

Análise da Influência de Parâmetros de Soldagem em Características Microestruturais e Mecânicas de Juntas Soldadas de um Tubo de Aço API X70Q para Aplicação *Sour Service*

Mariana Pessoa Medeiros de Paula¹, Paulo José Modenesi¹, Vicente Braz Trindade²

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto, MG, Brasil.

Recebido: 25 Fev., 2018

Aceito: 27 Maio 2018

E-mails:

marianapessoa200@hotmail.com

(MPMP), modenesi@demet.ufmg.br

(PJM), vicentebraz@yahoo.com.br

(VBT)

Resumo: O aço X70 é um material que possui boa relação entre resistência mecânica e tenacidade, sendo um grau bastante utilizado em condução/transporte de óleo e gás. Com o objetivo de avaliar a soldabilidade deste material, características microestruturais e mecânicas foram avaliadas ao longo da seção transversal de juntas obtidas por soldagem pelos processos GTAW (raiz) e GMAW (preenchimento), de tubos sem costura de aço API 5L X70QS. Os segmentos de tubos, usinados em chanfro J, foram soldados com rotação circunferencial de modo a manter a posição de soldagem sempre plana, sendo utilizados neste estudo três valores para o aporte térmico. Corpos de prova foram confeccionados para ensaios de tração, dureza Vickers, impacto e análise química, além de caracterização metalográfica no metal de base e nas juntas soldadas. O grau X70QS obtido e soldado com diferentes aportes térmicos apresentou excelente comportamento mecânico e em especial, baixa dureza na região da ZTA.

Palavras-chave: tubos sem costura; aços API 5L X70QS; GMAW; GTAW; aporte térmico.

Analysis of the Influence of Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Welding Joints of an API X70Q Steel Tube for the Sour Service Application

Abstract: The X70 steel is a material that has a good relation between mechanical strength and toughness, being very used in conduction and transport of oil and gas. With the objective to evaluate the weldability, the microstructural and mechanical characteristics were evaluated along the cross section of joints obtained by GTAW (root) and GMAW (filling) processes of API 5L X70QS seamless steel pipes. The pipe segments machined in J bevel, welded with circumferential rotation to maintain flat welding position with three different heat inputs. Test specimens for tensile tests, Vickers hardness, Charpy impact and chemical analysis, besides metallographic characterization was made for base material and welded joints. The grade X70QS obtained and welded with different heat inputs showed excellent mechanical behavior and particularly low HAZ hardness.

Key-words: seamless pipe; steel API 5L X70QS; GMAW; GTAW; heat input.

1. Introdução

No Brasil, os campos de petróleo do pré-sal, que são em sua maioria localizados em grandes profundidades envolvem grandes quantidades de tubos de aço para condução e transporte de óleo e gás. Materiais destinados à aplicação *offshore* são submetidos a altas temperaturas e pressões (internas e externas) devido à grande profundidade, ou seja, são submetidos a condições de solicitações mecânicas geralmente complexas, devido a essas condições de trabalho, além disso, são expostos a teores elevados de H₂S e CO₂ presentes no petróleo. Devido a isto, esses materiais devem apresentar características importantes, como por exemplo, alta resistência à tração, boa tenacidade à fratura, boa ductilidade, soldabilidade e resistência à corrosão. Dentre os graus de aço utilizados em campos *offshore*, pode-se citar tubos sem costura para o aço X70Q, o qual é especificado conforme a norma API 5L [1] e DNV-OS-F101 [2]. O grau de aço X70Q pode ser classificado como um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) que possui como característica uma boa relação entre resistência mecânica e tenacidade [3]. Uma dentre as várias vantagens



da utilização de materiais ARBL em tubos de condução e transporte de óleo e gás é a diminuição do peso da linha, pois ao se aumentar a tensão limite de escoamento de um material, a espessura de parede requerida para resistir às pressões internas (ou externas em caso de águas profundas) pode ser reduzida e conseqüentemente ocorre uma redução da quantidade de material a ser utilizado. Os aços da classe API começaram a ser desenvolvidos nos anos 1950. Em relação à utilização de tubos sem costura, que são o padrão em aplicações offshore para condução de óleo e gás, atualmente o grau X65 é largamente utilizado, mas está sendo gradativamente substituído pelo grau X70. A fabricação do grau X70Q pode se consistir na laminação termomecânica controlada ou em tratamentos térmicos de têmpera e revenimento de modo a originar uma microestrutura refinada, assegurando altos níveis de resistência mecânica e tenacidade e ductilidade [2,4].

A soldagem é o principal processo aplicado nas atividades de montagem dos dutos, de manutenção e de reparo dos dutos. Dentre os processos mais utilizados na soldagem de dutos em campo pode-se citar o eletrodo revestido, GMAW, arame tubular e o GTAW [3]. O processo GMAW é atrativo na produção de dutos, visto não somente seu maior potencial produtivo, flexibilidade do processo, e facilidade na mecanização e automação [5,6].

A zona termicamente afetada (ZTA) de uma junta soldada é a região de transição de microestruturas e propriedades entre a zona fundida e o metal de base. A ZTA merece atenção especial, pois tende a apresentar degradação de propriedades mecânicas e químicas e pode ser um local favorável à nucleação de trincas. Uma preocupação dos usuários desse tipo de tubulação é principalmente referente a aplicação em ambientes na qual o material está submetido a um ambiente corrosivo contendo sulfeto de hidrogênio (H₂S), ou seja, *sour service*. A ZTA é uma região com uma variedade de microestruturas e sabe-se que a corrosão do aço é afetada pela microestrutura do material. Conforme Du et al. [7], geralmente os materiais tratados termicamente possuem maior taxa de corrosão em comparação a materiais não tratado. Um aço com a presença de bainita e martensita possui uma maior taxa de corrosão quando comparado a um material com presença de perlita e ferrita.

Na soldagem de um aço ARBL há a necessidade do maior controle sobre os parâmetros de soldagem para a obtenção de uma junta soldada com perfil homogêneo e com o mínimo de descontinuidades, possibilitando manter na junta soldada uma microestrutura com boa relação entre resistência e tenacidade, características principais deste tipo de aço [8]. Para aplicações com requisitos severos, em ambientes offshore, na prática são utilizados apenas tubos sem costura e o grau mais elevado que tem sido comumente utilizado é o do aço X65 e o grau de aço X70 ainda é pouco utilizado. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise microestrutural e mecânicas das juntas de tubos sem costura API 5L X70Q com aplicação *sour service*, com a variação dos valores dos aportes térmicos utilizados durante o procedimento de soldagem. A partir dos resultados encontrados foi possível avaliar os efeitos dessa variação da na estrutura e propriedades mecânicas ao longo do cordão de solda do aço API 5L X70Q.

2. Materiais e Métodos

Foram utilizados tubos sem costura laminados a quente, com 355,6 mm de diâmetro externo e 23,83 mm de espessura de parede. A composição química do metal de base realizada por espectrometria de massa é apresentada na Tabela 1. Segmentos de tubos de aproximadamente 500 mm de comprimento foram usinados com chanfro com a geometria e dimensões mostradas na Figura 1.

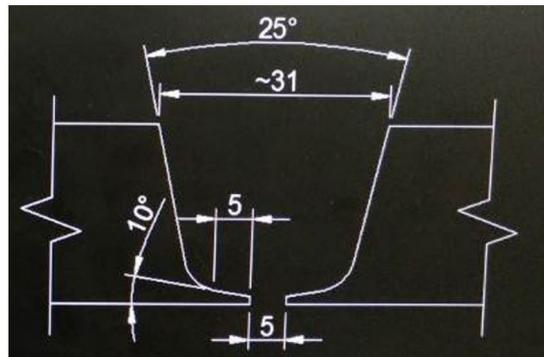
Os valores de CE_{IWW} e CE_{PCM} foram calculados pelas Equações 1 e 2 e os valores obtidos para o aço X70 utilizado estão de acordo com os estabelecidos pela norma API 5L [1] que considera CE_{IWW} máximo de 0,42% e CE_{PCM} máximo de 0,25% para aplicações *sour service*.

$$CE (IWW) = \%C + \%Mn / 6 + (\%Ni + \%Cu) / 15 + (\%Cr + \%Mo + \%V) / 5 \quad (1)$$

$$CE (Pcm) = \%C + \%Si / 30 + (\%Mn + \%Cu + \%Cr) / 20 + \%Ni / 60 + \%Mo / 15 + \%V / 10 + 5\%B \quad (2)$$

Tabela 1. Composição química especificada (% em massa) do aço X70 utilizado.

%	C	Mn	Si	P	S	Cu	B	Cr+Mo	Nb+V+Ti	CE _{IIW}	CE _{PCM}
Mínimo	0,05	1,35	0,25	-	-	-	-	-	-	0,344	0,168
Máximo	0,08	1,42	0,35	0,010	0,03	0,04	0,005	0,20	0,07	0,373	0,191

**Figura 1.** Geometria do chanfro utilizado (dimensões em mm).

Os segmentos de tubo foram pré-aquecidos a uma temperatura de 150°C, sendo esse mesmo valor considerado entre passes. As amostras foram soldadas utilizando-se os seguintes processos, consumíveis e procedimentos:

- processo manual GTAW protegido com argônio, utilizando-se o arame AWS A 5.18 ER70S-3 com 2,4 mm de diâmetro para o primeiro e segundo passe de raiz e o diâmetro 3,2 mm para o terceiro e quarto passes na região da raiz. A alteração da bitola do arame objetivou aumentar o volume de solda depositado na região da raiz após o fechamento desta;
- processo GMAW com a mistura de proteção de 82%Ar+18%CO₂ e metal de adição AWS A 5.28 ER80S-D2 com diâmetro de 1,2 mm em todos os passes de enchimento e acabamento.

A soldagem pelo processo GTAW foi realizada manualmente e a GMAW foi realizada de modo mecanizado, ambos processos realizados em dispositivo que permitiu girar o tubo mantendo a soldagem sempre na posição plana (1G). Este artifício foi utilizado para evitar variações nas condições de soldagem em função de sua posição. Embora esta seja uma característica fundamental da soldagem de tubulações no campo, optou-se por eliminá-la para facilitar a avaliação do efeito da energia de soldagem.

Os parâmetros de soldagem reais em cada processo assim como o valor do aporte térmico em cada procedimento estão apresentados na Tabela 2. As condições testadas foram denominadas APT-A para a de aporte térmico alto, APT-M para aporte térmico intermediário e APT-B para o valor mais baixo. Foram realizados um total de 4 passes com o processo GTAW e uma média de 20 passes para GMAW. O número de passes necessários para o acabamento variou entre três (APT-A) e quatro (APT-M e APT-B).

Para avaliação da composição química do metal de solda na região de topo da junta soldada, utilizou-se a técnica de espectrometria de massa.

Para avaliação estrutural, o material foi preparado pelas técnicas usuais para análise micrográfica com microscopia óptica, sendo o ataque realizado com Nital 5%.

Para avaliação de propriedades mecânicas em tração, foram realizados ensaios em corpos de prova do metal de base e da junta soldada, utilizando os corpos de prova em forma de fita e espessura igual à parede do tubo, com o metal de solda no centro da área útil, de acordo com a Norma API 5L [1].

Perfis de dureza Vickers HV foram realizados utilizando a carga de 10 kgf (HV10). As medições foram localizadas de acordo com o solicitado pela norma NACE MR0175/ISO 15156-1 [9]. Este procedimento foi realizado nas regiões de topo, meio e raiz da solda. As medidas foram feitas a aproximadamente 5mm de distância das superfícies.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem reais para as condições APT-B, APT-M e APT-A.

		Processo	Consumível	Ø (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Aporte (kJ/mm)
APT-B	1° passe raiz	GTAW	ER70S-3	2,4	104 ± 4	10,5 ± 0,50	1,12
	2° ao 4° passe de raiz	GTAW	ER70S-3	2,4 e 3,2	151 ± 1	11,5 ± 0,50	1,68±0,25
	Enchimento	GMAW	ER80S-D2	1,2	190 ± 13	23,5 ± 1,50	0,68±0,02
	Acabamento	GMAW	ER80S-D2	1,2	190 ± 10	22,5 ± 0,50	0,69±0,03
APT-M	1° passe raiz	GTAW	ER70S-3	2,4	110 ± 8	10,5 ± 0,50	1,02
	2° ao 4° passe de raiz	GTAW	ER70S-3	2,4 e 3,2	158 ± 13	12,5 ± 0,50	1,95±0,04
	Enchimento	GMAW	ER80S-D2	1,2	187 ± 15	25,0 ± 1,00	1,03±0,10
	Acabamento	GMAW	ER80S-D2	1,2	196 ± 15	24,5 ± 0,50	0,92±0,02
APT-A	1° passe raiz	GTAW	ER70S-3	2,4	95 ± 5	10,5 ± 0,50	1,13
	2° ao 4° passe de raiz	GTAW	ER70S-3	2,4 e 3,2	175 ± 25	11,5 ± 0,50	1,70±0,22
	Enchimento	GMAW	ER80S-D2	1,2	290 ± 10	26,5 ± 0,50	1,41±0,02
	Acabamento	GMAW	ER80S-D2	1,2	290 ± 10	26,5 ± 0,50	1,40±0,01

Ensaio de impacto Charpy foram realizados utilizando corpos de prova transversais em relação à direção de laminação e de tamanho reduzido. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM A 370 [10]. Para o metal de base, os ensaios foram realizados nas temperaturas de 0°C, -10°C, -30°C, -50°C, -70°C e -80°C para construção da curva de transição do material. Os corpos de prova com posicionamento do entalhe na ZTA foram retirados nas regiões de topo e raiz da solda sendo testados nas temperaturas de -10°C, -40°C e -60°C. Nos corpos de prova com posicionamento do entalhe no metal de solda os testes de impacto foram realizados a temperatura de -10°C. Sabe-se que a temperatura influencia a tenacidade dos materiais e como o material avaliado pode ser aplicado em ambientes com baixas temperaturas, os ensaios foram realizados a temperaturas abaixo de 0°C.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise química

Na Tabela 3 é apresentada a composição química dos metais de solda para as três condições de soldagem, para a região de topo das juntas. A tabela 3 também apresenta os valores de CE_{Iiw} e CE_{PCM} (Equações 1 e 2) para estas condições. Como os metais de solda apresentam teor de carbono inferior a 0,12%, o parâmetro que deve ser utilizado para avaliação da soldabilidade é o CE_{PCM} [1,2]. Os valores encontrados atendem os valores estabelecidos pelas normas [1,2]. A composição química do metal de solda e os valores de CE_{Iiw} e CE_{PCM} não variaram significativamente para as condições testadas.

Tabela 3. Composição química dos metais de solda (região de topo) para as três condições estudadas.

%	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
APT-B	0,083	0,621	1,627	0,088	0,043	0,432	0,118
APT-M	0,083	0,630	1,651	0,089	0,044	0,433	0,123
APT-A	0,083	0,643	1,651	0,083	0,040	0,382	0,113
%	P	S	B	V	CE_{Iiw}	CE_{PCM}	
APT-B	0,012	0,0118	0,0004	0,006	0,421	0,207	
APT-M	0,012	0,0119	0,0003	0,006	0,401	0,197	
APT-A	0,013	0,0119	0,0004	0,006	0,401	0,201	

3.2. Caracterização microestrutural

A microestrutura do metal de base é basicamente formada por bainita e ferrita na região central da espessura de parede assim como está apresentado na Figura 2.

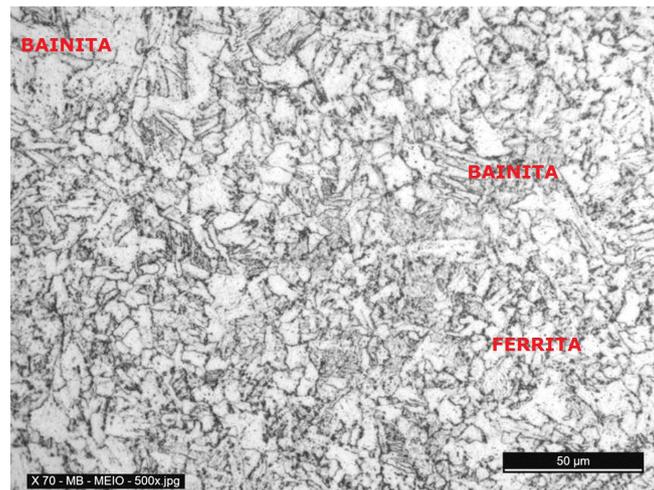


Figura 2. Microestrutura do metal de base do aço API 5LX70QS na região central da parede do tubo. Ataque Nital 3%.

A Figura 3 apresenta a microestrutura observada no último passe de solda, que não teve sua microestrutura alterada termicamente por outro cordão de solda. Observa-se uma microestrutura predominantemente bainítica em todos os aportes sem quantidade significativa de ferrita primária. Medidas de dureza realizadas na região de topo da zona fundida revelam valores de dureza próximos a 330 HV1, sugerindo a ausência de quantidades significativas de martensita nesta região. É possível visualizar que o aumento do valor do aporte térmico levou a um aumento do tamanho das ripas de bainita, o que era esperado devido à diminuição na velocidade de soldagem com consequente diminuição da velocidade de resfriamento do material.

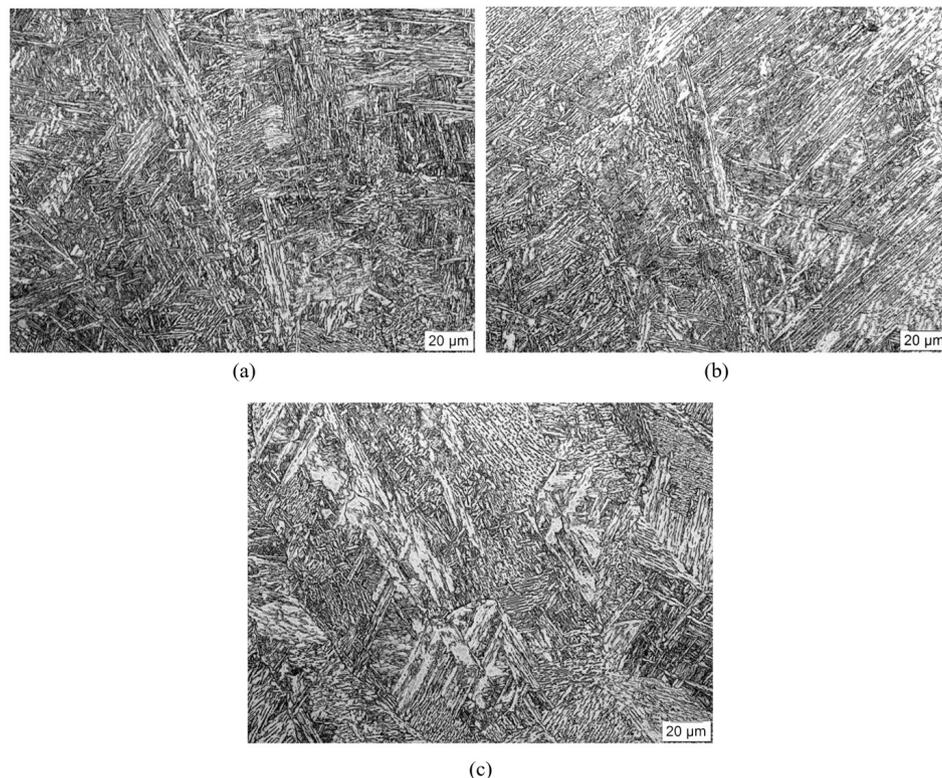


Figura 3. Microestrutura da zona fundida do passe de solda não alterado para os aportes (a) APT-B; (b) APT-M; (c) APT-A. Ataque Nital 3%.

A Figura 4 apresenta as microestruturas na zona fundida no passe de raiz para as condições de aporte térmico APT-B e APT-A. A microestrutura, para as duas condições, é caracterizada predominantemente por ferrita com pequenas regiões escuras formadas possivelmente por carbonetos ou constituinte MA. Os valores de dureza nesta região foram inferiores a 200 HV1, como esperado para a estrutura observada. Nos dois casos, a microestrutura é típica de regiões alteradas em consequência de seu reaquecimento pelos passes subsequentes. Nesta condição, a microestrutura varia ao longo do cordão dificultando uma comparação entre as condições. Para a condição APT-B, Figura 4b, observa-se uma microestrutura heterogênea com a presença de regiões discretas que parecem ter sido reaustenitizadas. Provavelmente, esta região foi reaquecida por um terceiro passe a uma temperatura de pico entre as temperaturas Ac1 e Ac3 (região intercrítica). Na soldagem multipasses, ocorre uma interação entre os cordões de solda e as regiões são submetidas a dois ou mais ciclos térmicos. Assim, as zonas que haviam sido formadas pelo passe anterior são alteradas pelos ciclos térmicos proveniente do novo cordão de solda, com isso tem-se a formação de regiões mistas [11].

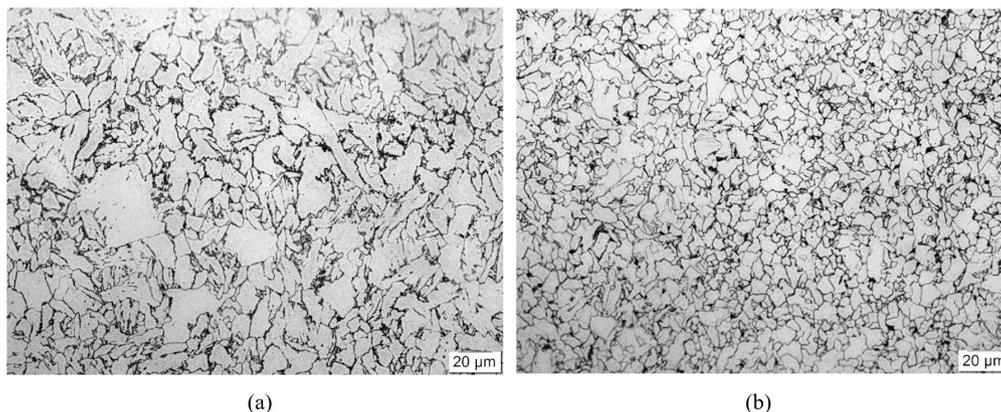


Figura 4. Microestrutura da zona fundida no passe de raiz para os aportes (a) APT-B; (b) APT-A. Ataque Nital 3%.

A Figura 5 apresenta a ZTA na região de grãos grosseiros localizada na região de topo da junta soldada. Para as três condições, observou-se uma estrutura predominantemente bainítica (dureza média de 240 HV1) com uma tendência de a microestrutura tornar-se mais grossa com o aumento do aporte térmico. Nota-se que, para as condições APT-M e APT-A, os contornos de grãos da austenita prévia são mais evidentes. Microestruturas bainíticas similares foram obtidas por Wang [11] na região de grãos grosseiros com tempos de resfriamento entre 800 e 500°C ($\Delta t_{8/5}$) entre 20 e 109s.

3.3. Propriedades mecânicas

Os resultados obtidos nos ensaios de tração para os corpos de prova do metal de base e das juntas soldadas estão apresentados na Figura 6. Tanto para o metal de base como para as juntas com os três aportes térmicos, os requisitos de resistência mecânica (R.T) e limite de escoamento (L.E) foram atendidos. Para a qualidade de aço X70QS, segundo as normas de produto [1,2], a faixa estabelecida para a tensão limite de resistência é 570-760 MPa e para a tensão limite de escoamento é 485-605 MPa. A relação LE/RT foi atendida em todas as situações estando com valores bem abaixo do que o estabelecido nas normas de produto. Isto representa uma adequada deformabilidade da junta soldada, o que é importante durante o lançamento de tubos offshore usando condições severas de lançamento como o método *reel-laying* (lançamento por carretel). Para todas as amostras, a ruptura ocorreu no metal de base.

Pode-se concluir que as variações dos aportes térmicos, mesmo com a variação observada nas microestruturas da região da ZF e ZTA, não influenciaram significativamente nos valores de resistência mecânica, limite de escoamento e na relação LE/RT. Como os corpos de prova romperam no metal base, isto é, a solda apresentou maior resistência mecânica do que o metal base independentemente da energia usada, este resultado era esperado. Em relação aos valores de alongamento, os valores para o metal de base estão bem acima dos encontrados para as juntas

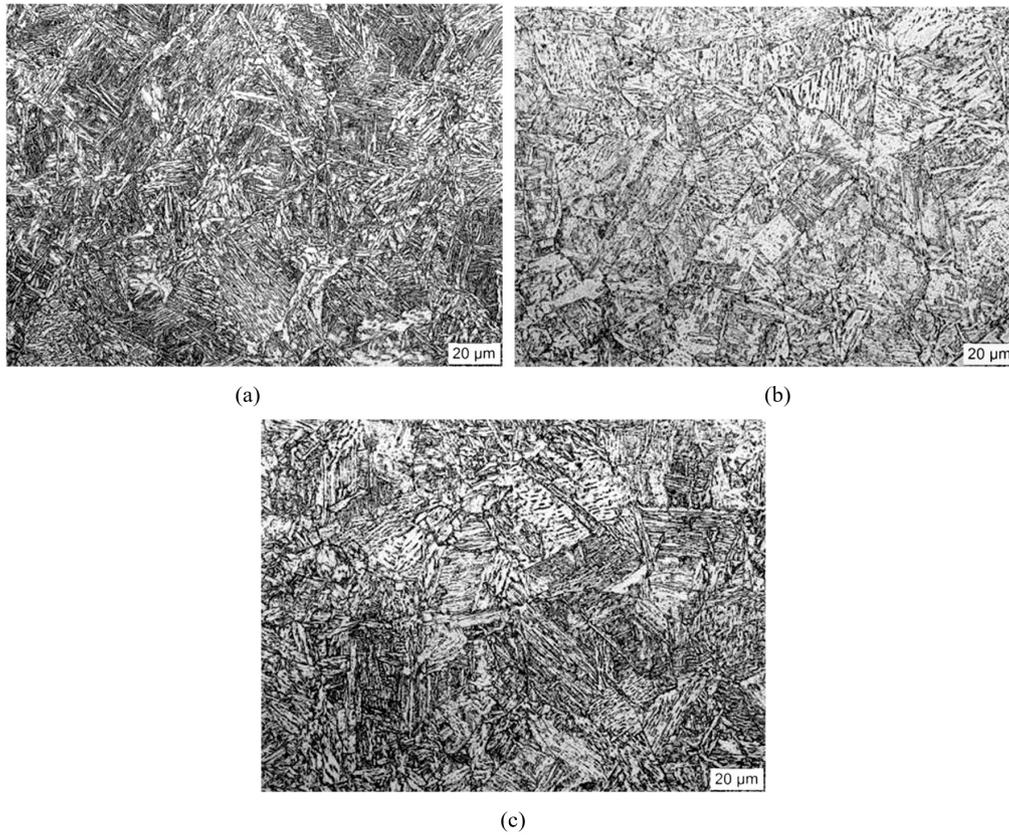


Figura 5. Microestrutura da ZTA na região de topo para (a) aporte APT-B; (b) APT-M; (c) aporte APT-A. Ataque Nital 3%.

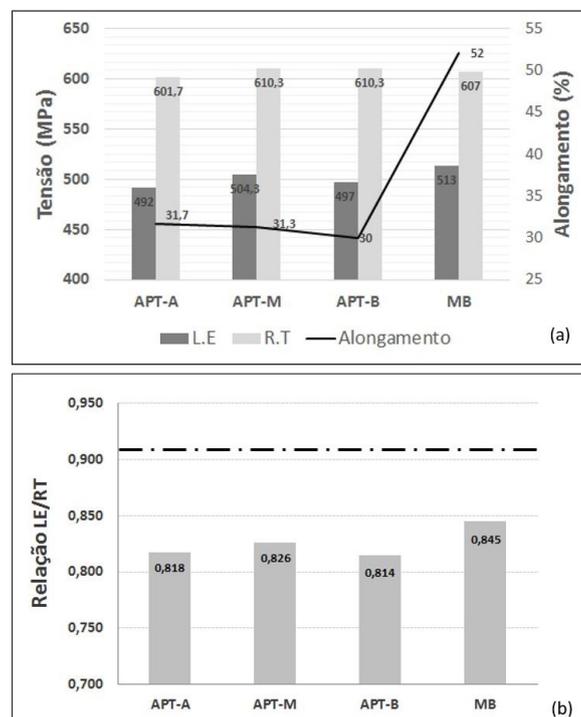


Figura 6. Resultados dos valores médios (3 corpos de prova para cada condição) dos ensaios de tração: (a) Limite de escoamento, limite de resistência e alongamento e (b) relação LE/LR.

soldadas. A solda é um material heterogêneo, com variações de propriedades mecânicas ao longo da junta. Isto faz com que a deformação plástica se concentre em regiões localizadas reduzindo o alongamento.

O valor médio de dureza para o metal de base foi de 183 ± 1 HV10 para a região próxima à superfície externa do tubo, 185 ± 1 HV10 para a região central da espessura de parede e 212 ± 2 HV10 para a região próxima à superfície externa do tubo. A localização das medições para o metal base foram realizadas conforme a norma API 5L [1]. Os valores encontrados atendem ao requisito do valor máximo da dureza para materiais com aplicação *sour service* que é 250 HV10 [9].

As Figuras 7 e 8 apresentam os valores de dureza para as regiões da ZTA e da ZF para as três condições de soldagem. Pode-se observar na Figura 7 que os valores máximos na ZTA estão abaixo do valor de referência que é 250 HV10 para as condições APT-A e APT-B. Para a condição APT-M, um valor de dureza de 264 HV10 foi encontrado próximo ao topo da junta. Endentações realizadas ao redor deste ponto mostraram valores abaixo de 250 HV10. Os valores de dureza da ZTA na raiz são os menores encontrados, o que é uma consequência de sua alteração pelos passes seguintes. O aporte térmico não influenciou de forma significativa a dureza da ZTA, embora fosse esperada uma redução desta dureza quando o aporte térmico fosse aumentado devido à influência desta na taxa de resfriamento da junta soldada [8]. Contudo, nas regiões do meio e raiz da junta, este efeito pode ser mascarado pela alteração da estrutura da ZTA pelo efeito de um passe sobre os anteriores. No topo da junta, a ZTA tenderia a se manter inalterada, mas a dispersão das medidas de dureza não permite observar claramente um aumento da dureza com a redução do aporte térmico.

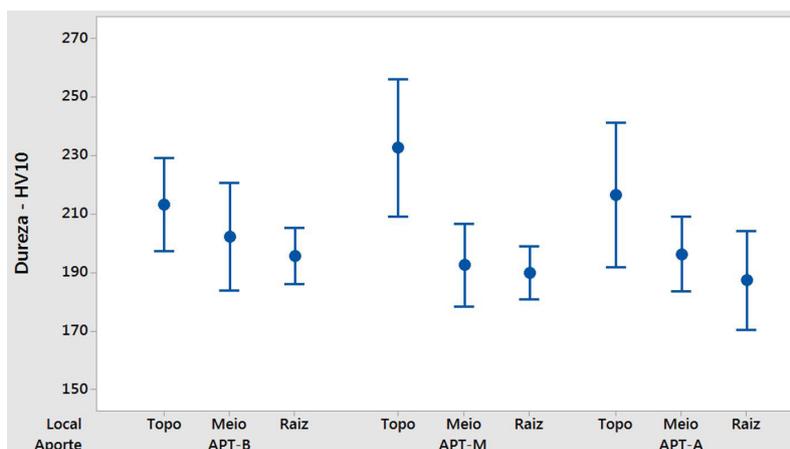


Figura 7. Resultados de dureza HV10 para a região da ZTA.

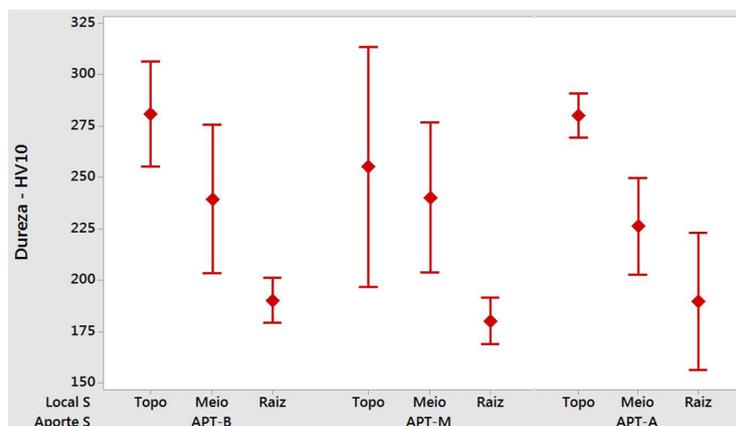


Figura 8. Resultados de dureza HV10 para a região da ZF.

Para o metal de solda, observa-se na Figura 8, que a dureza é superior a 250HV10 nas regiões do topo, apresentando valores que ultrapassam a 280 HV10. Com isso, estes materiais não poderiam ser utilizados em ambientes *sour service* conforme estabelecido pela norma NACE MR0175 [9], porém eles atenderiam à norma DNV-OS-F101 [2] na qual estabelece dureza máxima de 300HV no metal de solda. Este resultado deve estar associado com a seleção de metal de adição e está restrito à região do topo, que é, em grande parte, inalterada por outros passes. A escolha de um metal de adição menos ligado poderia reduzir adequadamente os valores de dureza, mas isto não foi feito no presente trabalho. Para o metal de solda pode-se observar que para todos os três aportes térmicos há uma diminuição da dureza do topo para a raiz, devido aos ciclos térmicos decorrentes nas regiões de raiz e enchimento. Não se observa influência do aporte térmico nos valores de dureza do metal de solda assim como para a região da ZTA. Na região de topo, a microestrutura foi pouco alterada com a variação de aporte térmico usada no presente trabalho, o que pode justificar o resultado encontrado. Nas outras regiões, o mesmo comentário feito para a ZTA seria também válido.

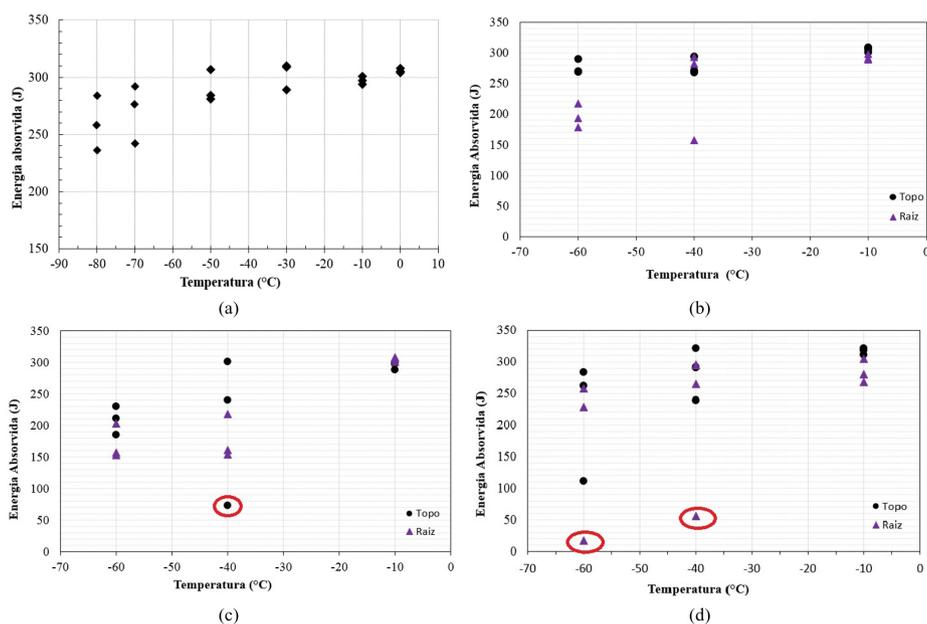


Figura 9. Resultado do teste de impacto na ZTA e no MB em diferentes temperaturas: (a) MB); (b) APT-A; (c) APT-M; (d) APT-B.

A Figura 9 apresenta os valores de energia absorvida encontrados no metal de base e na ZTA para as condições APT-A, APT-M e APT-B nas regiões de topo e raiz da solda.

Todos os corpos de prova do metal de base romperam com fratura 100% dúctil, assim, a sua temperatura de transição deve estar abaixo de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Comparando os valores de energia encontrados com o valor mínimo 82 J exigido para o grau de 485 SMYS pela norma DNV-OS-F101 [2], observa-se que as juntas atendem os requisitos de energia absorvida solicitada por esta norma sendo o menor valor encontrado de 236 J a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para a condição APT-A, os valores de energia absorvida tanto para as regiões de topo e raiz são relativamente altos, e apresentaram fratura 100% dúctil. A condição APT-M também apresentou valores de energia absorvida altos, porém, para a temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, é observada uma grande dispersão dos valores de energia nas regiões e topo e raiz. Grandes dispersões no ensaio Charpy tendem a ocorrer na faixa de temperatura de transição, porém, os outros resultados sugerem que, para esta condição, a temperatura de transição está abaixo de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mesmo o menor valor encontrado (73J) o corpo de prova apresentou 43% de fratura dúctil. Microestrutura com maiores valores de dureza tendem a favorecer uma menor tenacidade. Porém não foi observada essa tendência de aumento da dureza na região da ZTA com o aporte térmico que consequentemente não é visualizada na

tenacidade, portanto os valores de aporte térmico utilizados não foram suficientes para impactar na tenacidade deste material. Entretanto, os altos valores obtidos para energia absorvida na região da ZTA são representativos para concluir que o material apresenta boa tenacidade independente do aporte térmico utilizado.

Todos os corpos de prova que apresentaram valores de energia absorvida abaixo de 100 J, que estão destacados na Figura 9, foram avaliados visualmente. Os mesmos foram atacados com Nital 3% e as regiões de ZTA, ZF e MB foram identificadas. Observou-se que, para todos esses corpos de prova, a propagação da trinca se deu através da zona fundida sendo, que para algumas amostras, a mesma ocorreu próxima a linha de fusão. A Figura 10 apresenta o corpo de prova que foi testado a -40°C (73J) para a condição APT-M, no qual é possível verificar que o entalhe está localizado na ZF. Desta forma, os valores destes corpos de prova foram desconsiderados.

Para a condição APT-B, dentre os corpos de prova com menor valor de energia absorvida, a análise de fractografia foi realizada. A Figura 11 apresenta a superfície de fratura para o corpo de prova retirado na região da raiz testado a temperatura de -40°C do qual obteve valor de 56 J e 43% de fratura dúctil apresentando superfícies características de fratura frágil e dúctil.

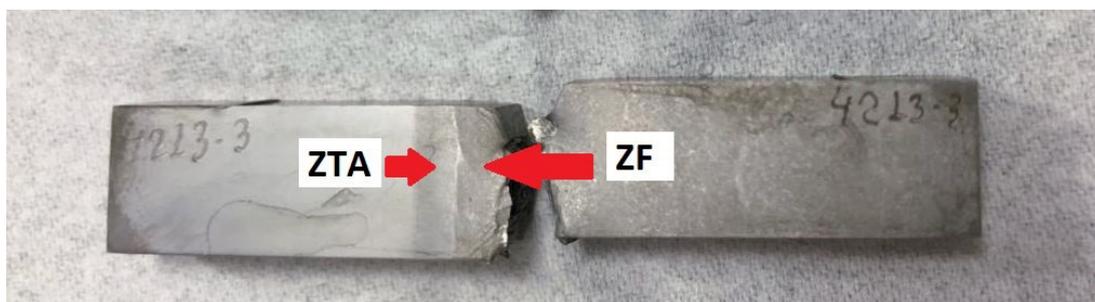


Figura 10. Corpo de prova retirado na região da ZTA para a condição APT-M com entalhe localizado incorretamente.

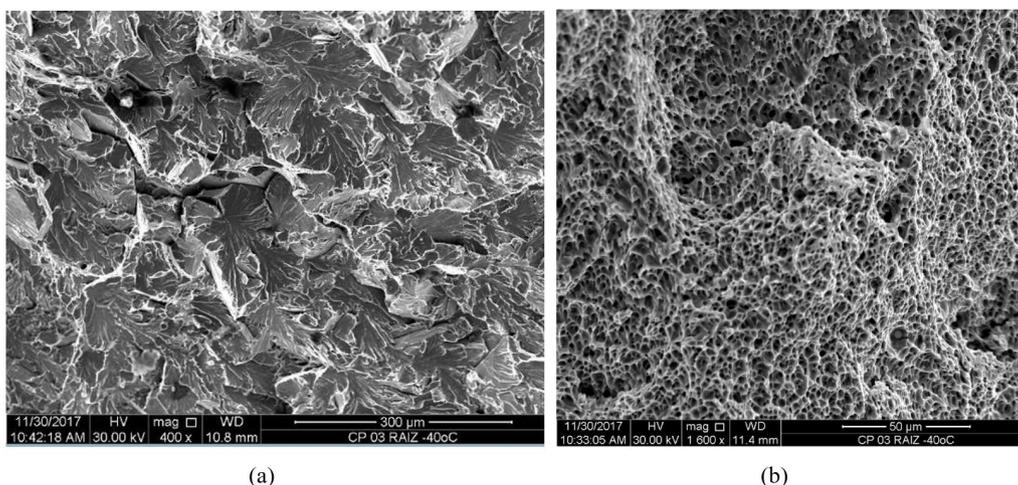


Figura 11. Superfície de fratura para o corpo de prova para condição APT-B com menor valor de energia à -40°C : (a) fratura frágil; (b) fratura dúctil.

Os valores de energia absorvida para o teste de impacto Charpy com entalhe na região de topo da ZF para os três corpos de prova testados à temperatura de -10°C foram de 44 ± 11 J para a condição APT-B, 47 ± 10 J para APT-M e 21 ± 4 J para APT-A. Para as condições APT-B e APT-M, observam-se valores de energia bem próximos, enquanto os valores de energia absorvida para a condição APT-A, observa-se uma redução acentuada dos valores. Isto pode ser associado ao fato da condição APT-A apresentar uma microestrutura composta por ripas mais grossas de bainita, da qual favorece uma menor tenacidade do material.

4. Conclusões

- Os valores encontrados tanto para o CE_{IIV} e CE_{PCM} tanto para o metal de base quanto para o metal de solda estão de acordo com os valores estabelecidos por normas [1,2]. A composição química da zona fundida não foi significativamente influenciada pela variação do aporte térmico;
- A microestrutura do metal de solda no passe que não sofreu nenhum tratamento térmico por outro cordão de solda assim como a região de topo da ZTA, apresentou uma microestrutura bainítica e a influência dos aportes ocorreu no sentido do aumento do tamanho das ripas de bainita com o aumento do valor do aporte térmico. Na região da ZTA, para as condições APT-M e APT-A, os contornos maiores devido ao resfriamento mais lento;
- O metal de base e os corpos de prova da junta no ensaio de tração atenderam aos requisitos mínimos de limite de escoamento e limite de resistência de acordo API 5L [1] e DNV-OS-F101 [2]. As variações dos aportes térmicos não influenciaram significativamente nos valores de resistência mecânica, limite de escoamento e a relação LE/RT das juntas soldadas. Todas as fraturas nos corpos de prova considerando-se a junta soldada ocorreram no metal de base;
- Os valores de dureza encontrados para o metal de base atendem o requisito para materiais *sour service* conforme a norma NACE MR0175/ISO 15156-1 [9] porém os valores encontrados para a região de topo no metal de solda estão acima do valor de 250 HV10 exigido pela norma. Com isso, estes materiais não poderiam ser utilizados em ambientes *sour service* conforme estabelecido pela norma NACE MR0175;
- Mesmo com alguns valores de energia absorvida mais baixos e com uma porcentagem da área de fratura com aspecto frágil, pode-se concluir que o material apresenta boa tenacidade e que com os testes realizados não foi possível identificar a influência da variação do aporte térmico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à VSB pela doação dos tubos sem costura e realização dos ensaios de laboratório e a CAPES-PROEX, CNPq e FAPEMIG pelo suporte por meio da UFMG.

Referências

- [1] American Petroleum Institute. API 5L: Petroleum and natural gas industries – steel pipe for pipeline transportation. 45 ed. Washington: API; 2012.
- [2] Det Norske Veritas As. DNV-OS-F101: Offshore standard. Submarine pipeline systems. Hovik: DNV; 2013.
- [3] Soeiro JC, Rocha DB, Brandi SD. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para Tubulações. Soldagem e Inspeção, 2013;18(2):176-195.
- [4] Trindade VB, Alves SMS, Cândido LC, Faria GL, Porcaro RR. Características microestruturais e mecânicas ao longo da seção transversal de juntas soldadas em multipasses pelo processo GMAW de um aço API 5L X65Q. Soldagem e Inspeção. 2017;22(2):217-227. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2202.10>.
- [5] Sartori F. Tecnologias e técnicas modernas do processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos (dissertação de mestrado). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2016.
- [6] Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. Soldagem fundamentos e tecnologia. 3 ed. Belo Horizonte, MG: UFMG; 2009.
- [7] Du CW, Li XG, Liang P, Liu ZY, Jia GF, Cheng YF. Effects of microstructure on corrosion of X70 pipe steel in an alkaline soil. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009;8(2):216-220.
- [8] Albuquerque SF, Bracarense AQ, Silva RS, Maciel TM, Almeida DM. Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas de metais de solda obtidos por processos de soldagem manual e automatizado utilizado na soldagem de aço API 5L X80. Soldagem e Inspeção. 2011;16(04):322-332. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242011000400003>.
- [9] National Association of Corrosion Engineers. NACE TM0175/ISO 15159-1 - Petroleum, petrochemical, and natural gas industries – Materials for use in H2S-containing environments in oil and gas production. USA: NACE International; 2015.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM A370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken: ASTM; 2014.
- [11] Wang Y, Li C, Han T, Han B, Li L. Microstructure and toughness of coarse grain heat-affected zone of domestic X70 pipeline steel during in service welding. Journal of Materials Science. 2011;46(3):727-733. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-010-4803-y>.