIONS OF HEAT INPUT

Abstract

This work deals with the micrographic study and mechanical splice welded steel pipe API 5L X70 multipass, the manual process with coated electrodes (SMAW) for root passes, filling and finishing in 3G upright. In accordance with API 1104, the chosen consumable electrode was coated basic E 9018 - M, in order to meet the weldability of parameters and comparison of results with previous work. Macrographics tests were conducted and qualitative micrographs of the weld and the base metal as well as the measurement of Vickers hardness (HV) across the weld, measuring the grain size of the superheat region. Mechanical bending tests, tensile and impact were also conducted. The results of Charpy tests were correlated with the metallurgical structure, grain size and microconstituents present in the welded joint.

Keywords: API 5 L X70 steel; Pipelines; Impact test; Welding metallurgy.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Docteur es Sciences Physiques, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Faculdade de Engenharia (FaEnge), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Graduada em Engenharia Metalúrgica, Faculdade de Engenharia (FaEnge), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A construção de métodos de armazenamento e transporte de petróleo e gases tem sido alvo de estudo acerca da fabricação de tubos que suportem com segurança e eficácia a ação desses produtos. A fabricação de tubos com boas características mecânicas e de grandes diâmetros é um dos desafios da siderurgia atual.

Os chamados aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) foram desenvolvidos a fim de atender às indústrias automobilísticas, estruturais, plataformas *offshore*, gasodutos. Esses aços apresentam elevado limite de resistência mecânica, boa tenacidade, boa conformabilidade e boa soldabilidade devido ao baixo carbono equivalente.

Os aços ARBL possibilitaram uma redução considerável do custo de produção, manuseio e soldagem de tubos, uma vez que se reduziram significativamente as espessuras das paredes. Essa prática possibilitou o aumento da pressão interna, o que implica no transporte e armazenagem de maior volume de gás e petróleo.

De acordo com CAOI [1] a Alemanha foi pioneira na utilização dos aços API 5L X70 (*Specification for LinePipe Steel*) para a construção de dutos de gás. Na América Latina, o gasoduto Bolívia – Brasil, foi construído com o aço API 5L X70.

O objetivo deste trabalho é estudar as propriedades metalúrgicas e mecânicas em uma junta soldada pelo sistema multipasse com média energia de soldagem. O processo utilizado para a união do tubo de diâmetro similar aos utilizados em gasodutos foi o arco elétrico manual com eletrodo básico revestido tipo AWS E 9018 – M. Para tais efeitos, foram realizados ensaios metalográficos a fim de qualificar e quantificar as variações metalúrgicas. Durante o procedimento foram realizadas medições de microdureza *Vickers* ao longo da ZTA (Zona Termicamente Afetada), ZF (Zona Fundida) e MB (Metal de Base). Foram feitos também ensaios de dobramento, tração e *Charpy* a fim de avaliar a ductilidade, resistência e tenacidade da junta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço de alta resistência baixa liga (ARBL) API 5L X70, neste trabalho representado por um tubo de 3/8" de espessura é o metal de base que foi soldado pelo processo a arco elétrico manual (SMAW). A tabela 1 traz a composição química do metal de base determinada pelo espectrômetro de emissão ótica e indução magnética – *Thermo Scientific ARL 4460 Metals Analyzer* da ArcelorMittal Monlevade. Para a soldagem dos passes de raiz, enchimento e acabamento foi utilizado o eletrodo revestido básico E 9018-M cuja composição química é mostrada na tabela 2.

Tabela 1. Composição Química do aço API 5L X70

| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------------------|-----------------|
| 0,065 | 0,271 | 1,542 | 0,016 | 0,004 | 0,013 | 0,248 | 0,001 |
| Cu | Al | V | Nb | Ti | V+Nb+Ti | CE _{iiv} | P _{cm} |
| 0,008 | 0,046 | 0,05 | 0,062 | 0,014 | 0,126 | 0,391 | 0,171 |

Tabela 2. Composição Química do eletrodo E 9018-M [2]

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|-------|
| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo |
| 0,072 | 0,418 | 1,087 | 0,023 | 0,013 | 1,589 | 0,084 | 0,170 |
| Cu | Al | V | Nb | Ti | V+Nb+Ti | CE iiw | Pcm |
| 0,035 | 0,002 | 0,014 | 0,003 | 0,023 | 0,04 | 0,415 | 0,210 |

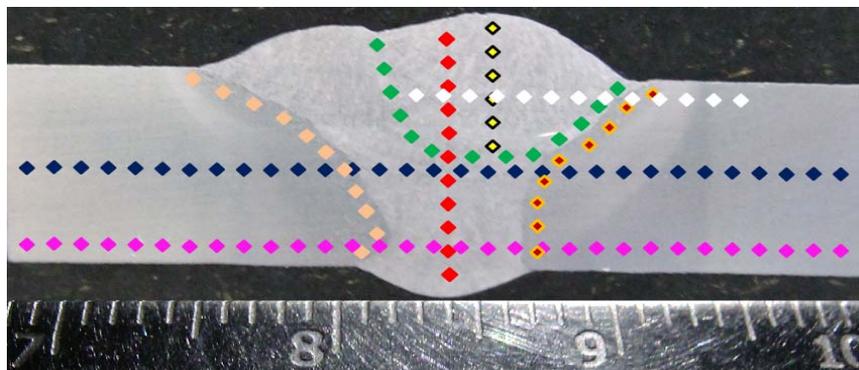
A soldagem foi realizada conforme parâmetros que podem ser observados na Tabela 3. Os segmentos circunferenciais foram soldados simulando a posição vertical ascendente 3G.

Tabela 3. Parâmetros de Soldagem

| Processo | Cordão | Corrente (A) | Tensão (V) | Velocidade (mm/s) | Aporte Térmico (J/mm) | η |
|----------|---------------|--------------|------------|-------------------|-----------------------|--------|
| SMAW | RAIZ | 110 | 24,25 | 81,35 | 1554,26 | 0,79 |
| SMAW | ENCHIMENTO | 122 | 24,25 | 133,33 | 1094,71 | 0,79 |
| SMAW | 1° ACABAMENTO | 118 | 24,25 | 137,62 | 985,58 | 0,79 |
| SMAW | 2° ACABAMENTO | 123 | 24,25 | 121,21 | 1166,42 | 0,79 |

A análise metalográfica foi realizada em microscópio óptico Leitz, modelo Aristomet e analisador de imagem Olympus Stream.

Os perfis de microdureza Vickers foram obtidos no microdurômetro da SHIMADZU®, modelo HMV – 2T. Foram realizadas medições de microdureza conforme mostra a figura 1. As larguras da ZTA foram medidas em 10 posições, o que permitiu determinar estatisticamente a largura de cada região da solda.



- ◆ Microdureza vertical da ZF
- ◆ Microdureza horizontal – TemperBead
- ◆ Microdureza vertical do último cordão de acabamento
- ◇ Microdureza horizontal do último cordão de acabamento
- ◆ Microdureza na linha de fusão do último cordão de acabamento
- ◆ Microdureza na lateral direita - GGZTA
- ◆ Microdureza na lateral esquerda - GGZTA
- ◆ Microdureza horizontal do passe de raiz

Figura 1. Perfis de microdureza Vickers

Os ensaios mecânicos de tração e dobramentos de raiz e lateral foram realizados na máquina universal de ensaios SHIMADZU® modelo AG-IC 100 KN. A fim de avaliar

a tenacidade da junta soldada às temperaturas de -20°C e -40°C foram realizados ensaios de impacto em corpos de prova com entalhe na zona fundida, metal de base e linha de fusão (abrangendo ZF e ZTA do último cordão e MB).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química

A norma API 5L 2000 [3] descreve os valores recomendados de Carbono Equivalente (CE_{IIW}) e Parâmetro de Carbono Equivalente (P_{cm}) como aceitáveis para chapas com espessura inferior a 20,3mm sendo iguais a 0,43% e 0,25%, respectivamente. A tabela 1 traz a composição química do metal de base, bem como os valores de CE_{IIW} igual a 0,391% e P_{cm} igual a 0,171%.

Em se tratando da somatória de V, Nb e Ti a norma API 5L 2000 indica que a soma desses elementos não pode exceder 0,15% e a tabela 2 mostra que $V+NB+Ti$ é 0,126%.

O metal de adição que é o eletrodo E 9018-M regido pela norma AWS apresenta elementos de liga com teores mais elevados de carbono, molibdênio, níquel, titânio e cobre que o metal de base, o que resulta em CE_{IIW} igual a 0,415% e P_{cm} igual a 0,210%.

3.2 Metalografia

A figura 2 apresenta a macrografia da junta soldada em estudo.

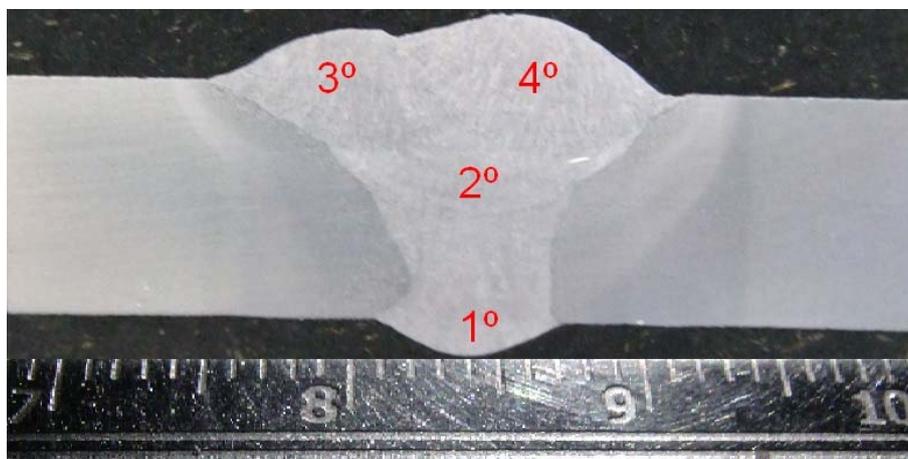


Figura 2. Disposição dos cordões de solda

O primeiro cordão é o passe de raiz, o segundo cordão representa o passe de enchimento e o terceiro e quarto cordões os passes de acabamento.

3.3 Micrografia

A figura 3 permite a análise metalográfica do metal de base que apresenta ferrita, cementita e bainita. Em se tratando do último cordão de acabamento, a micrografia da região de grão fino permite observar o refinamento de grão causado pelo revenimento ocasionado pelo aporte térmico de soldagem. A região de grão grosseiro apresenta ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita de segunda fase não alinhada (FS(NA)) e ferrita poligonal intragranular (FP(I)). Na zona fundida,

caracterizada pela combinação metalúrgica do metal de adição, observou-se a presença de ferrita de segunda fase alinhada (FS (A)), ferrita de segunda fase não alinhada (FS(NA), ferrita poligonal intragranular (FP (I), ferrita poligonal de contorno de grão (FP(G)) e ferrita acicular (AF).

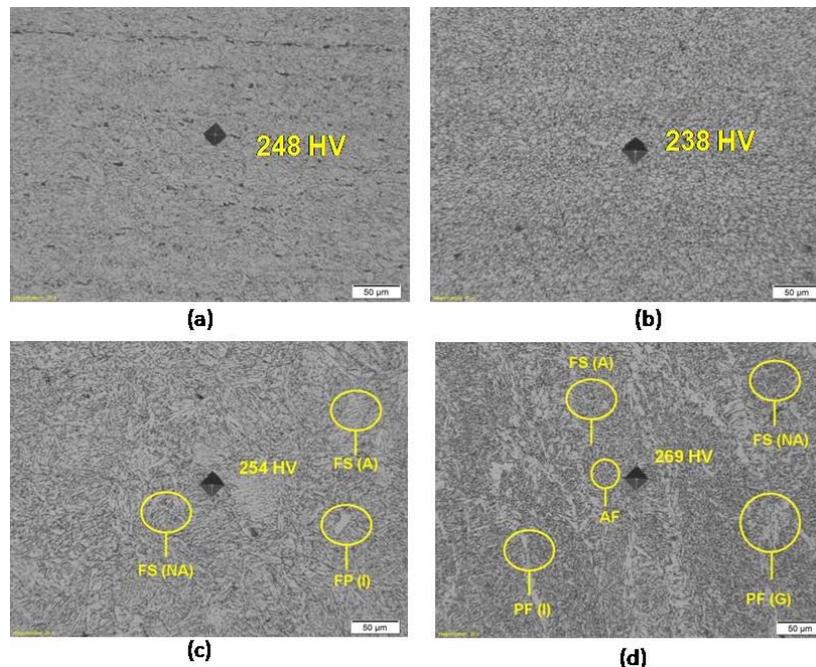


Figura 3. (a) micrografia do metal de base (b) micrografia da região de GF do último cordão (c) micrografia da região de GG do último cordão de acabamento e (d) micrografia da ZF do último cordão de acabamento

3.4 MetalografiaSemi-Quantitativa

A região de refino de grão apresenta grãos de ferrita equiaxial e perlita (ferrita e cementita). A microdureza de 238 HV aqui apresentada se dá sob o efeito do tratamento térmico de normalização exercido pelo aporte térmico. Na região de superaquecimento (grãos grosseiros) do último cordão de acabamento, foi encontrado um valor médio de tamanho de grão da região de superaquecimento de 34 micras, o que é justificado pela média energia de soldagem utilizada (1166,42 J/mm) e a microdureza na ordem de 254 HV. A largura da ZTA obtida foi de 3,08 mm para o aporte utilizado nesse trabalho.

De acordo com MODENESI [4] o tamanho de grão austenítico é governado basicamente pelo ciclo térmico de soldagem e pela temperatura de crescimento de grão do material. MODENESI também mostra que elementos nióbio, vanádio ou titânio podem ajudar a minimizar o crescimento de grão.

Para a situação de soldado com média energia (1166,42 J/mm) obteve-se tamanho de grão médio de 34 micras, equivalendo a número ASTM de 6,8. O tamanho de grão médio encontrado é três vezes maior que os encontrados no metal de base, que é da aproximadamente 11micras e número ASTM entre 10 e 11 conforme citado no trabalho de HILLENBRAND *et al.* [5].

A figura 4 traz os principais perfis de microdureza e a comparação do crescimento do antigo grão austenítico com o metal de base.

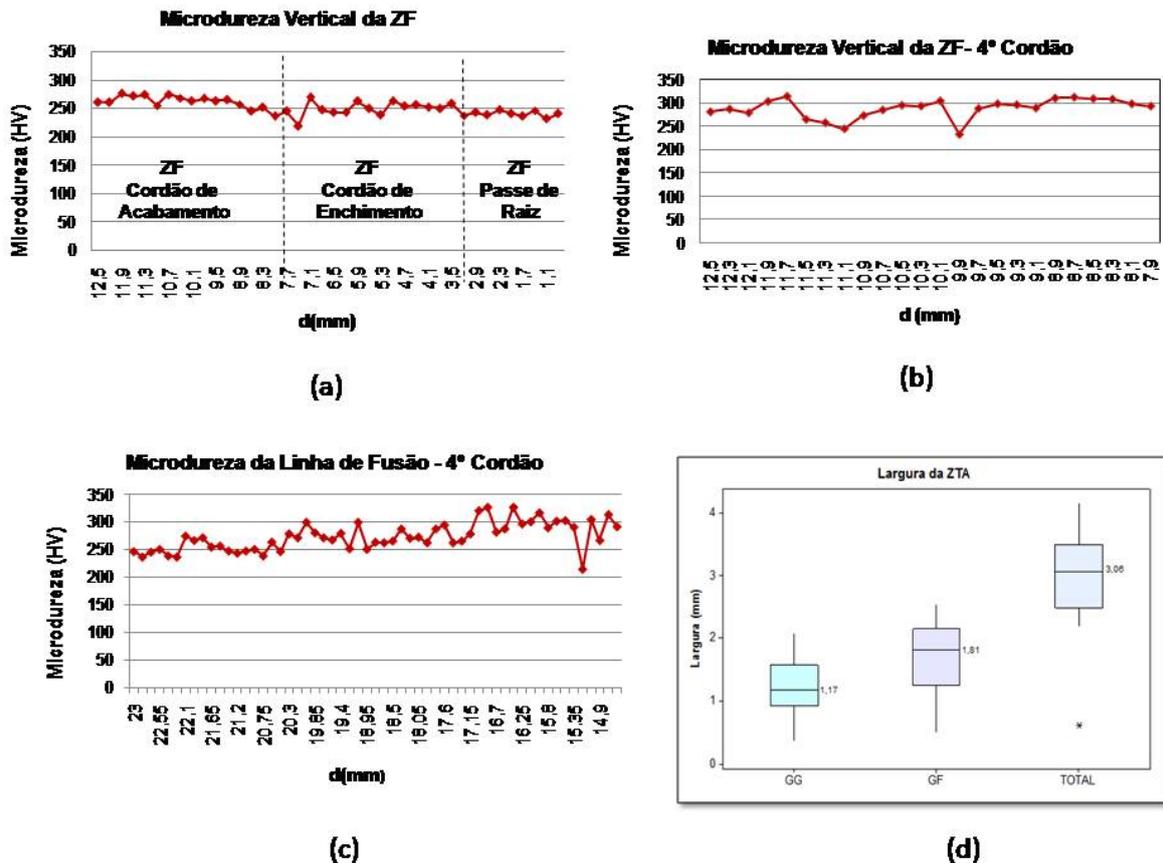


Figura 4. (a) microdureza vertical da ZF (b) microdureza vertical do 4ª cordão (c) microdureza da linha de fusão do 4º cordão (d) largura da ZTA

Nesse trabalho, a energia de soldagem da ordem de 1200J/mm promoveu um crescimento considerável da ZTA, sendo que a região de grão fino foi 54,7% maior que a região de grão grosseiro. Costa e Rocha [6] trabalharam no aço API 5L X80 com energia de 640 J/mm e obtiveram extensão da ZTA igual a 1,60 mm. Nesse mesmo aço, com a junta em “K” ARCE CH *et al.* [7] obtiveram aporte térmico de 2470J/mm e largura da ZTA igual a 3,80mm.

3.5 Ensaio de Tração e Dobramento

A tabela 4 traz os valores encontrados no ensaio de tração. A resistência da junta soldada é maior que o do metal de base, o que foi percebido também pela ruptura do corpo de prova que se deu no metal de base.

A partir do ensaio de dobramento, pode-se avaliar a ductilidade da junta, visto que as fissuras apresentadas são aceitáveis conforme norma API 1104 [8]. As tabelas 5 e 6 permitem discutir que as fissuras apresentadas nos testes de dobramento lateral e de raiz são menores que 3mm a uma curvatura de 180°.

Tabela 4. Resultado do ensaio de tração na junta soldada

| CP | Dimensões (mm) | Seção (mm) | Limite Especificado (MPa) | Limite de Resistência (MPa) | Local de ruptura |
|----|----------------|------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|
| 1 | 15 x 10 | 150 | 485 | 521,105 | MB |
| 2 | 15 x 10 | 150 | 485 | 508,207 | MB |
| 3 | 15 x 10 | 150 | 485 | 532,184 | MB |

Tabela 5. Resultados do ensaio de dobramento lateral

| CP | Dimensões (mm) | Diâmetro Cutelo (mm) | Distância entre roletes (mm) | Ângulo de dobramento (graus) | Resultados |
|----|----------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| 1 | 15 x 10 | 7 | 80 | 180 | Fissura < 3 mm |
| 2 | 15 x 10 | 7 | 80 | 180 | Fissura < 3 mm |
| 3 | 15 x 10 | 7 | 80 | 180 | Fissura < 3 mm |

Tabela 6. Resultados do ensaio de dobramento de raiz

| CP | Dimensões (mm) | Diâmetro Cutelo (mm) | Distância entre roletes (mm) | Ângulo de dobramento (graus) | Resultados |
|----|----------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1 | 15 x 10 | 7 | 80 | 180 | Não houve fissura |
| 2 | 15 x 10 | 7 | 80 | 180 | Não houve fissura |
| 3 | 15 x 10 | 7 | 80 | 180 | Não houve fissura |

3.6 Ensaio de Impacto

Tabela 6. Energia de Impacto absorvida

| Região | Energia de impacto (J) -20°C | Energia de impacto Convertida (J)-20°C | Energia de impacto (J) -40°C | Energia de impacto Convertida (J)-40°C | Estrutura Metalúrgica |
|------------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|-----------------------------|
| MB | 109,8 | 122,88 | 119,6 | 132,6 | Ferrita, Bainita, Perlita |
| | 107,8 | 120,8 | 107,8 | 120,8 | |
| | 107,8 | 120,8 | 109,8 | 122,88 | |
| ZF Junta | 49,01 | 65,7 | 33,33 | 44,66 | FS (A), FS (NA), AF, PF (G) |
| | 39,21 | 52,55 | 27,45 | 36,77 | |
| | 50,98 | 68,34 | 21,56 | 28,87 | |
| Linha de Fusão (Mista) | 98,03 | 111,03 | 107,84 | 120,89 | ZF ZTA MB |
| | 109,8 | 122,88 | 100 | 113 | |
| | 64,7 | 86,75 | 39,21 | 52,55 | |

A partir da análise da tabela 6, pode-se observar que nas temperaturas indicadas, o metal de base apresenta boa resistência ao impacto (média) e a zona fundida tenacidade satisfatória em se tratando de uma região com alta resistência mecânica. Os resultados do ensaio de impacto Charpy V para o aço API 5L X70 dispostos na tabela acima mostram que o metal de base apresentou energia média de ruptura a -20°C e -40°C de respectivamente 121,49J e 125,42J. Os valores obtidos correspondem à fratura dúctil e são confirmados através da análise fractográfica. A fractografia mostra presença de alvéolos (*dimples*) por toda a superfície de fratura, conforme é visto nas figuras 5(a) e 5(b).

Os resultados obtidos na ZF da junta a -20°C e -40°C mostram que para uma energia média de soldagem de 1200 J/mm foram obtidas energias de impacto média de 62,19J e 36,76J respectivamente, caracterizando uma fratura de aspecto frágil. A análise fractográfica exhibe fratura frágil em ambas as temperaturas, porém, a -20°C há a presença de pequenas regiões com fratura dúctil. As figuras 5(c) e 5(d) exibem a superfície de fratura a -20°C e -40°C.

Os resultados alcançados na linha de fusão mista (ZTA, ZF e MB) 106,88J e 95,48J, respectivamente, valores que caracterizam fraturas dúcteis. Tais valores de energia alcançados nesta região se dão pela presença de zonas mistas. A fractografia

mostra a presença predominante de fraturas dúcteis com algumas regiões apresentando fraturas frágeis. As figuras 5(e) e 5(f) mostram a superfície de fratura a -20°C e a -40°C .

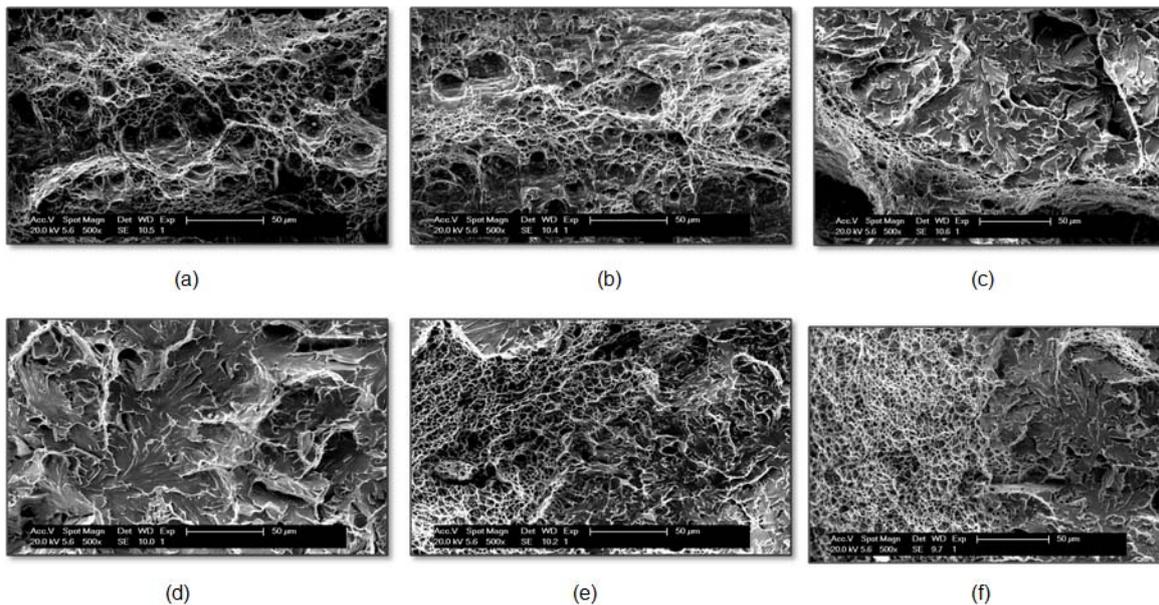


Figura 5. (a) Fractografia do metal de base a -20°C , (b) Fractografia do metal de base a -40°C , (c) Fractografia da zona fundida a -20°C , (d) Fractografia da zona fundida a -40°C , (e) Fractografia da linha de fusão mista a -20°C e (f) Fractografia da linha de fusão mista a -40°C . (Aumento de 500 X - Microscópio Eletrônico de Varredura).

4 CONCLUSÃO

Abaixo estão descritas as principais conclusões obtidas a partir dos resultados encontrados nesse trabalho:

1. A composição química (Ceq e Pcm) do metal de base e consumível de soldagem apresenta boa compatibilidade e boa soldabilidade com os parâmetros que envolvam médio aporte térmico.
2. A junta soldada apresentou boa resistência mecânica e ductilidade, uma vez que mediante teste de tração, a ruptura aconteceu no metal de base e em se tratando de ensaios de dobramento não houve fissuras maiores que 3mm atingindo curvatura de 180° .

Em relação à ZTA:

3. A região de grão fino da ZTA foi significativamente maior do que a região de grão grosseiro quando soldado com média energia de soldagem. Estes resultados são coerentes com os encontrados por outros autores [4,5]. A GGZTA do 4° cordão apresentou um tamanho de grão de aproximadamente 34 micras, na condição de 1166,42 J/mm com microdureza de 215 HV.
4. A ZTA apresentou energia de impacto equivalente a 43J a -40°C . Este resultado está relacionado ao tamanho de grão e media energia de soldagem.

Em relação à ZF:

5. Apresentou estrutura ferrítica de segunda fase alinhada e não alinhada, ferrita poligonal de contorno de grão e ainda ferrita acicular. A média de microdureza foi de 269 HV e energia de impacto de 62 Je 27 J a -20°C e -40°C respectivamente.

6. Apresenta uma resistência mecânica e microdureza *Vickers* superior ao metal de base, sendo pelo tanto, compatível e adequado com o metal de base. Os parâmetros selecionados têm se mostrado apropriados quanto a soldabilidade desse aço.

Agradecimentos

A FAPEMIG pelo consentimento de bolsa a um dos autores. A ArcelorMittal Monlevade pelo apoio em todos os testes envolvendo microscopia óptica e eletrônica. A ESAB pela realização dos ensaios de impacto e fornecimento dos consumíveis. Aos amigos Daniel e João Bosco pela preparação dos corpos de prova. A LRSS da UFMG pelo fornecimento do tubo. Ao CETEN pelo apoio logístico. Aos amigos do grupo de soldagem da UEMG nas pessoas do professor Wilson, Nathália, Larissa, Sheron e Priscila.

REFERÊNCIAS

- 1 Caloi, Giselle; Bott, Ivani de Souza. Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos Testes Tekken e de Implante. Rio de Janeiro, 2008. 145 p. 93. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- 2 ARCE, A. R. C.; et al. Estudo da soldabilidade do aço API 5L X80 na soldagem ao arco elétrico manual, mecanizado e robotizado. Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção – Exposol, Rio de Janeiro, 2008.
- 3 API 5L 2000. Specification for Line Pipe. API Specification 5L Forth-second edition, January 2000. Washington, D.C, 2000.
- 4 MODENESI, P. J. Soldabilidade dos aços transformáveis. Belo Horizonte. Ed UFMG, 2010.
- 5 HILLENBRAND, H., GRÄF, M., KALWA, C. Development and production of high strength pipeline steels. In: Niobium 2001 – Science & Technology, 2001, Orlando, Florida, USA. Proceedings of the international symposium niobium. USA: Niobium 2001 Limited, 2001. p. 543-569.
- 6 COSTA, P. S.; ROCHA, R. S. C. Caracterização metalográfica de soldas depositadas em camadas sobre chapa de aço ARBL X80 utilizando o processo de soldagem robotizada com arame tubular. 2013.76f. Monografia. (Trabalho de conclusão de curso) - Universidade do Estado de Minas Gerais - Faculdade de Engenharia, João Monlevade.
- 7 ARCE CH. A.R., et. al. Determinação da resistência ao impacto da região de grão grosseiro da ZTA do aço API5L X80 soldado em condições de alta energia. I Congresso Pan-Americano de Soldagem, São Paulo, 2014. p
- 8 API 1104. Standard for Welding Pipelines and Related Facilities. American Petroleum Institute, Washington, DC. 2005.