

ESTUDO DA SOLDABILIDADE DE UM AÇO API 5L X65Q PELO PROCESSO SMAW *

Thais Soares Gonçalves¹
Rodrigo Rangel Porcaro²
Luiz Cláudio Cândido³

Resumo

Os aços de alta resistência mecânica e baixa liga são utilizados devido benefícios de pressões de linha mais elevadas, redução de peso do tubo e diminuição dos riscos de falhas estruturais. Esta pesquisa foi direcionada a esses graus de aços, com maior valor de limite de resistência mecânica, tenacidade e boa soldabilidade como, por exemplo, o aço de grau API 5L X65Q, que é um aço fabricado por laminação a quente, seguida os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Os tubos podem ser soldados pelo processo ao arco elétrico com eletrodos revestidos (SMAW) e sofrer aquecimento indutivo para curvamento e adequação à topografia do terreno. Tais processos podem alterar a microestrutura de constituintes presentes no metal de solda e na zona termicamente afetada. Neste trabalho foram avaliadas as características comportamentais do tubo de aço API 5L X65Q soldado empregando-se ensaios mecânicos, ensaios não destrutivos e a caracterização microestrutural das juntas soldadas. Foram encontradas na região soldada ferrita acicular, ferrita primária e pequena quantidade de inclusões. Os resultados dos ensaios de tração não foram conclusivos e devido ao maior grau de resfriamento desenvolvido, os valores de microdureza da região de acabamento do cordão de solda foram maiores que os das demais regiões.

Palavras-chave: Aços API 5L; Processo de Soldagem SMAW; Caracterização Microestrutural; Propriedades Mecânica.

STUDY OF THE WELDABILITY OF A STEEL API 5L X65Q BY THE SMAW PROCESS

Abstract

High Strength Low Alloy steel are used due to the benefits of higher line pressures, reduced tube weight and reduced risk of failure. The steel API 5L X65Q was chosen for this research due to its a higher limit value of mechanical strength, toughness and good weldability the manufacturing process for this steel grad consists of hot rolling, followed by heat treatments of quenching and tempering. The tubes can be welded by the process to the electric arc with coated electrodes (SMAW) and undergo inductive heating for bending and adaptation to the terrain topography. Such processes can alter the microstructure of constituents present in the weld metal and in the Heat affected zone. In this work the behavioural characteristics of the welded API 5L X65Q steel tube were assessed using mechanical tests, non-destructive tests and microstructural characterization of welded joints. Acicular ferrite, primary ferrite and small amount of inclusions were found in the welded region. The results of the tensile tests were not conclusive and due to the higher cooling rates developed; the microhardness values of the weld bead finishing region were higher than those of the other regions.

Keywords: API 5L Steel; SMAW Welding Process; Microstructural Characterization; Mechanical Properties.

¹ Engenheira Metalúrgica, Mestranda em Engenharia de Materiais, estudante, REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, D.Sc., professor, Dep. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, D.Sc., professor, Dep. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços com designação *American Petroleum Institute API 5L (Line Pipes Onshore e Offshore)* com ou sem costura são aplicados na construção de oleodutos, gasodutos e minerodutos. São aços do tipo HSLA “*High Strength Low Alloy*” (ou ARBL - Alta Resistência Mecânica Baixa Liga) conhecidos como aços microligados, porque possuem elementos de ligas em pequenas proporções, normalmente titânio, vanádio, nióbio, o que possibilita melhor controle microestrutural e assim ganhos nas propriedades mecânicas como alta resistência mecânica a tração e alta tenacidade à fratura.

O aço API 5L X65Q, objeto de estudo deste trabalho, feito por um processo de laminação a quente com tratamento de têmpera e revenimento é aplicado em dutos por possibilitar produzir estruturas mais leves portanto, redução do peso por comprimento do tubo, com alta resistência mecânica e boa soldabilidade.

Para juntas de dutos, um dos processos de soldagem mais usado é o de arco elétrico com eletrodo revestido, conhecido como SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*, que é normalmente aplicado em passes de raiz, enchimento e acabamento, porém este processo possui baixa produtividade afetando a eficiência de sua aplicação. Atualmente, a soldagem manual a arco elétrico com eletrodo revestido tem sido substituída por processos mecanizados, porém a simplicidade e a característica deste processo em atingir áreas de acesso restrito revelam que este ainda é consideravelmente aplicado, como na soldagem de navios, peças de grande porte e em “campo”, onde serviços de proteção com gás, refrigeração, entre outras necessidades estão fora de alcance.

Neste contexto, estudou-se no atual trabalho as características comportamentais do tubo de aço API 5L X65Q soldado pelo processo ao arco elétrico com eletrodo revestido empregando-se ensaios mecânicos, ensaios não destrutivos e a caracterização microestrutural e macroestrutural das juntas soldadas a fim de avaliar a soldabilidade deste aço.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais

Foi escolhido para o estudo da soldabilidade o aço estrutural de alta resistência mecânica e baixo liga, API 5L X65Q, obtido de tubos sem costura. Nas Tabelas 1 e 2 estão a composição química nominal e os requisitos de propriedades mecânicas do ensaio de tração para o aço grau X65Q, respectivamente.

Tabela 1. Composição química especificada para o aço “X65Q”. [1]

Grau do Aço	Composição Máxima (% em massa)								Carbono Equivalente (Máx.)	
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	CE _{IW}	CE _{Pcm}
X65Q	0,16	0,45	1,65	0,02	0,01	0,09	0,05	0,06	0,42	0,22

Legenda: CE_{IW} – Carbono equivalente de acordo com o Instituto Internacional de Soldagem;
CE_{Pcm} – Parâmetro de trincamento modificado para determinação do carbono equivalente;

Tabela 2. Propriedades mecânicas em tração especificadas para o aço X65Q. [2]

Grau do Aço	Limite de Escoamento (MPa)		Limite de Resistência (MPa)		Razão Elástica (LE/LR)	Alongamento (%)
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Máx.	Mín.
X65Q	450	570	535	760	0,93	22

2.2 Metodologia

2.2.1 Procedimento de Soldagem

O aço estudado foi soldado por arco elétrico com eletrodo revestido utilizando como metal base chapas retiradas do tubo sem costura. Os tubos tinham segmentos cortados e chanfros em V, segundo a Norma API 1104-10 [3] e com abertura de raiz de 1,6mm segundo a Figura 1. Para o passe de raiz, os passes de enchimento, acabamento e um passe de reforço utilizou-se o eletrodo revestido ASW E-7018, sua respectiva composição química está detalhada na Tabela 3. A Figura 2 ilustra a junta soldada segundo a norma.

Tabela 3. Composição química nominal dos eletrodos AWS E7018 (% em massa) [4]

Eletrodos AWS	C _{máx}	Si _{máx}	Mn _{máx}
E7018	0,07	0,50	1,30

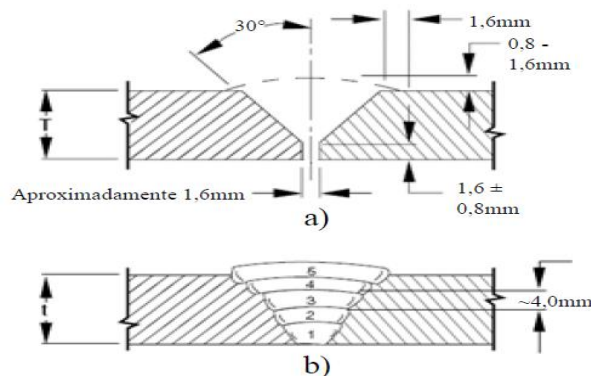


Figura 1. Esquema do chanfro em V em corte transversal: a) dimensões do chanfro e b) representação esquemática dos passes de raiz, enchimento e acabamento. Adaptação [3]



Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.. Fotografia da junta soldada de um aço API 5L X65Q.

2.2.2 Caracterização Microestrutural

As amostras foram lixadas até a lixa de 1500 “mesh”, em seguida polidas em pasta de diamante, desengraxadas e atacadas com Nital 3% e Picral, para a caracterização microestrutural (metal base e juntas soldadas) e análise macrográfica (juntas soldadas), foram feitas a partir da observação da estrutura em Microscópio Óptico Olympus BX51M (MO) e o Mosaico no Microscópio Leica DMLM com aumentos de 200X, 500X e 1000X.

2.2.3 Ensaios Não Destrutivos

As amostras soldadas do aço estudado, API X65Q, foram submetidas a inspeção visual e ao ensaio não destrutivo de ultrassom. O ultrassom utilizado foi o KRAUTKRAMER modelo USK7-B com transdutor MWB 70 M2 com ganho de 58dB e ganho primário de 48 dB em uma escala de 100mm.

2.2.4 Ensaios Mecânicos

Foram realizados os ensaios mecânicos de microdureza e tração nas juntas soldadas a fim de qualificá-las no Laboratório de Planos da Empresa Gerdau/Unidade de Ouro Branco/MG. O ensaio de dureza Vickers, segundo a Norma ASTM A370-09a [5] foi adotado para medição da microdureza das amostras soldadas, no Microdurometro HMV Shimadzu (*Micro Hardness Tests*), e o ensaio de tração foi conduzido de acordo com as Normas API 5L-09/2013 [1] e ASTM E8/8M-08 [6]. Foram feito dois corpos de prova usinados para o ensaio de tração como pode ser visto na Figura 3. Os corpos de prova medem 2,3x29,5x1,0 cm (largura.comprimento.espessura).

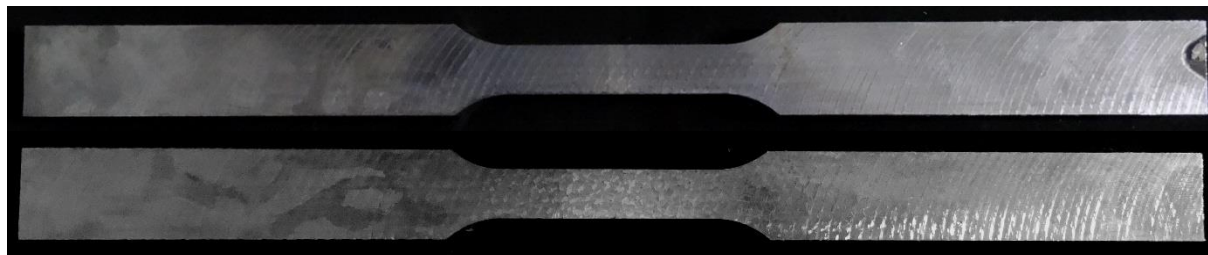


Figura 1. Fotografias de corpos de prova para ensaios de tração usinados; aço API 5L X65Q. [2,3x29,5x1,0 cm]

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Composição Química

A composição química (% em massa) obtida no material, aço API 5L X65Q, é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Composição química (% em massa) do API 5L X65Q.

C	Cr	Cu	Mn	Mo	N ₂	Nb	Ni	P	S	Si
0,088	0,057	0,131	1,304	0,097	0,006	0,027	0,183	0,006	0,001	0,308

2.3.2 Caracterização Microestrutural

2.3.2.1 Metal base

O metal base no estado de entrega é o aço API 5L X65Q, laminado a quente por processo de laminação de tubo sem costura e tratado termicamente por têmpera e

revenimento, contendo 85% de ferrita, contagem feita pelo método de contagem por pontos, sendo o restante perlita. A microestrutura desse aço, martensita revenida, observada no microscópio óptico encontra-se na Figura 4(a) onde houve ataque com Nital 3%. Uma estrutura coalescida de matriz ferrítica e carbonetos esfeirizados dispersos podem ser observados na Figura 4(b) onde houve ataque com Picral.

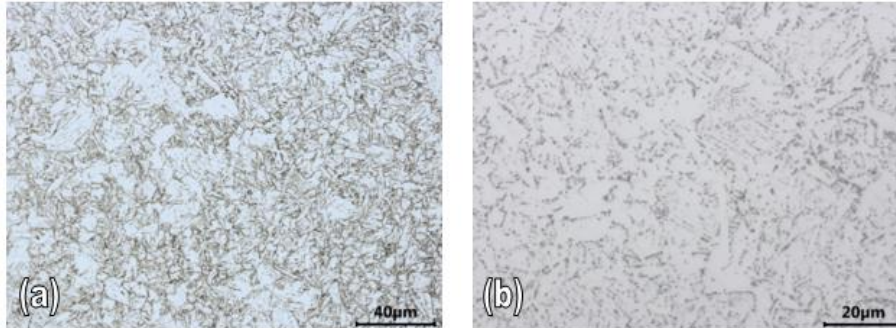


Figura 4. Micrografia óptica do metal base no estado de entrega (MB) – aço API 5L X65Q. (a) ataque Nital 3%, 500X e (b) ataque Picral; 1000X

2.3.2.2 Junta soldada

A Figura 5 ilustra as regiões limitantes (interfaces) entre metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS) em uma micrografia óptica do tipo mosaico.

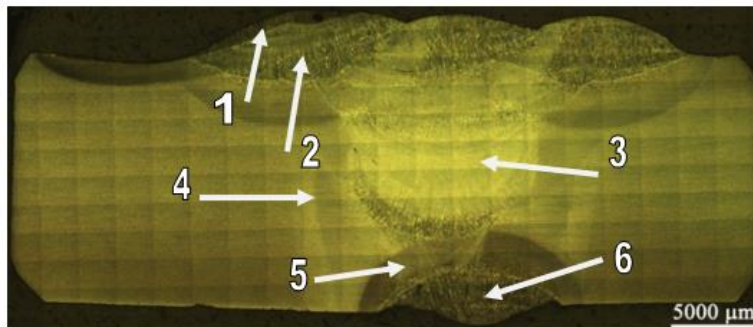


Figura 5. Micrografia óptica de mosaico da junta soldada de um aço API 5L X65Q; Reativo Nital 3% .

As microestruturas do metal de solda (nos últimos passes) da junta soldada estão apresentadas na Figura 6(a) e (b) Pelas imagens nota-se a presença de constituintes típicos do metal de solda no passe de acabamento, como por exemplo, ferrita acicular (FA), ferrita primária (PF) e grãos colunares na parte superior e refinados na parte inferior.

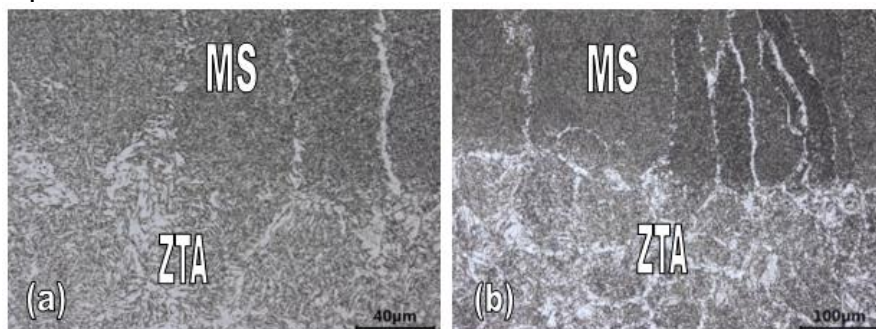


Figura 6. Micrografia óptica do metal de solda e ZTA do aço API 5L X65Q – Região 1 da Figura 5 transição entre o último passe de enchimento e um passe de acabamento; (a) 200X e (b) 500X.

Como já observado por vários autores, Trindade et al. [7], Laitinen [8] ilustram regiões de grãos colunares e de refinamento de grãos causado por aporte térmico de passe subsequente na soldagem multipasses.

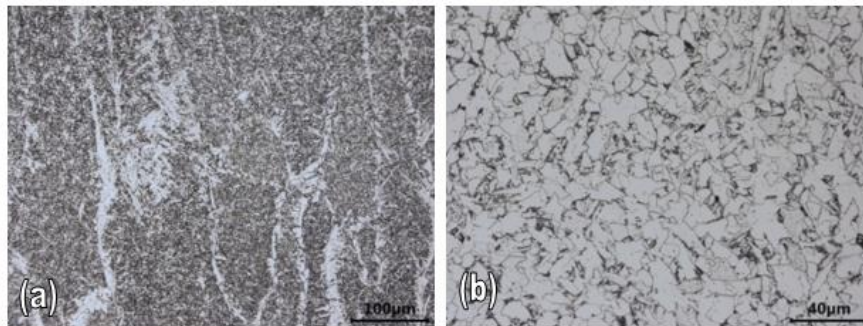


Figura 7. (a) Micrografia óptica da região 2 da Figura 5 e (b) Micrografia óptica da região 3, zona fundida; de um aço API 5L X65Q; reativo Nital 3%; 500X.

Na região 2, ilustrada na Figura 5 e Figura 7(a) também se encontra ferrita acicular (FA) e ferrita primária (PF). Na Figura 7(b), encontra-se uma estrutura da zona fundida, com ferrita e possível presença do constituinte M-A, visto que os produtos de transformação da austenita formada serão dependentes da taxa de resfriamento e da composição química do aço e essa região pode apresentar Zonas Frágeis Localizadas (ZFLs) em aços que tendem a formar o constituinte Martensita-Austenita Retida (M-A), [8]. Porém segundo Laitinen [8], o ataque Le Pera que é capaz de revelar o constituinte M-A em microscopia óptica, em aços com baixos teores de carbono e neste trabalho somente houve o ataque com Nital 3%.

Em sua tese, Alves [9] apresentou o ataque Le Pera em uma amostra de API X65Q soldada pelo processo GMAW onde observou pelo microscópico óptico fases claras que não são atacadas, que segundo Laitinen [8] e Araújo [10], podem ser partículas de constituinte M-A e/ou agregado de ferrita-carbono. Depois observou pelo MEV as mesmas amostras, foram encontradas regiões não atacadas que segundo Araújo [10] revelam constituintes contínuos e “grandes” (M-A) e constituintes descontínuos (carbonetos) [9].

Observa-se na Figura 8(a) o crescimento de grão na ZTA e a presença de ferrita e possíveis constituintes M-A e/ou agregado ferrita carbonetos. Diferente do metal base que devido aos seus tratamentos térmicos de têmpera e revenimento é composto por martensita revenida. O que pode ser observado na Figura 8(a), uma micrografia da região de transição do MB para a ZTA.

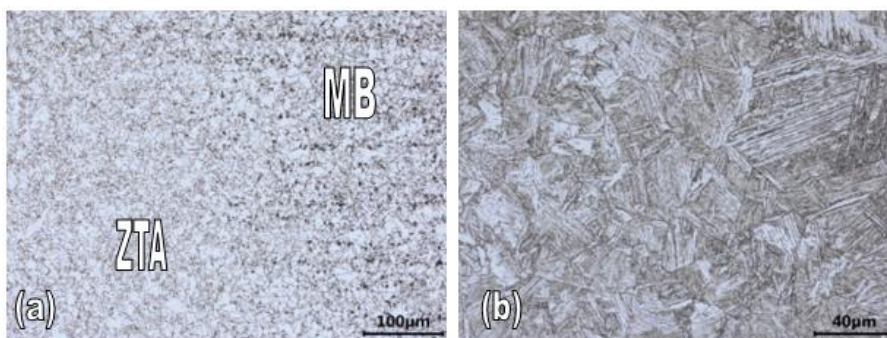


Figura 8. (a) Micrografia óptica da região 4 (Figura 5), transição do MB para a ZTA e (b) Micrografia óptica da região 5, da solda em um aço API 5L X65Q; reativo Nital 3%; 500X.

Na região 5 (Figura 5) na Figura 8(b), pode-se notar a presença da combinação de ferrita acicular e carbonetos e ocorrência de martensita. Nessa região podem se formar constituintes de alta dureza e baixa ductilidade, dependendo da composição do aço e da taxa de resfriamento. Perlita, bainita superior ou martensita autorevenida são estruturas típicas da decomposição da austenita nessa região. [11] e [12]

Apresenta-se também a região do passe de raiz do metal de solda, revelada após ataque com Nital 3%. A Figura 9 identifica os constituintes específicos do metal de solda nesta região, sendo possível visualizar a microestrutura formada nos primeiros passes do metal de solda. Nesses, além da ferrita primária há presença significativa de ferrita acicular. A deposição de passes subsequentes transferiu energia térmica aos passes anteriores, necessária para o crescimento da ferrita de Widmanstätten (FW) previamente nucleada. Segundo ASM [13], esta região possui como principais fases ferrita (de contorno de grão, de Widmanstätten e acicular) e martensita.

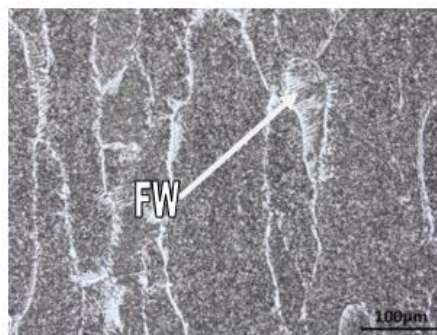


Figura 9. Micrografia óptica da região 6 (Figura 5), passe de raiz e de reforço na soldagem de um aço API 5L X65Q; reativo Nital 3%, 200X.

2.3.3 Análise por Ultrassom na Área Soldada

Após a inspeção visual não apresentar nenhuma das descontinuidade mais comuns em soldas, com o ultrassom KRAUTKRAMER modelo USK7-B e transdutor MWB 70 M2 com ganho de 58dB e ganho primário de 48dB em uma escala de 100mm foi encontrado uma pequena inclinação interna a 7mm de profundidade, possível escória e porosidade na região superficial. A superfície era desfavorável para a análise em função de rebaixo esmerilhado.

2.3.4 Ensaio de Microdureza

Utilizou-se um microdurometro com a carga de 200gf, um espaçamento entre as medidas de 0,5mm e a observação e medição com objetiva de 40X. A seguir tem-se perfis de microdureza realizados na região central da solda, Figura 10, e saindo do passe de acabamento em direção ao metal base, Figura 11.

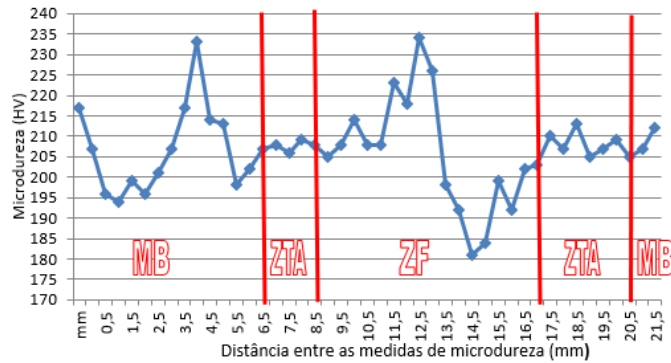


Figura 10. Perfil de microdureza na região central da soldagem abrangendo metal base, ZTA e ZF de um aço API 5L X65Q soldado.



Figura 11. Perfil de microdureza nos passes de enchimento até o metal base de uma solda em um aço API 5L X65Q soldado.

Segundo LANCASTER [14], para um aço ARBL, os valores de microdureza na ZTA, para uma distância entre 1mm a 2mm abaixo da borda superior da junta soldada, devem estar entre 300HV e 350HV, sendo 366HV o máximo (dependendo do processo, tipo de junta, espessura do material, etc.). Para a borda inferior, o valor máximo da dureza deve ser de 250HV a uma distância entre 1mm a 2mm acima da borda. Geralmente, a maior dureza é encontrada na proximidade da linha de fusão, já que nesta zona são atingidos os valores máximos de velocidade de resfriamento e de temperatura da ZTA. Com isso, esse local permanece mais tempo em alta temperatura, promovendo crescimento de grão e, conseqüentemente, exibindo maior temperabilidade.

Na Figura 12 encontra-se a localização exata dos perfis de microdureza realizados na região da solda, região esta apresentada pelas Figuras 10 e 11.

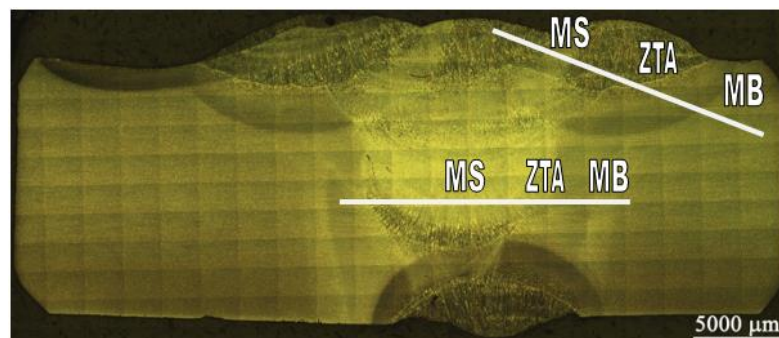


Figura 12. Micrografia óptica; mosaico da junta soldada (aço API 5L X65Q) enfatizando as regiões onde mediram-se as durezas.

Analisando os valores de durezas em todas as regiões realizadas, percebe-se que as suas variações não estão diferentes das apresentadas pelo metal base. Contudo, os valores de microdureza da região de acabamento do cordão de solda foram maiores que os das demais regiões, devido ao maior grau de resfriamento desenvolvido, porém menores que dos valores apresentados por Lancaster [14]. Na borda inferior os valores ficam abaixo de 250HV.

2.3.5 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em somente dois corpos de prova usinados, devido a falta de material e a disponibilidade do equipamento utilizado, com isso não houveram resultados representativos, pois o eletrodo selecionado possui resistência á tração mínima superior àquela especificada para o metal base (70ksi e 65ksi) além de que a pequena quantidade de inclusões na solda, mostra que os eletrodos estavam bem condicionados, mesmo assim houve a ruptura na região da solda. As Figuras 13 e 14 apresentam o corpo de prova 1 e 2 respectivamente e a Figura 15 os gráficos de tensão por deslocamento dos ensaios de tração dos corpos de prova. Na Tabela 6 encontram-se os limites de resistência mecânica do material soldado, sendo estes menores que o limite máximo de resistência do metal base.

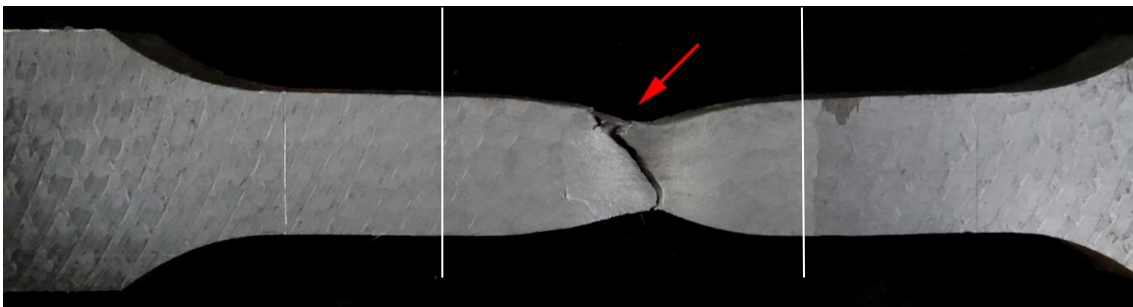


Figura 13. Corpo de prova 1 rompido na região da solda; ensaio de tração de uma solda em um aço API 5L X65Q.

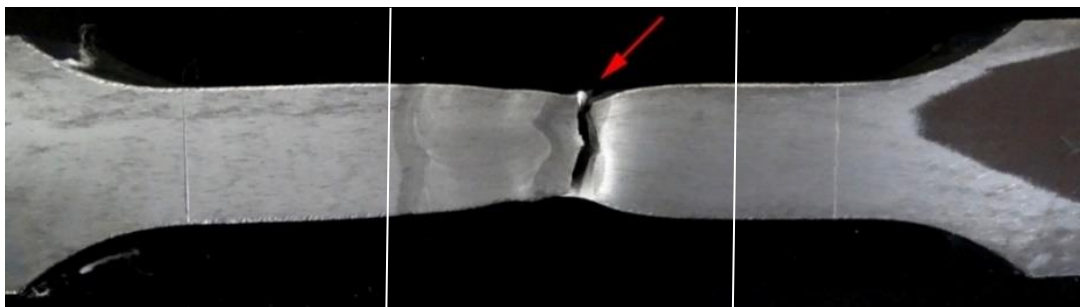


Figura 14. Idem Figura 13, mas para corpo de prova 2

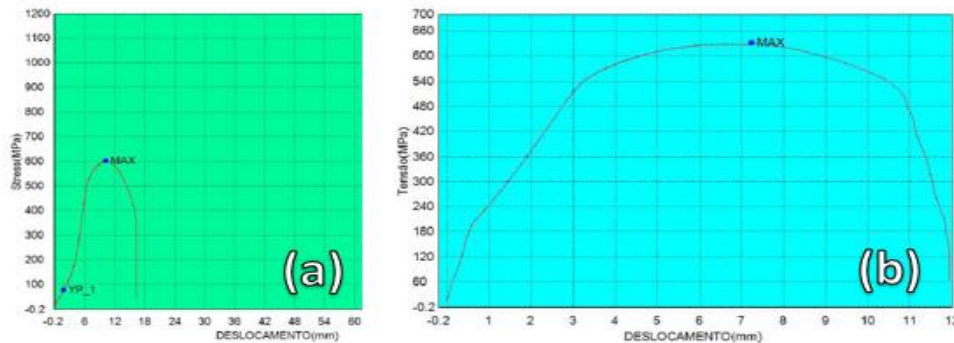


Figura 15. Tensão por deslocamento do corpo de prova 1(a) e corpo de prova 2(b) de uma solda em um aço API 5L X65Q;

Tabela 6. Propriedades mecânicas em tração de um aço API 5L X65Q soldado.

Corpo de prova	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento %	LE\LR
1	603	22	0,67
2	632	19	0,69

O material na condição como soldado atendeu aos requisitos mínimos de limite de escoamento e de resistência para o grau X65Q, porém apresentou alongamento inferior a 22% (CP₂), fato que pode estar relacionado à proporção de ferrita acicular e ferrita primária na zona fundida. E a relação LE\LR permaneceu abaixo da máxima requisitada para esse tipo de aço, 0,93, portanto ficou dentro da especificação.

3 CONCLUSÃO

A partir da caracterização do comportamento de amostras de um aço API 5L X65Q em soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido foi possível concluir os seguintes pontos relevantes:

- O metal base utilizado contém aproximadamente 85% de ferrita sendo o restante de perlita. A microestrutura encontrada nesse aço foi martensita revenida, uma estrutura coalescida de matriz ferrítica e carbonetos esferoidizados dispersos.
- O ensaio de tração foi realizado em somente dois corpos de prova usinados, com isso não houveram resultados representativos. Porém relação LE\LR permaneceu abaixo do limite máximo e o alongamento apresentou-se inferior ao requisitado.
- Em relação à dureza, os valores de microdureza da região de acabamento do cordão de solda foram maiores que os das demais regiões, devido ao maior grau de resfriamento desenvolvido, porém menores que dos valores apresentados por LANCASTER [14], entre 300HV e 350HV para um aço ARBL na ZTA, sendo 366HV o máximo. E para a borda inferior, o valor máximo da dureza deve ser de 250HV, porém foram encontrados valores abaixo destes.
- A microestrutura encontrada nas regiões de solda foram ferrita acicular e ferrita primária e nos passes de raiz e de reforço foi encontrado o crescimento da ferrita de Widmanstätten.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e estar sempre comigo, aos meus pais José Lino, Iris e ao meu irmão Iuri por estarem sempre me apoiando, ao meu orientador Prof. Luiz Cláudio Candido e ao meu coorientador Prof. Rodrigo Rangel Porcaro por todo o apoio, ao Técnico Gladsthon Guaraci Alvares e todos os técnicos do “Laboratório de Planos”, da Empresa Gerdau/Unidade de Ouro Branco/MG, por todos ensinamentos.

REFERÊNCIAS

- 1 API 5L-09 - Specification for Line Pipe. American Petroleum Institute. [S.I.]. 2013.
- 2 API 5L, American Petroleum Institute. Specification for line pipe steel API 5L. 43 ed. New York, 2004.
- 3 API 1104-10 - Welding of Pipeline and Related Facilities. American Petroleum Institute. [S.I.]. 2010.
- 4 FORTES, C; ARAÚJO, W. Metalurgia da Soldagem. ESAB-BR. [S.I.]. 2004.
- 5 ASTM A370-09a - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steels Products. American Society for Testing and Materials. [S.I.]. 2009.
- 6 ASTM E8/8M-08 - Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials. [S.I.]. 2008.
- 7 TRINDADE, V.B. D.; GUIMARÃES, A.S.; PAYÃO FILHO, J.D.C. Normalizing Heat Treatment Effect on Low Alloy Steel Weld Metals. II Brazilian Manufacturing Congress. Uberlândia, Maio 2003.
- 8 LAITINEN, R. – Improvement of weld HAZ toughness at low heat input by controlling the distribution of M-A constituents. Tese de Doutorado Universidade de Oulu, Finlândia, Acta Univ. Oul. C p. 234, 2006.
- 9 ALVES, S. M. de S. Características microestruturais e mecânicas de juntas soldadas em multipasses pelo processo GMAW de um aço API 5L X65Q. 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, REDEMAT/Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- 10 ARAÚJO, L. C. S. D. Influência de Tratamentos Térmicos Pós Soldagem na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de juntas de aço que atende ao grau API 5L X70Q Soldado pelo Processo SMAW. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, REDEMAT/Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- 11 SILVA, R. F. da – Caracterização da zona termicamente afetada de aço produzido via resfriamento acelerado. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- 12 MODENESI, P. J; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. – Apostila Introdução à Metalurgia da Soldagem, Belo Horizonte UFMG, Janeiro de 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/laboratorios/laboratorio-de-soldagem/>.
- 13 ASTM A370-09a - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steels Products. American Society for Testing and Materials. [S.I.]. 2009.
- 14 LANCASTER, J.F. Handbook of Structural Welding, Abington Publishing, Cambridge, England, 2003.