

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DE AÇO API-5L-X70 APÓS SOLDAGEM PELO MÉTODO DE ARCO SUBMERSO*

Nicolangelo Del Busso¹
Waldemar Alfredo Monteiro²

Resumo

A soldagem é um processo industrial empregado na indústria do petróleo e em minerodutos devido ao sua excelente resistência mecânica. Os seus parâmetros provocam alterações metalúrgicas significativas no metal de solda. Neste trabalho foi estudado o aço microligado da classe API-5L-X70 em termos de microestrutura (metalografia e fractografia por microscopia óptica e eletrônica) e propriedades mecânicas (ensaio de tração a temperatura ambiente, dureza, dobramento e ensaio de impacto Charpy a -20°C e a 0°C) após soldagem em arco submerso, nas regiões da zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB). O exame metalográfico apresentou microestrutura bandeada consistindo de ferrita poligonal, perlita e bainita, com pequeno tamanho de grão. Os resultados mostram o aumento da resistência mecânica influenciada pela presença de ferrita acicular. Análise fractográfica após ensaios mecânicos revelam comportamento dúctil-frágil.

Palavras-chave: Soldagem em arco submerso; Aço API-5L-X70; Fractografia; Propriedade mecânica; Microestrutura.

MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION IN API 5L X70 STEEL AFTER SUBMERGED ARC WELDING PROCESS

Abstract

Welding is an industrial process used in the petroleum industry and for iron ore pipelines due its better mechanical resistance. Their parameters cause substantial metallurgical changes in the weld metal. This research shows the microstructure and mechanical behavior of API - 5L - X70 submerged arc welding process in welding, thermal affected zone and matrix regions. Charpy impact tests are performed at -20°C and 0°C temperatures. Tensile tests are realized at room temperature. The metallographic examination showed a banded microstructure consisting of polygonal ferrite and pearlite, with smaller grain size and presence of a small amount of bainite in the API - 5L - X70 steel. The mechanical tests revealed a ductile-brittle behavior.

Keywords: Submerged arc welding process; API - 5L - X70 Steel; Fractography; Mechanical property; Microstructure.

¹ Engenheiro Mecânico, Professor, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil.

² Físico, Doutor em Ciências, Professor - pesquisador, Centro de Ciências e Tecnologia de Materiais / IPEN e Escola de Engenharia / UPM, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda associado à falta de investimento em infraestrutura tem contribuído para impulsionar a construção de novos minerodutos. Com o desenvolvimento de novos aços microligados que atendam a crescentes requisitos de resistência mecânica e tenacidade, somado à supressão de tratamentos térmicos, e a melhor soldabilidade do produto (exigindo a minimização do carbono nos aços), bem como as técnicas avançadas de soldagem, torna-se cada vez mais necessário executar a caracterização do material na região termicamente afetada pela solda, para permitir a análise e discussão dos resultados, confrontando-os com as características mecânicas desejadas [1 - 3].

Este material apresenta características de boa soldabilidade e altas propriedades mecânicas (resistência à abrasão, resistência à corrosão e tenacidade). Apesar das inúmeras vantagens dos minerodutos em comparação com outros meios de transporte, no Brasil, a rede de dutos é diminuta: 20.000 km, muito abaixo dos 440.000 km dos americanos e dos 42.000 km de dutos do México. Com a capacidade de uso das ferrovias e das rodovias atingindo seus limites, o estado e o setor privado planejam construir dois dutos de extrema relevância logística: pretende-se construir um alcoolduto de 1.150 km de extensão para escoar etanol, destinado à exportação, até o porto de São Sebastião, em São Paulo. Outro projeto de duto é o sistema Minas-Rio, de 525 km de extensão, para interligar as jazidas de minério de ferro localizadas na região de Conceição do Mato Dentro (Minas Gerais) ao Porto de Uçú (Rio de Janeiro), em construção com a utilização de tubos importados do Japão e da Argentina [4 - 6].

Os tubos mais frequentemente utilizados em minerodutos e gasodutos de alta pressão são os aços microligados da classe API-5L-X70. O processo de fabricação dos dutos consta basicamente em calandrar e soldar chapas API-5L-X70, de aproximadamente 16 mm de espessura, formando tubos de 12 m de comprimento e 50 a 60 cm de diâmetro. O conhecimento da estrutura interna do material é importante para a análise estrutural dos dutos. Normalmente a soldagem é feita automaticamente pelo método arco submerso para produção em grande escala com custo reduzido e com excelente qualidade. Qualquer que seja o método de soldagem, nas vizinhanças das soldas aparecerá ZTAs que provocarão queda das propriedades mecânicas, principalmente da tenacidade à fratura e da probabilidade de surgimento de trincas. O trincamento em soldas de dutos é função de um número de variáveis, entre elas, duas das mais importantes são: a dureza (ou nível de resistência do material) e o nível de tensões residuais [7 - 12].

O processo de soldagem pode induzir formação de zonas com elevadas durezas ou concentração de esforços residuais, fazendo com que as soldas sejam particularmente suscetíveis ao trincamento. É sabido que os aços com níveis de dureza elevados são mais suscetíveis a rachaduras do que os aços com níveis de dureza baixos. Com a atual tendência de incrementar os limites de resistência dos aços para dutos, a análise do comportamento das juntas soldadas de dutos em campo torna-se tema de grande interesse de estudos. As malhas dutoviárias são os principais veículos de transporte de minérios de ferro, petróleo e seus derivados, desde as regiões produtoras até os centros consumidores. O aumento da demanda energética tem incentivado a ampliação e a construção de novos minerodutos, oleodutos e gasodutos. A utilização de técnicas de soldagem permite a união destes tubos com confiabilidade e maior economia [3].

A competitividade cada vez mais acirrada entre as diversas usinas siderúrgicas e também entre diferentes tipos de materiais continua promovendo o desenvolvimento de novos aços estruturais como, por exemplo, os aços microligados que atendem a crescentes requisitos de resistência mecânica e tenacidade. Outros aspectos igualmente desejáveis, como a supressão de tratamentos térmicos e melhor soldabilidade do produto, tornam essa evolução ainda mais complexa. Como a melhoria da soldabilidade do produto, exige a minimização do teor de carbono do material, passou a ser utilizado o aço microligado API-5L-X70 (aço de geração mais moderna), na construção de minerodutos, por possuir maior resistência mecânica, sem perda significativa da tenacidade [1, 3].

Além da presença do manganês (Mn) e do silício (Si), que produzem reforço mecânico substitucional, esses aços recebem também pequenas quantidades de elementos de liga como o Nióbio (Nb), o Molibdênio (Mo), o Vanádio (V) e o Titânio (Ti) já conhecidos por sua alta resistência e tenacidade, dispensam tratamentos térmicos posteriores, o que reduz o tempo do processo de fabricação e os custos com energia, motivos pelo qual a indústria brasileira começa a acompanhar a tendência mundial, de usar esses aços em substituição aos aços convencionais, sem prejuízo dos mesmos com relação à soldagens. Denominados como aços microligados de alta resistência e baixa liga (ARBL), eles têm suas composições químicas desenvolvidas para que se alcance elevados valores de propriedades mecânicas. Cada elemento adicionado apresenta uma aplicação mais adequada: titânio, indicado para o controle do tamanho de grão durante o reaquecimento; nióbio para retardar a recristalização durante o processamento; o vanádio é importante para a formação da austenita, que surge no aço acima de 700°C, e na decomposição da mesma, podendo ser usado para o endurecimento por precipitação em temperaturas mais baixas [9 - 16].

O processo de soldagem constitui em praticidade econômica e segura para se unir partes de um material, contudo, esse processo pode apresentar alguns problemas que devem ser avaliados, tais como trincas, porosidades, e modificações microestruturais na ZTA, a qual pode apresentar diferentes microconstituintes, tendo assim um comportamento diferente daquele do MB e da zona fundida (ZF). Diversos processos são empregados para a soldagem de tubos utilizados em minerodutos e oleodutos, desde o processo por eletrodo revestido, que se destaca pela facilidade de aplicação e versatilidade, até processos totalmente automatizados. Quanto aos consumíveis, destacam-se os arames tubulares com proteção gasosa, arames sólidos e arco submerso para utilização em junta de topo [3].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço microligado da série API-5L-X70, que é a mais adequada para ser utilizada em minerodutos, devido as suas características de alta soldabilidade e altas propriedades mecânicas (resistência à abrasão, dureza, tenacidade e resistência à corrosão). Foram realizados todos os experimentos a partir de chapas de aço API-5L-X70, de 16 mm de espessura, doadas pela USIMINAS, com certificado de qualidade. Esta chapa é produzida com baixo teor de carbono e com elementos de liga, com a seguinte composição química, de acordo com a norma API 5L para o grau 70 (USIMINAS) conforme Tabela 1.

Tabela 1- Composição Química do aço API-5L-X70 (% em peso)

Fe	Mn	Si	C	Cu	V	Nb	Ni
98,06	1,45	0,23	0,09	0,08	0,05	0,05	0,01
Cr	Mo	P	Al	Ti	S	Co	
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	

Quanto ao corte e chanfro das chapas para permitir a execução das soldas de topo foi executada nos laboratórios de Soldagem do SENAI “Nadir de Figueiredo” (Osasco / SP). A chapa foi dividida em dois lotes para a execução da solda de topo pelo processo de arco submerso, para reproduzir a exata situação de fabricação dos tubos calandrados e soldados em fábrica. As soldas foram feitas com todos os requisitos que a técnica exige isto é: soldadores qualificados; seleção das características e eletrodos recomendados; execução a solda por arco submerso em dois passes (um de raiz e o outro de acabamento e enchimento), com poça de proteção para posterior corte, descartando-se o início e o final da solda; execução de testes de líquido penetrante para comprovar a sanidade das soldas; controle do resfriamento das juntas soldadas.

Foram usinados os corpos de provas da junta soldada (ZF e ZTA) e do metal base para execução dos ensaios de dobramento (junta soldada: ASME IX Ed. 2013 QW 462.2, ensaios de dobramento lateral a 180°, cutelo de 40 mm, distancia entre roletes de 63 mm; metal base ASTM E290/2009 itens 7.1.2, 8.3 e 8.8), de tração (normas ASME IX Ed. 2013 QW 462.1^a, ASME IX QW 152 e ASTM A 370/2014) com equipamento TINIUS OLSEN MTR-006 (escala 60 toneladas, incerteza $\pm 1\%$) e impacto Charpy (norma ASTM A 370/2014) com equipamento “TINIUS OLSEN” MQI 004, IT 406, capacidade 408 J, incerteza $\pm 1\%$, escolhendo-se cuidadosamente as regiões da zona fundida (arco submerso), da ZTA e do material puro (distante das ZTAs). Os testes de dureza foram efetuados com durômetro HVS10, DUR-023, conforme norma N-133 Rev. L (Petrobras), tração e impacto dos corpos de prova, previamente usinados de acordo com as normas.

Foram obtidas para execução das análises microestruturais corpos de prova em três regiões para a microscopia óptica. A análise fractográfica foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) ZEISS AURIGA do Laboratório de análise microestrutural do SENAI “Nadir de Figueiredo” (Osasco / SP) nas regiões das fraturas dos corpos de prova dos ensaios de impacto. Todos os corpos de prova foram usinados de acordo com as normas estabelecidas para os ensaios de tração e impacto. Basicamente utilizaram-se três jogos de corpos de prova, para cada tipo de ensaio (Tração e Impacto): do MB, da ZTA e da região da zona fundida (arco submerso). Avaliou-se a dureza através do método de penetração (Vickers), nas três regiões distintas acima citadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de dobramento tanto da região da junta soldada (10x16x280mm) quanto da região do metal base (16x38x310mm) apresentaram isenção de descontinuidades garantindo que o processo de soldagem utilizado é adequado à tecnologia de soldagem dos aços API (Figura 1).



Figura 1. Sequência das etapas do ensaio de dobramento do aço API5LX70 na região da zona fundida (ZF).

A Tabela 1 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de tração, estes valores são adequados com relação à resistência mecânica tanto na região da zona fundida (ZF) como no metal de base. O limite de resistência do aço está associado com a taxa de resfriamento presente após o processo de soldagem. Da mesma forma obteve-se boa reprodutibilidade com os valores médios de dureza (Tabela2) obtidos e que são coerentes com os dados de literatura vigente [12 - 15].

Tabela 1. Valor médio dos ensaios de tração do API-5L-X70

Amostras	Limite resistência tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área
Zona fundida	(613 ± 2)	(449 ± 5)	29	62*
Metal Base	(560 ± 2)	(483 ± 3)	37	74

*romperam no metal base.

Dados obtidos nos ensaios de impacto Charpy (Tabela 3) estão condizentes com a literatura atual. Nos ensaios realizados tanto no MB quanto na ZTA são adequados a aplicação do referido aço (tubulações) em minerodutos. Nos ensaios das amostras da região da zona fundida constata-se um valor bem inferior, mas que é o encontrado em trabalho assemelhado [13].

Tabela 2. Valores médios dos ensaios de dureza do API-5L-X70

Amostras	HV10
Metal Base	(194 ± 4)
ZTA	(202 ± 7)
Zona Fundida	(218 ± 4)

Tabela 3. Valores médios dos ensaios de Impacto Charpy do aço API5LX70

Regiões das amostras	Joule
Metal Base (T = - 20 °C)	202
ZTA (T = - 20 °C)	81
Zona Fundida (T = - 20 °C)	19
Metal Base (T = 0 °C)	260
ZTA (T = 0 °C)	106
Zona Fundida (T = 0 °C)	25

Na análise microestrutural utilizou-se a microscopia óptica (MO) e a eletrônica (ME). Observou-se por MO na região do MB uma microestrutura ferrítica (tamanho médio de grão = 8 μm) e perlítica extremamente fina (Figura 2). Na região da ZTA observou-se microestrutura composta por ferrita acicular, ferrita poligonal extremamente refinada e pequena quantidade de bainita; torna-se difícil determinar o seu tamanho de grão. Observações nas regiões da zona fundida (solda propriamente dita) mostram presença de ferrita proeutetóide e ferrita acicular, bem característico de soldas em aços baixa liga. A ferrita acicular neste caso nucleia e cresce a partir de inclusões não metálicas, e é bem conhecido oferecer boa

combinação de resistência e tenacidade. Estas condições sempre dependem da taxa de resfriamento pós-soldagem. A presença de fases não metálicas é visível nas figuras 3 e 4 (regiões escuras).

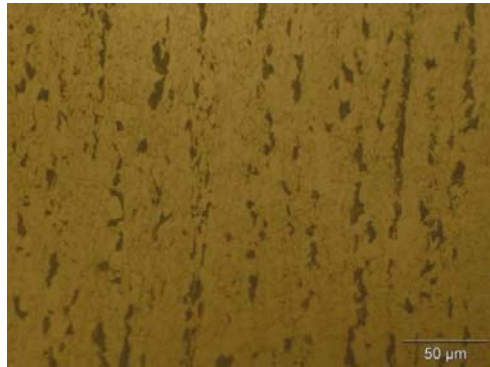


Figura 2- Micrografia óptica do material como recebido (API5LX70) semelhante ao metal da base após solda (ataque químico Nital 2%).

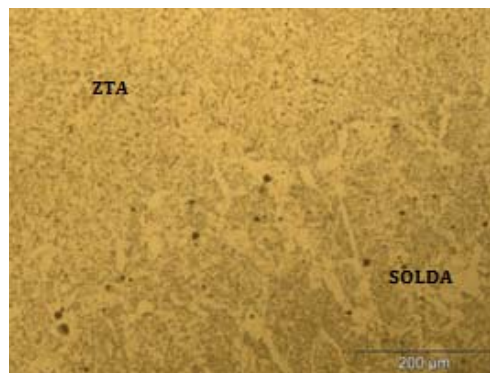


Figura 3- Micrografia óptica da região intermediária entre a ZTA e da Zona Fundida (solda) (API5LX70) (ataque químico Nital 2%).

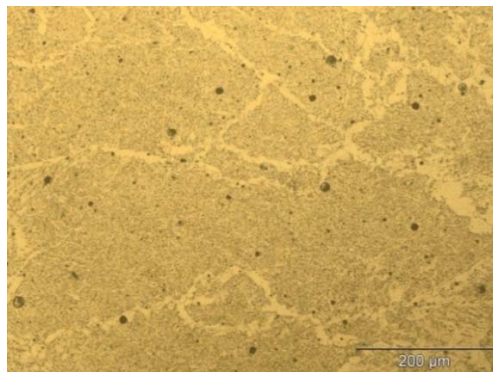


Figura 4- Micrografia óptica da região da zona fundida (ZF) do aço API5LX70 (ataque químico: Nital2%). Presença de fase dual ferrita – bainita.

Observações fractográficas (MEV) realizadas em amostras no aço API-5L-X70 após ensaios de impacto Charpy 0°C indicam no setor da solda comportamento de transição do material. Constatam-se regiões de fratura por clivagem e também regiões com alvéolos resultantes de deformação plástica do material, típicos de fratura dúctil (Figs. 5 - 7). Observações fractográficas (MEV) realizadas em amostras no aço API-5L-X70 após de ensaio de impacto Charpy a - 20 °C também indicaram no setor da zona fundida um comportamento de transição do material; presença de regiões de fratura por clivagem e também regiões com alvéolos resultantes de deformação plástica do material, típicos de fratura dúctil (Figs. 8 e 9).

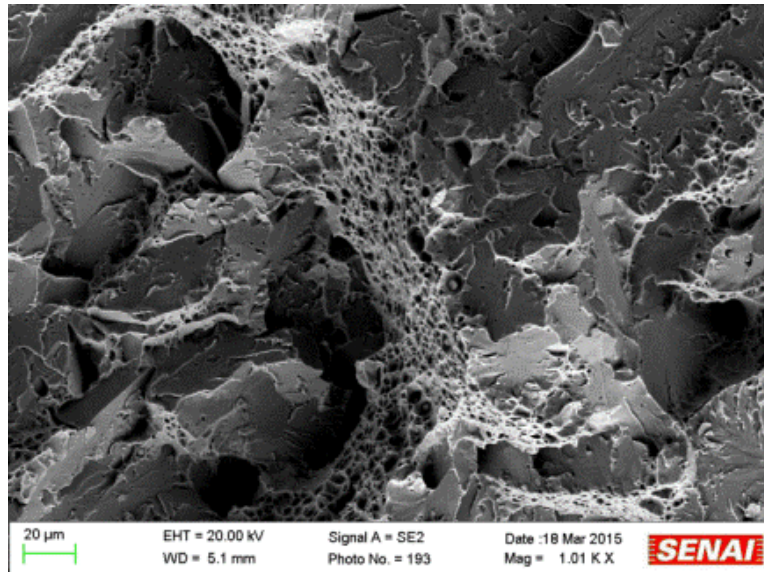


Figura 5. Micrografia eletrônica (MEV - imagem com elétrons secundários) de região da zona fundida após ensaio de impacto Charpy a 0°C apresentando as regiões dúcteis e frágeis.

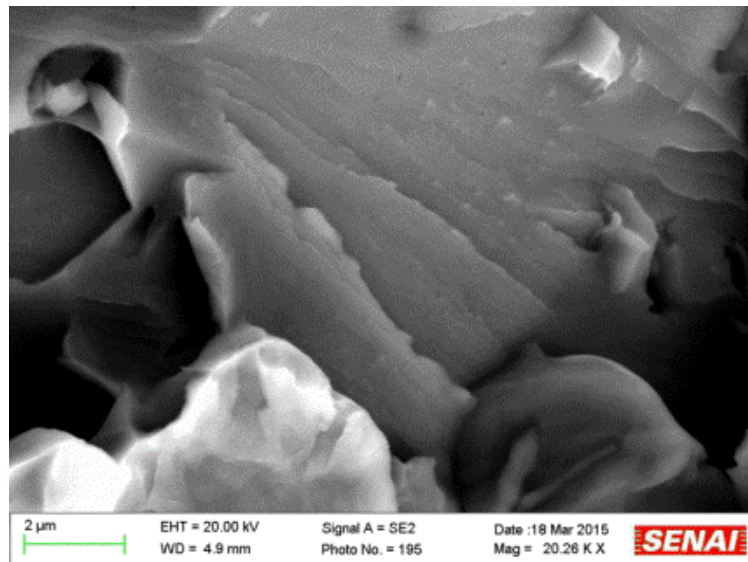


Figura 6. Micrografia eletrônica (MEV - imagem com elétrons secundários) de região da zona fundida após ensaio de impacto Charpy a 0°C, detalhe da região frágil da área observada na Figura 5.

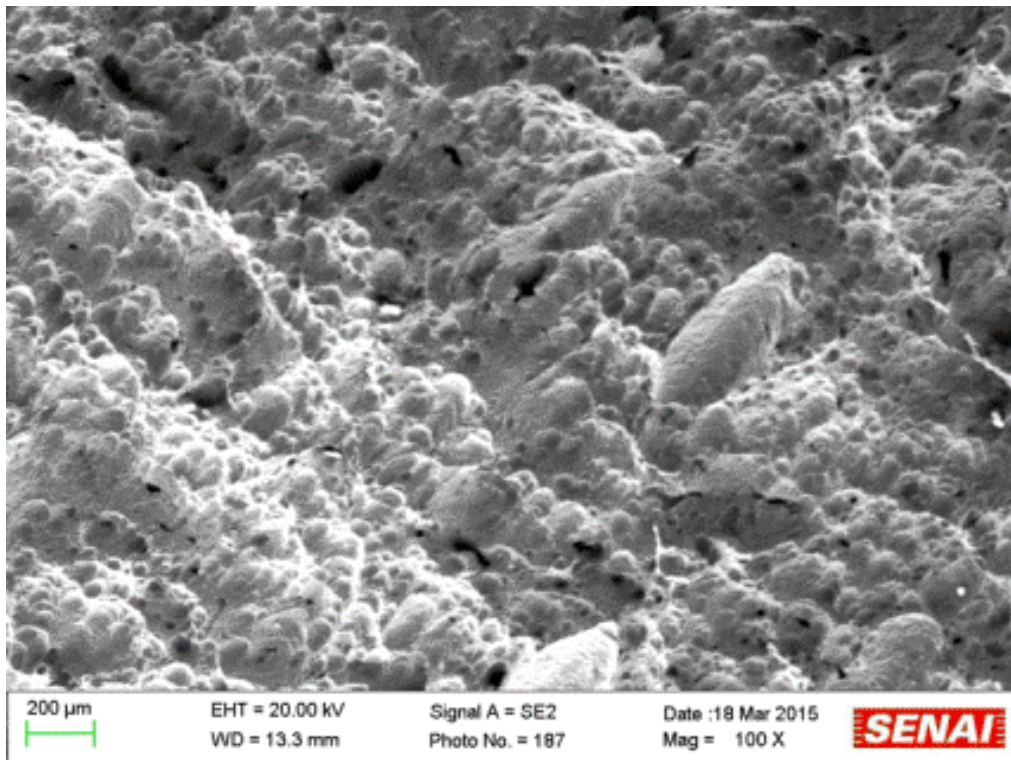


Figura 7. Micrografia eletrônica (MEV - imagem com elétrons secundários) de região da ZTA após ensaio de impacto Charpy a 0°C, região de aspecto dúctil.

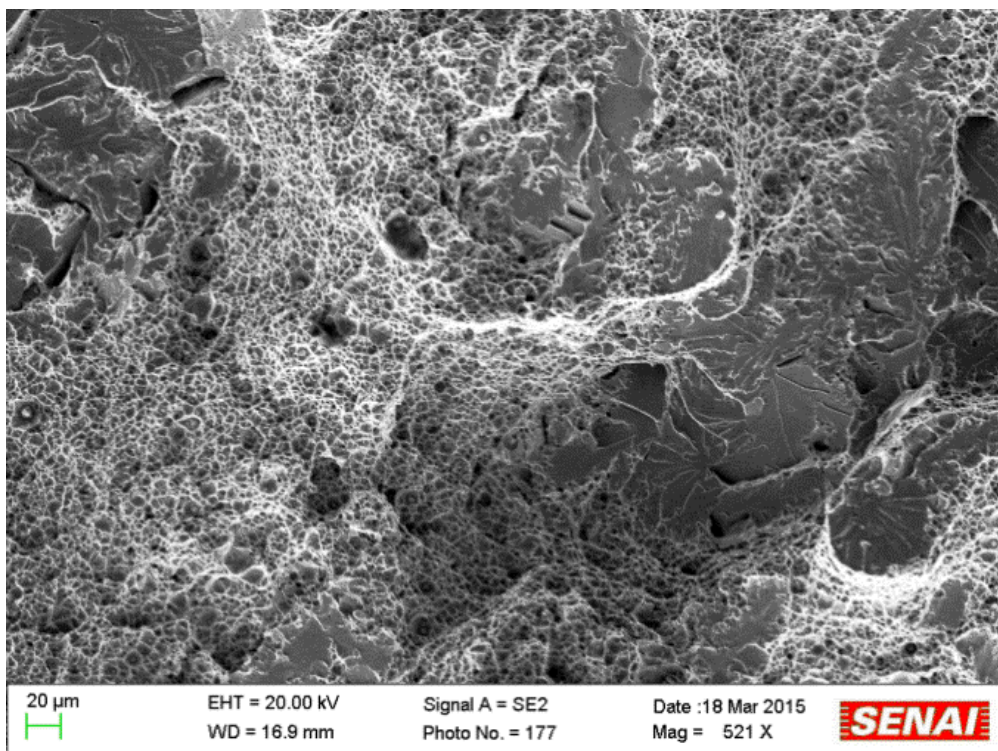


Figura. 8 - Micrografia eletrônica (MEV - imagem com elétrons secundários) de região da zona fundida (ZF) após ensaio de impacto Charpy a -20°C apresentando grandes regiões dúcteis e algumas frágeis.

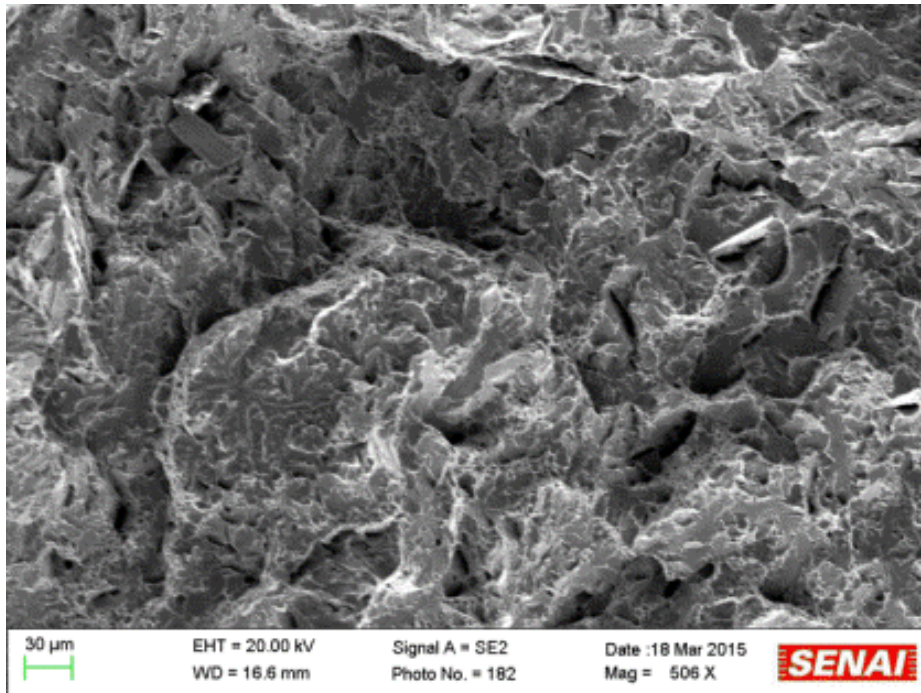


Figura 9 - Micrografia eletrônica (MEV - imagem com elétrons secundários) de região da ZAT após ensaio de impacto Charpy a - 20°C apresentando as regiões frágeis e também dúcteis.

O aço microligado grau API 5L X70 foi analisado e comparado com relação a microestrutura e propriedades mecânicas e satisfaz aos requerimentos dos APIs em termos de composição química. Apresenta microestrutura bandeada de ferrita poligonal e perlita com pequeno tamanho de grão. Excelente resistência mecânica (tração, dureza and impacto), boa ductilidade, sugerindo que o aço API 5L X70 atende as necessidades em um projeto de mineroduto. Idealmente é desejada uma microestrutura com quantidade menor de perlita e presença de ferrita (possivelmente bainita) acicular. Pela avaliação das faces de fratura dos corpos de prova por microscopia eletrônica de varredura, foi possível visualizar que havia fratura por clivagem e também regiões com alvéolos resultantes de deformação plástica do material, típicos de fratura dúctil.

4 CONCLUSÃO

O aço microligado grau API 5L X70 foi analisado e comparado com relação à microestrutura e propriedades mecânicas e satisfaz aos requerimentos dos APIs em termos de composição química. Apresenta microestrutura bandeada de ferrita poligonal e perlita e pequeno tamanho de grão. Excelente resistência mecânica (tração, dureza and impacto), sem grande perda de ductilidade, indicando que o aço API 5L X70 atende as necessidades em um projeto de mineroduto. As condições no processo de soldagem sempre dependem da taxa de resfriamento após a soldagem realizada. Idealmente é desejada uma microestrutura com quantidade menor de perlita e presença de ferrita (possivelmente bainita) acicular.

Agradecimentos

Este trabalho teve apoio do Mackpesquisa - UPM - Instituto Presbiteriano Mackenzie (bolsa de estudo). Ao SENAI “Nadir de Figueiredo” (Osasco/São Paulo) pela

realização do processo de soldagem e da documentação microestrutural. À USIMINAS (Dr. A. C. F. L. Álvares e R. O. Miranda) pela doação do aço API-5L-X70.

REFERÊNCIAS

- 1 Toffolo RVB. Estudo Comparativo dos Aços Microligados API-5L-X60 e API-5L-X70, usados para a confecção de tubos, quanto à tenacidade à fratura. Dissertação de mestrado da UFOP, Março de 2008.
- 2 Porto R., Perim, C. A., Desenvolvimento dos aços API na CST - Arcelor Brasil. 62º Congresso Anual da ABM – Internacional (Vitória-ES-Brasil). 23 - 27 Julho 2007.
- 3 Marques, PV, Modenesi, PJ, Bracarense, AQ. Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. Editora UFMG, 2007, 349 p, ISBN 978-98-7041-597-4.
- 4 Coelho CF, Morales, G. Transporte para escoamento de minério: indicadores de sustentabilidade, VIII Congresso Nacional de Excelência Em Gestão, 2012, 8 e 9 Junho.
- 5 Duovias, Portal Metálica-www.metalica.com.br/sistema minas-rio-maior-mineroduto-do-mundo-no-brasil – Fonte: Anglo Ferrous Brazil e Camargo Correa.
- 6 ABM - Metalurgia, Materiais e Mineração - Maior mineroduto do mundo transporta polpa de bauxita na Amazônia. 2013; 624: 250 - 251.
- 7 American Petroleum Institute. API Specification 5L, Specification for Line Pipe Steel. United States, Fortieth Second Edition, New York, 2004.
- 8 Specification for Line Pipe, API Specification 5L, American Petroleum Institute, October, 2008.
- 9 Callister, WD Jr. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução - 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2002, 116 - 120.
- 10 Padilha AF, Siciliano, JRF. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. 3ª ed. São Paulo: Associação de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 11 [Cândido LC, Godefroid LB, Morais WA. Análise de Falhas. ABM; 2013.
- 12 Godefroid LB, Cândido LC, Toffolo RVB, Barbosa LHS, Microstructure and mechanical properties of two API steels for iron ore pipelines. Materials Research. 2014; 17(1): 114-120
- 13 Katsina IN. Effect of welding thermal cycles on the heat affected zone microstructure and toughness of multi-pass welded pipeline steels, Cranfield University, School of Applied Sciences, Welding Engineering, PhD Thesis, 2012
- 14 Meireles AM, Avaliação dos parâmetros de curvamento por indução em tubos da classe API 5L X80 - Dissertação de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia, RJ – 2009.
- 15 Rosado DB, De Waele W, Vanderschueren D, Hertelé S. Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels. International Journal Sustainable Construction & Design, Volume 4, Issue 1, 2013.
- 16 Onsoien MI, M'Hamdi M, Mo DA. A CCT diagram for an offshore pipeline steel of X70 type - The diagram developed is valid for the heat-affected zone for welding operations where relatively rapid heating up to 1200°C occurs.[Acesso em 14/03/2015] Disponível em https://app.aws.org/wj/.../WJ_2009_01_s1.pdf.