

Características Microestruturais e Mecânicas ao Longo da Seção Transversal de Juntas Soldadas em Multipasses pelo Processo GMAW de um Aço API 5L X65Q

Vicente Braz Trindade¹, Sandra Mara de Souza Alves², Luiz Cláudio Cândido², Geraldo Lúcio de Faria², Rodrigo Rangel Porcaro¹

¹ Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

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

Recebido: 09 Abr., 2017

Aceito: 08 Ago., 2017

E-mail: vicentebraz@yahoo.com.br (VBT)

Resumo: Características microestruturais e mecânicas foram avaliadas ao longo da seção transversal de juntas obtidas por soldagem (GMAW), de tubos sem costura de aço API 5L X65Q. Dois tipos de juntas foram obtidas a partir da confecção de chanfro V e ½ V. Dividindo-se as chapas soldadas em 8 camadas espaçadas de 3mm, no sentido transversal, corpos de prova foram confeccionados para ensaios de tração, microdureza Vickers e análise química. Foi realizada ainda caracterização metalográfica no metal base e nas juntas soldadas. Observou-se pequena alteração na composição química do metal de solda entre as camadas da junta V e junta ½ V. A maior taxa de resfriamento promoveu maior fração de ferrita acicular no chanfro ½ V. Alguns corpos de prova de tamanho reduzido não atenderam aos limites mínimos de escoamento e de resistência especificados na Norma API 5L, resultado atribuído à presença de descontinuidades em algumas regiões da solda. A maior microdureza Vickers da junta ½ V foi atribuída à maior presença de ferrita acicular. A adoção de chanfro estreito para aumento de produtividade na soldagem do aço em estudo não impactou negativamente as propriedades da junta, entretanto, aumentou a ocorrência de falta de fusão na face do bisel.

Palavras-chave: Tubos sem costura; Aços API 5L X65Q; GMAW; Chanfro ½ V.

Microstructural and Mechanical Characterization Across the Cross Section of Multipass GMAW Weld Joints of an API5L X65Q

Abstract: Microstructural and mechanical characteristics were evaluated along the cross section of joints obtained by (GMAW) of seamless API 5L X65Q steel pipes. Two types of joints were obtained from the bevel V and ½ V. By the division of the welded plates into 8 layers spaced 3 mm in the transverse direction, specimens were prepared for tensile tests, Vickers microhardness and chemical analysis. In addition, metallographic characterization was performed on the base metal samples and welded joints. It was observed a small change in the chemical composition of the weld metal between the 1st and 8th layer of the V joint and ½ V joint. The higher cooling rate of the ½ V bevel promoted higher acicular ferrite content. Some specimens of reduced size did not meet the minimum tensile properties limits specified in API 5L, a result attributed to the presence of discontinuities in some regions of the weld. The highest Vickers microhardness of the ½ V joint was attributed to the greater presence of the acicular ferrite. The adoption of narrow groove to improve the welding productivity did not negatively impact the properties of the joint, however, increased the occurrence of lack of fusion in the bevel face.

Key-words: Seamless pipe; API 5L X65Q steel grade; GMAW; Bevel ½ V.

1. Introdução

A exploração de petróleo *offshore* exige grande quantidade de tubos de aço para condução de óleo e gás tanto em águas profundas quanto *onshore*. As condições de solicitações mecânicas geralmente são complexas, devido às altas pressões envolvidas (internas e externas), exigem-se aços de alta resistência mecânica e espessura de parede relativamente grande (acima de 25,4mm) para aumentar a resistência ao colapso [1].

Um exemplo são tubos sem costura de acordo com as normas API 5L [2] e DNV [3] que atendem ao grau X 65Q/450. Tubos sem costura são laminados a quente e passam por tratamentos térmicos de têmpera e revenimento de modo a originar uma microestrutura refinada, assegurando altos níveis de resistência mecânica e tenacidade/ductilidade [1,2].



Na montagem de dutos a partir de tubos sem costura, a soldagem por fusão a arco elétrico com proteção gasosa (GMAW) é bastante utilizada, pois permite boa penetração da solda, zona termicamente afetada mais estreita e maiores velocidades de soldagem em relação ao processo SMAW [4,5]. Para atender às demandas de produtividade no setor industrial têm sido utilizados procedimentos como a confecção de chanfros “estritos” que necessitam de menor quantidade de metal de solda [6,7]. A junta em geometria $\frac{1}{2}$ V simula este tipo de chanfro. Com os complexos ciclos térmicos da soldagem multipasses e as diferentes taxas de resfriamento em função do tipo de chanfro e do aporte total de calor, podem ocorrer alterações da fração volumétrica de fases/constituintes como ferrita acicular, bainita, ferrita poligonal, ferrita de Widmanstätten, constituinte martensita/austenita retida (M-A) disperso na forma de ilhas e agregados ferrita-carbonetos [8].

Estudos detalhados de propriedades mecânicas e composição química ao longo da espessura de juntas soldadas com diferentes geometrias de chanfro ainda são poucos na literatura para materiais API. No presente trabalho, além de realizar a caracterização microestrutural das juntas de tubos sem costura API 5L X65Q, foram analisadas propriedades mecânicas das camadas do metal de solda e a composição química de cada região, do passe de raiz ao passe de acabamento. A partir dos resultados foi possível avaliar os efeitos da adoção de chanfro estreito do tipo $\frac{1}{2}$ V em comparação ao chanfro V recomendado pela API 1104 [9] na estrutura e propriedades mecânicas ao longo do cordão de solda do aço API 5L X65Q bem como na ocorrência de descontinuidades de soldagem.

2. Materiais e Métodos

Foram utilizados tubos sem costura laminados a quente com 273,1mm de diâmetro e 25,4mm de espessura de parede. O material foi tratado termicamente em linha de produção; temperatura de austenitização de 900°C por 20min, seguido de têmpera e revenimento a 650°C por 40min, atendendo às especificações do grau API 5L X65Q [2]. Posteriormente, em segmentos de tubos de aproximadamente 220mm de comprimento foram confeccionados chanfros em V, com dimensões recomendadas pela norma API 1104 [9], e chanfros em $\frac{1}{2}$ V. Na Figura 1 pode-se observar a representação esquemática das geometrias dos chanfros.

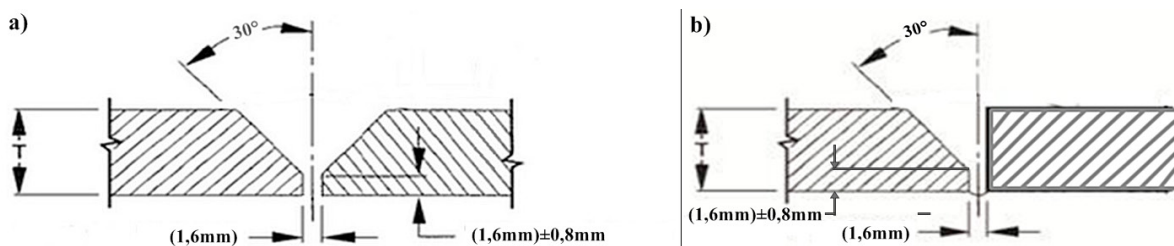


Figura 1. Representação esquemática do chanfro em: (a) V e (b) $\frac{1}{2}$ V.

A soldagem pelo processo GMAW foi realizada de modo semiautomático em dispositivo que permitiu girar o tubo (posição plana (1G)), em múltiplos passes com a mistura de gases Ar+15%CO₂ e utilização do arame-eletrodo AWS A5.18M [10] ER70S-6 com diâmetro de 1,2mm em todos passes de solda. A tensão utilizada foi 27V, corrente de 220A e velocidade de soldagem de 1,45mm/s no passe de raiz e 2,2mm/s nos passes de enchimento e acabamento. Considerando rendimento térmico igual a um, a energia bruta de soldagem foi de 4,1kJ/mm para o passe de raiz e 2,7kJ/mm para os demais passes. Não foi utilizado pré-aquecimento e a temperatura interpasses ficou entre 125°C~150°C. Uma fotografia das juntas soldadas apresentada na Figura 2 ilustra a diferença entre os cordões de solda nas duas condições. O número total de passes foi igual a doze para a junta com chanfro V e oito para aquela com chanfro $\frac{1}{2}$ V. O número de passes necessários para o acabamento foi igual a três para o chanfro em V e apenas um para o chanfro $\frac{1}{2}$ V.

Conforme a Norma ASTM E562 [11], metalografia quantitativa foi realizada no metal de solda e seus constituintes foram quantificados na região com 100% de grão colunares (últimos passes), após ataque com regente Nital 2%, considerando 40 campos aleatórios e uma malha de 100 pontos em imagens com aumento de 500x. Em microscópio eletrônico de varredura foram avaliados qualitativamente os agregados ferrita carboneto e constituintes martensita-austenita retida (M-A), após ataque com reagente Le Pera (solução de 1g de metabissulfito de sódio em 10mL de água destilada misturado a igual proporção de solução de 4g de ácido pícrico em 100mL de etanol) [12].

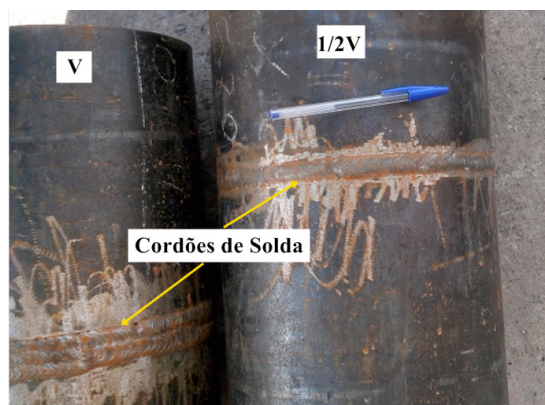


Figura 2. Fotografia do material como soldado: juntas soldadas com chanfro V e ½ V.

A análise química foi realizada pelo método de espectroscopia via emissão óptica seguindo um procedimento em camadas das juntas com chanfro em V e ½ V. As análises foram realizadas a cada 1mm ao longo da seção transversal no centro do cordão de solda, iniciando-se no passe de acabamento e, a partir de usinagem, incluiu toda a junta. Os resultados da oitava camada foram excluídos devido à grande interferência do metal de base na análise.

Para avaliação de propriedades mecânicas em tração foram realizados ensaios em 3 corpos de prova do metal base e 6 corpos de prova da junta completa (3 juntas com chanfro V e 3 juntas com chanfro ½ V), 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 [2], Figura 3a. Foram confeccionados mais 16 corpos de prova de tamanho reduzido (8 juntas com chanfro V e 8 juntas com chanfro ½ V, Figura 3b, c). A Figura 3c ilustra os cortes realizados em uma junta completa para obtenção dos dezesseis corpos de prova de tamanho reduzido com aproximadamente 3mm de espessura. Todos os corpos de prova de tração foram confeccionados com a solda no comprimento útil. Conforme representado na Figura 3, duas juntas de cada chanfro foram cortadas em camadas alternadas para que toda a seção transversal da solda pudesse ser ensaiada em tração, uma vez que a confecção dos corpos de prova resulta em perdas de material e não seria possível confeccionar os oito corpos de prova em apenas uma amostra de cada tipo de chanfro.

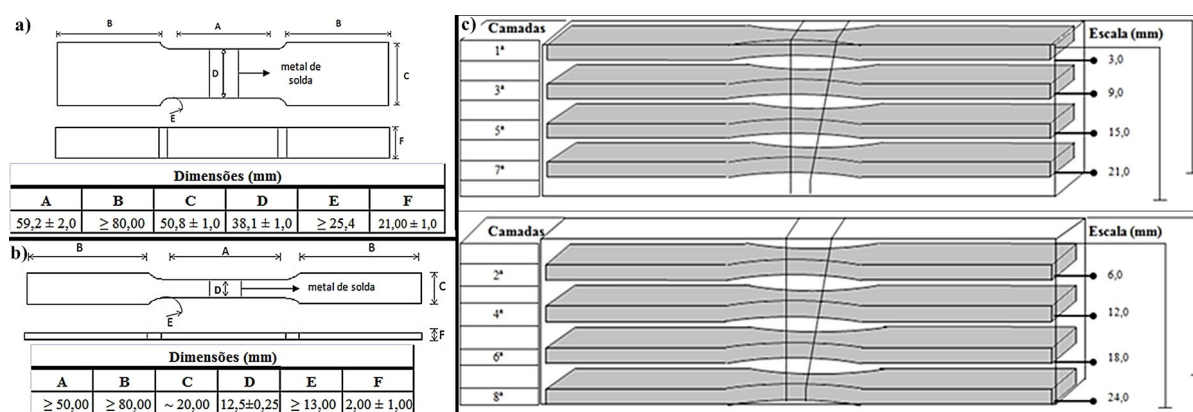


Figura 3. Representação esquemática de corpos de prova de tração e dimensões em milímetros da junta completa (a) e em camadas (b); (c) representação esquemática para corte de corpos de prova de tamanho reduzido de uma junta com chanfro ½ V. O mesmo foi realizado na junta com chanfro V.

Perfis de Microdureza Vickers HV foram realizados nas várias regiões da junta, obtendo-se sete perfis lineares para cada tipo de chanfro de modo a abranger todas as regiões da solda nas mesmas camadas onde se realizaram as análises químicas e de modo a obter quatro pontos na ZTA e quatro pontos na zona fundida, como exemplificado na Figura 4 para o chanfro em V. Utilizou-se um microdurômetro automático com carga igual a 1kgf por 10s, segundo a Norma ASTM A370 [13].

Regiões de pontos coletados por microdureza Vickers						
Camadas	MB	ZTA	MS	ZTA	MB	Escala (mm)
1ª						3,2
2ª						6,4
3ª						9,6
4ª						12,8
5ª						16,1
6ª						19,2
7ª						22,4
8ª						

Figura 4. Regiões de medição de microdureza Vickers na junta com chanfro em V. As camadas indicadas são as mesmas para a análise química e ensaios de tração. O mesmo procedimento foi realizado no chanfro ½ V.

Partes das juntas soldadas passaram ainda por inspeção por ultrassom para avaliação da integridade estrutural, técnica *A-Scan* com transdutor monocristal normal (4MHz) acoplado em alguns segmentos de tubo após a remoção do reforço da solda por usinagem. Uma vez que descontinuidades foram identificadas, os dois tipos de junta foram seccionados no sentido transversal ao cordão para avaliação macrográfica do tipo de descontinuidades em várias seções.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise química

Nas Tabelas 1 e 2, apresentam-se os resultados da análise química do metal de solda obtidos a partir de chanfro em V e ½ V, respectivamente. A composição química do metal base é apresentada na Tabela 3 e está de acordo com a especificação da API 5L para o grau X65Q [2].

Tabela 1. Composição química do metal de solda, chanfro em V (% em massa).

Camadas	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ti	Al	CE _{IIV}
1ª	0,0663	0,8550	1,3355	0,0198	0,0123	0,0050	0,0012	0,0053	0,3375
2ª	0,0720	0,7400	1,3580	0,0180	0,0099	0,0190	0,0014	0,0090	0,3500
3ª	0,0780	0,6600	1,3820	0,0170	0,0083	0,0240	0,0014	0,0100	0,3600
4ª	0,0700	0,8170	1,3655	0,0190	0,0103	0,0120	0,0014	0,0070	0,3500
5ª	0,0730	0,8100	1,0000	0,0190	0,0100	0,0130	0,0013	0,0070	0,3500
6ª	0,0800	0,4730	1,3885	0,0125	0,0051	0,0455	0,0017	0,0190	0,3700
7ª	0,0740	0,6710	1,3650	0,0130	0,0080	0,0220	0,0012	0,0100	0,3500
Média Total	0,0720	0,7306	1,3389	0,0173	0,0096	0,0188	0,0014	0,0095	0,3505

CE_{IIV} - Carbono equivalente segundo o Instituto Internacional de Soldagem ($CE_{IIV} = C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$).

Tabela 2. Composição química do metal de solda, chanfro em ½ V (% em massa).

Camadas	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ti	Al	CE _{IIV}
1ª	0,0643	0,8150	1,3048	0,0193	0,0110	0,0070	0,0010	0,0053	0,3200
2ª	0,0755	0,5650	1,3515	0,0150	0,0075	0,0360	0,0015	0,0160	0,3450
3ª	0,0900	0,2710	1,4310	0,0090	0,0020	0,0650	0,0020	0,0250	0,3700
4ª	0,0700	0,7670	1,2930	0,0185	0,0105	0,0160	0,0010	0,0070	0,3250
5ª	0,0710	0,7650	1,3030	0,0200	0,0100	0,0160	0,0010	0,0080	0,3300
6ª	0,0770	0,4945	1,3380	0,0130	0,0055	0,0435	0,0015	0,0185	0,3500
7ª	0,0810	0,4420	1,3810	0,0120	0,0050	0,0500	0,0020	0,0230	0,3600
Média Total	0,0724	0,6490	1,3286	0,0163	0,0084	0,0266	0,0013	0,0122	0,3365

CE_{IIV} - Carbono equivalente segundo o Instituto Internacional de Soldagem ($CE_{IIV} = C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$).

Tabela 3. Composição química do metal base como especificado (% em massa).

C	Mn	P	S	Si	Al	Mo
0,05-0,09	1,10-1,45	0,0-0,10	0,0-0,001	0,10-0,30	0,010-0,035	0,05-0,10
V	Nb	Ti	Cu	CE _{IIW}		
0,01-0,03	0-0,035	0,0-0,01	0,0-0,05	Max. 0,42		

Pelas Tabelas 1 e 2 pode-se afirmar que a média de carbono equivalente do metal de solda, para chanfros V e ½ V, atenderam o exigido pela norma API 1104 [9], $CE_{IIW}^{(V)} = 0,35\%$ e $CE_{IIW}^{(1/2V)} = 0,33\%$. Observa-se que a média da composição química das juntas possui valores semelhantes e, para alguns elementos, o maior teor é verificado na 1ª camada, região de menor diluição. Um exemplo é o Si, um dos importantes elementos para desoxidação da poça de fusão e nucleação de ferrita intragranular e ferrita acicular [1]. Segundo Trindade et al. [5] além da formação de óxidos de Si, óxidos de manganês e alumínio também influenciam na microestrutura final do metal de solda, atuando como sítios para nucleação de ferrita intragranular e de ferrita acicular. Apesar de não apresentados nas Tabelas 1 e 2, o CE_{IIW} no passe de raiz (oitava camada) foi igual a 0,37% para as juntas com os dois tipos de chanfro.

3.2. Caracterização microestrutural

As micrografias do metal base e dos passes de acabamento para os dois tipos de chanfro são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Observa-se na Figura 5 uma microestrutura refinada e homogênea formada por martensita revenida e bainita, típico para este aço [1,12], em (b) destaca-se a bainita identificada em microscopia eletrônica de varredura, 3000x. Nas micrografias da Figura 6 observam-se constituintes típicos de zona fundida para aços baixo carbono.

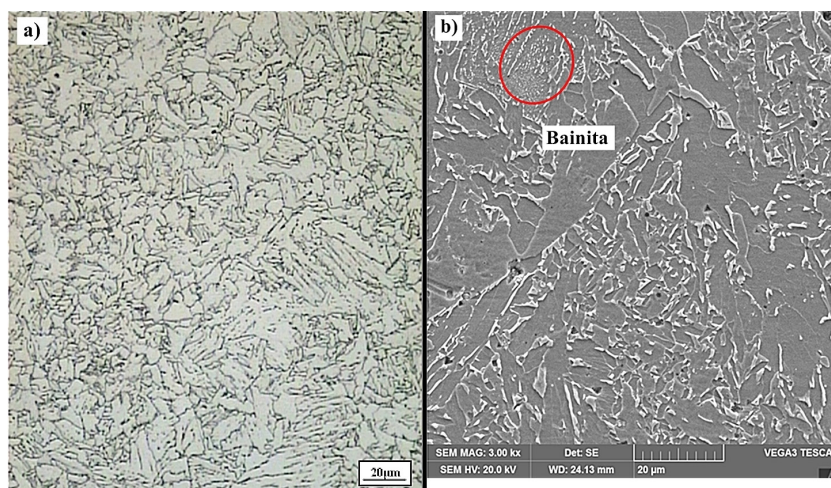


Figura 5. Micrografias do metal base: (a) microscópio óptico, 500x. Ataque Nital 2%; (b) microscópio eletrônico de varredura, 3000x. Ataque Nital 2%.

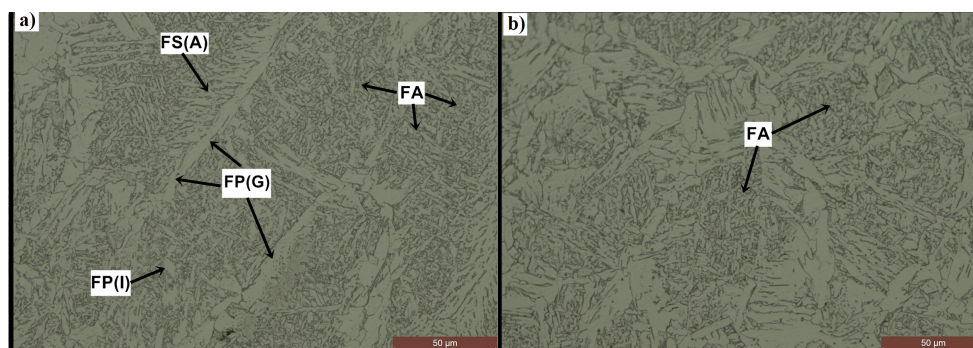


Figura 6. Micrografias dos passes de acabamento: (a) chanfro ½ V; (b) chanfro V. Ataque Nital 2%. FA: Ferrita acicular; FP(G): Ferrita primária; FP(I): Ferrita poligonal intragranular; FS(A): Ferrita com segunda fase alinhada.

Os resultados de metalografia quantitativa no metal de solda são apresentados na Tabela 4. Podem-se observar maiores frações volumétricas de ferrita acicular (FA) e ferrita primária intragranular (FP (I)) em relação aos outros constituintes, como já esperado devido aos teores de Si e Mn nas juntas [1,8]. Segundo Braz [14], na faixa de 0,6% a 1,8% em massa de Mn, aumenta-se a proporção de FA e diminui-se a ferrita alotriomórfica (FP(G)). A soma de ferrita primária intragranular e de contorno de grão apresenta-se em menor proporção no chanfro $\frac{1}{2}$ V, $\Sigma (FP^{(V)}) = 42,1\%$ e $\Sigma (FP^{(1/2V)}) = 39,6\%$.

Tabela 4. Fração volumétrica em porcentagem dos constituintes presentes no metal de solda, 1ª camada.

JUNTA V	FA (%)	FP(G) (%)	FP (I) (%)	FS (A) (%)	FS (NA) (%)	FC
Média	40,5±3,2	14,6±2,4	27,5±3,12	8,6±2,8	5,0±1,6	3,8±1,8
JUNTA 1/2V	FA (%)	FP(G) (%)	FP (I) (%)	FS (A) (%)	FS (NA) (%)	FC
Média	46,1±3,8	12,0±3,3	27,6±3,1	8,5±2,2	3,75±1,8	2,0±1,4

FA – Ferrita acicular; FP(G) – Ferrita primária; FP (I) – Ferrita poligonal intergranular; FS(A) – Ferrita com segunda fase alinhada; FS(NA) – Ferrita com segunda fase não alinhada; FC – Agregado ferrita e carbonetos.

Observa-se na junta com chanfro $\frac{1}{2}$ V maior presença de ferrita acicular ($FA^{(1/2V)} = 46,1\%$ e $FA^{(V)} = 40,5\%$), quando comparado à fração volumétrica com chanfro V, o que foi confirmado em teste t de Student realizado nos dados, com $p < 0,05$. Batalha et al. [1] obtiveram resultados semelhantes ao soldar o mesmo aço por GMAW com chanfro em V, aproximadamente 40% em fração volumétrica de FA para um chanfro em V.

A microestrutura do metal de solda é principalmente controlada por dois fatores: taxa de resfriamento e composição química. São vários os elementos de liga que influenciam na nucleação de ferrita acicular do metal de solda [15]. Na Tabela 1 e 2 destaca-se o Si em maior proporção na 1ª camada das juntas. O teor de Si relativamente alto na junta com chanfro $\frac{1}{2}$ V, somado ao resfriamento mais rápido devido à geometria do chanfro, uma vez que este exigiu apenas um passe de acabamento e possui menor aporte total de calor, promoveu maior percentual de FA em relação ao chanfro em V. Como a junta com chanfro em V também apresentou teor de Si relativamente elevado, o maior percentual de FA no chanfro $\frac{1}{2}$ V pode ser atribuído à maior taxa de resfriamento do metal de solda.

Em aços baixo carbono, maiores taxas de resfriamento do metal de solda podem favorecer a nucleação de ferrita no interior do grão, em forma de placas finas, sobre as inclusões formando a ferrita acicular [15,16]. Como os parâmetros de soldagem (temperatura de pré-aquecimento, espessura da peça e eficiência térmica do processo de soldagem) são os mesmos para os dois chanfros, a maior proporção de ferrita acicular no chanfro $\frac{1}{2}$ V comparada à junta com chanfro V é explicada considerando o tipo de chanfro [5].

As micrografias obtidas em microscópio eletrônico de varredura após o ataque Le Pera são apresentadas na Figura 7. De acordo com Araújo et al. [12] e Trindade et al. [8], após o ataque Le Pera a identificação do M-A pode ser feita utilizando-se MEV. Observa-se na Figura 7b a presença predominante de agregados M-A e na Figura 7a destacam-se várias regiões de ferrita-carboneto com poucas regiões de M-A. Os critérios de classificação dos constituintes M-A foram os mesmos adotados em [12], ou seja, as regiões atacadas correspondem à ferrita e as regiões ricas em carbono não são atacadas, sendo possível identificar os agregados Ferrita Carbonetos com morfologia descontínua e o agregado M-A massivo como indicado na Figura 7. Essas imagens corroboram que no chanfro $\frac{1}{2}$ V houve maior formação de M-A, uma vez que este constituinte se forma em maiores taxas de resfriamento, por um mecanismo que torna estável a austenita remanescente devido ao enriquecimento de carbono rejeitado no crescimento da ferrita [15,17].

3.3. Ensaio de tração

Os resultados obtidos nos ensaios de tração para corpos de prova de metal de base e junta completa são apresentados na Tabela 5.

Os corpos de prova do metal base atenderam os requisitos de resistência mecânica para o grau X65Q, limites mínimos iguais a 435MPa e 535MPa para escoamento e resistência, respectivamente. Todos os corpos de prova de junta completa foram fraturados na região da ZTA. As juntas com chanfros V e $\frac{1}{2}$ V também atenderam aos

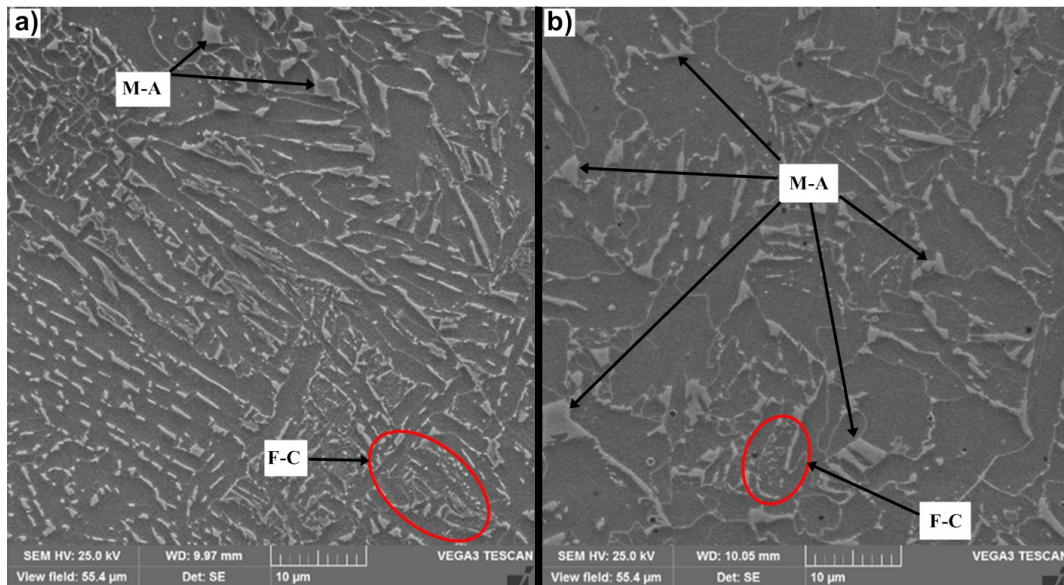


Figura 7. Micrografia eletrônica de varredura do metal de solda/passe de acabamento: (a) chanfro V; (b) chanfro 1/2 V. Ataque Le Pera, 5.000x.

Tabela 5. Resultados dos valores médios dos ensaios de tração de corpos de prova de metal base e da junta completa.

Material Fratura (Local)		Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
MB	Metal base	506	601	49
Junta V	ZTA	509	618	12
Junta 1/2 V	ZTA	497	603	16

requisitos mínimos de limite de escoamento e limite de resistência para o grau X65Q, no entanto, os requisitos de alongamento da Norma API 5L [2] (mínimo de 22%) não foram atendidos pelas juntas soldadas.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração para corpos de prova de tamanho reduzido, em camadas da junta, são apresentados na Figura 8. De forma geral, os corpos de prova com chanfro 1/2 V alcançaram maior limite de escoamento e limite de resistência comparado à junta com chanfro V.

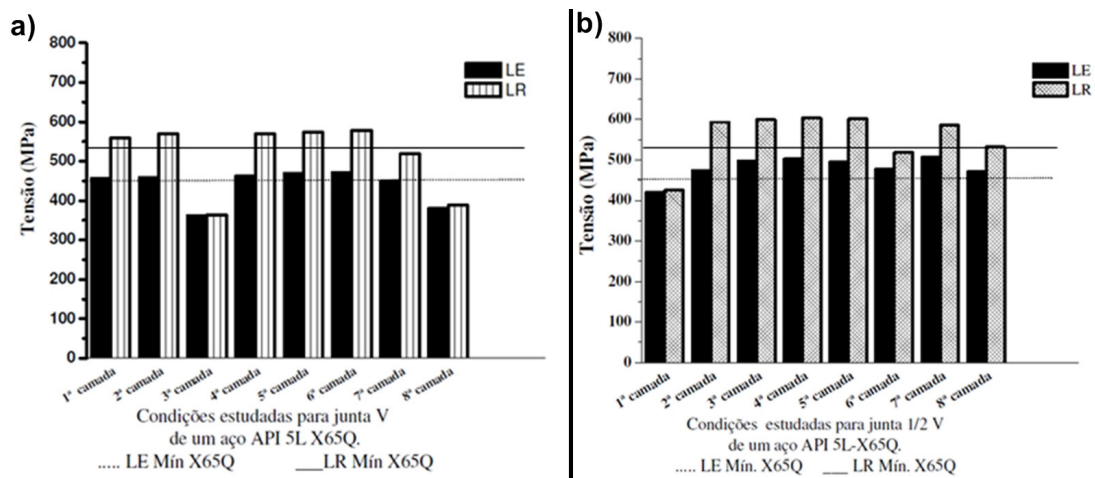


Figura 8. Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração de corpo de prova de tamanho reduzido: (a) chanfro V e (b) chanfro 1/2 V.

Os corpos de prova correspondentes às 3ª, 7ª e 8ª camada do chanfro V não atingiram o limite de escoamento e de resistência mínimos para o grau X65Q. Para os três casos, a fratura ocorreu no metal de solda. Os corpos de prova de tamanho reduzido correspondentes às 1ª, 6ª e 8ª camada da junta com chanfro ½ V também não atingiram o especificado e foram fraturados no metal de solda. Para todos esses casos identificou-se falta de fusão no metal de solda, fato que justifica a dispersão dos resultados e os valores de propriedades mecânicas relativamente baixos. A microfractografia obtida em MEV do corpo de prova correspondente à 3ª camada da junta com chanfro V é apresentada na Figura 9a e a fractografia da superfície fraturada da 6ª camada da junta com chanfro ½ V é apresentada em 9b. Observam-se em ambos os casos, Figura 9a, b, falta de fusão no metal de solda. Segundo Quintino et al. [5] a falta de fusão pode ser causada pela insuficiência da energia de soldagem para fundir as laterais do bisel ou pelo posicionamento incorreto da tocha durante a soldagem.

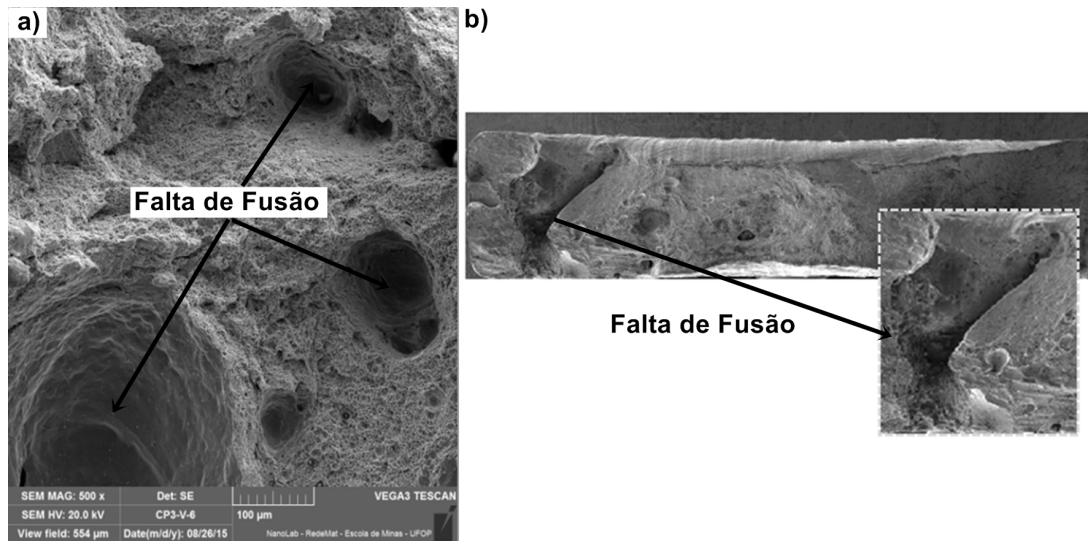


Figura 9. Fractografias: (a) falta de fusão observada em MEV do corpo de prova da 3ª camada da junta com chanfro V e (b) fractografia da superfície fraturada do corpo de prova da 6ª camada da junta com chanfro ½ V.

Ao diminuir a espessura dos CPs de tração de 24mm no caso das juntas inteiras (Tabela 5) para 3mm no caso das camadas (Figura 8), os mesmos apresentaram comportamento menos dúctil. Corpos de prova de maior espessura apresentaram maior deformação, o alongamento percentual para corpos de prova de junta completa variou de 13,5% a 15,5%. Já para corpos de prova de tamanho reduzido, esse valor decresceu para a faixa de 9,6% a 10%. Esse resultado é justificado pelas fraturas na região do metal de solda de alguns corpos de prova reduzidos, pois os mesmos apresentaram um efeito de concentração de tensão mais pronunciado em decorrência de falta de fusão, tendo em vista que algumas das camadas usinadas para confecção de alguns dos corpos de prova *sub-size* coincidiram com regiões de maior incidência de falta de fusão, como será apresentado posteriormente.

3.4. Ensaio de microdureza Vickers

Os resultados de microdureza Vickers para as camadas com chanfro V e chanfro ½ V estão apresentados na Figura 10. Os resultados obtidos entre a 1ª e 2ª camada foram identificados na legenda por 1ª/2ª camada, entre a 2ª e 3ª camada por 2ª/3ª camada e os demais resultados são específicos de cada camada, conforme representado na Figura 4. Observam-se maiores valores de microdureza no metal de solda na junta com chanfro ½ V em comparação à do chanfro V. Este resultado é coerente com a Figura 6 e Tabela 4, nas quais pode-se observar maior proporção de ferrita acicular na junta com chanfro ½ V, constituinte que geralmente apresenta maior resistência mecânica que outras morfologias ferríticas presentes neste tipo de metal de solda [1,15,16]. Além disso, a maior proporção de constituinte M-A na junta com chanfro ½ V pode contribuir para o aumento de dureza observado em relação à junta com chanfro em V [12,14-17]. Outro fator que justifica os valores de dureza relativamente mais baixos no metal de solda da junta com chanfro em V é o maior aporte total de calor em relação àquela com chanfro ½ V, uma vez que o número de passes foi maior e, portanto, as taxas de resfriamento foram menores e o efeito de reaquecimento dos passes subsequentes provavelmente se fez mais presente no chanfro em V [5,6,15].

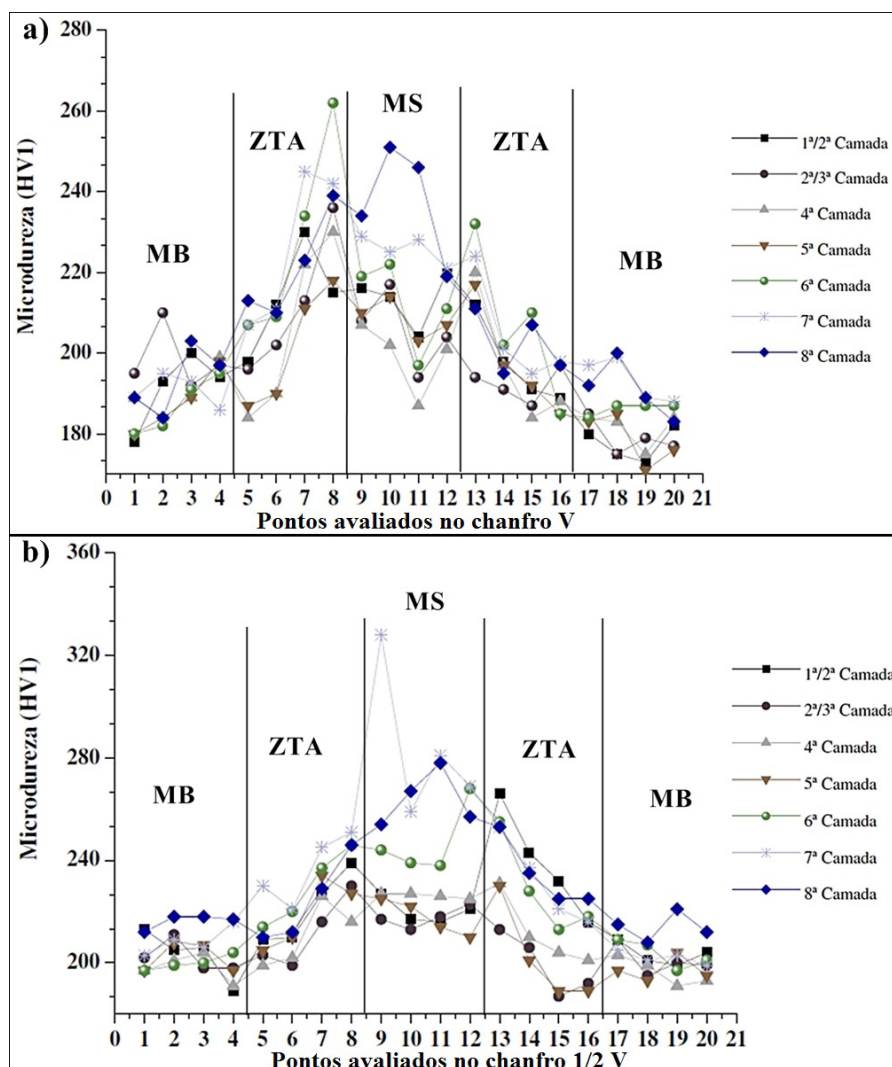


Figura 10. Perfis de microdureza Vickers nas regiões do metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS): (a) junta com chanfro V e (b) junta com chanfro 1/2 V. Os pontos avaliados referem-se à Figura 4.

Observa-se que o passe de raiz, 8ª camada na Figura 10, possui os maiores valores de microdureza nas duas juntas, o que decorre de dois fatores: (i) uma maior taxa de resfriamento destes passes em relação aos passes de enchimento e acabamento, uma vez que não foi utilizado pré-aquecimento nos passes de raiz; (ii) maior carbono equivalente devido à maior diluição nos passes de raiz em relação ao enchimento e acabamento.

Os valores de microdureza no metal de solda da junta com chanfro V decrescem da 8ª camada para a 5ª camada. Após a 5ª camada, identificam-se na 4ª camada os menores valores de microdureza no chanfro V. A 1ª, 2ª e 3ª camadas possuem valores de microdureza muito semelhantes. Entre a 8ª e a 5ª camada a taxa de resfriamento diminui e ocorre o reaquecimento devido aos passes subsequentes, que adquirem valores menores de microdureza. Na 4ª camada os menores valores de microdureza Vickers podem ser justificados pelo menor teor de carbono apresentado pela Tabela 1.

A junta com chanfro 1/2 V apresentou comportamento semelhante em relação à microdureza da junta com chanfro V, mas neste caso a 4ª e 5ª camadas apresentaram valores de microdureza aproximados, o que pode ser associado ao menor teor de carbono nestas camadas (Tabela 1).

Nas regiões da ZTA, os valores de microdureza foram como esperado, mais elevados que o metal base, principalmente próximo à linha de fusão, uma vez que a zona termicamente afetada possui maior temperabilidade

em função do crescimento de grão [18]. Ao compararmos os lados das regiões da ZTA da junta com chanfro $\frac{1}{2}$ V (Figura 10), observa-se que não há diferença significativa de microdureza entre o lado de 90° (ZTA à esquerda) e 30° (ZTA à direita).

Os ensaios não destrutivos por ultrassom indicaram uma maior incidência de falta de fusão na junta com chanfro em $\frac{1}{2}$ V em relação àquela com chanfro em V, sobretudo na face do bisel reto (90°), o que foi confirmado pelas análises macrográficas em camadas no sentido transversal das juntas, exemplificado pela Figura 11a. As ocorrências de falta de fusão na junta com chanfro em V foram entre os passes, Figura 11b. A maior ocorrência de falta de fusão no chanfro estreito pode ser atribuída a uma dificuldade maior de posicionamento da tocha e a maior massa de material para fluxo de calor no lado reto.

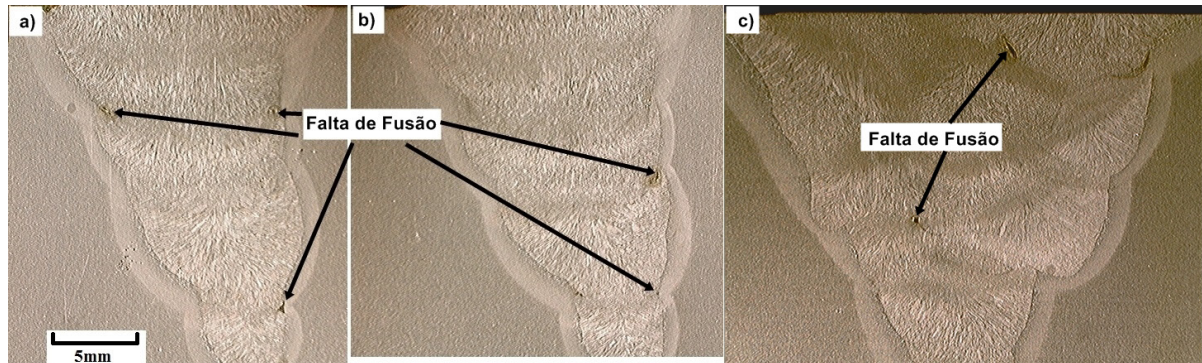


Figura 11. Macrografias obtidas em camadas nas quais discontinuidades foram detectadas por ultrassom. (a) e (b) – junta com chanfro em $\frac{1}{2}$ V; (c) – junta com chanfro em V. Ataque nital 2%; 6,5x.

4. Conclusões

Os resultados obtidos na análise química, caracterização estrutural e ensaios mecânicos e não destrutivos das juntas com chanfro em V e $\frac{1}{2}$ V, conduziram às seguintes conclusões:

A composição do metal base atendeu ao especificado para o grau X65Q. A composição química das juntas com chanfro em V e $\frac{1}{2}$ V não variou muito em relação à seção transversal. Destacam-se os elementos Si e Mn que apresentaram maior teor nos últimos passes devido à menor diluição.

O tipo de chanfro exerceu influência sobre a fração volumétrica de ferrita acicular, revelada na metalografia quantitativa. A soldagem com geometria em chanfro $\frac{1}{2}$ V permitiu depositar menor quantidade de material e menor aporte de calor total, portanto a taxa de resfriamento foi mais alta que no chanfro V, o que conduziu à maior fração volumétrica de ferrita acicular e constituinte M-A.

O metal base atendeu aos requisitos mínimos de limite de escoamento e limite de resistência. Para os corpos de prova da junta completa, o limite de escoamento e o limite de resistência atenderam à Norma API 5L e foram praticamente iguais para os chanfros V e $\frac{1}{2}$ V. Ao diminuir a espessura dos corpos de prova de tração (24mm para 3mm) para análise em camadas, os mesmos apresentaram comportamento menos dúctil devido à concentração de tensão em função da falta de fusão em algumas camadas.

Os resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers mostraram que o chanfro $\frac{1}{2}$ V possui em geral maiores valores de microdureza comparado ao chanfro V, o que corrobora a hipótese de maior taxa de resfriamento. Além disso, os valores medidos nos perfis de microdureza Vickers, para os chanfros V e $\frac{1}{2}$ V, foram semelhantes entre as camadas. A ausência de pré-aquecimento conduziu a maiores taxas de resfriamento dos passes de raiz em relação aos passes de enchimento e acabamento, fato que, associado ao maior carbono equivalente proveniente de uma maior diluição nesta região, justifica os valores de microdureza mais elevados medidos nos passes de raiz dos dois chanfros. Não houve alteração significativa de valores de microdureza Vickers em juntas $\frac{1}{2}$ V, entre o lado da ZTA de 90° e o lado de 30° .

Conclui-se também que, no caso do aço em estudo, a adoção de chanfro estreito, visando maior produtividade na soldagem, não impactou negativamente nas propriedades da junta. Entretanto, para as condições de aporte térmicos avaliadas, a adoção de chanfro estreito aumentou a ocorrência de falta de fusão na face reta do bisel.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- [1] Batalha RL, Godefroid LB, Faria GL, Porcaro RR, Cândido LC, Trindade VB. Envelhecimento por deformação em juntas soldadas de tubos de aço API5L X65Q sem costura. *Soldagem & Inspeção*. 2015;20(3):324-332. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2004.02>.
- [2] American Petroleum Institute. API 5L: petroleum and natural gas industries – steel pipe for pipeline transportation. 45th ed. Washington: API; 2012.
- [3] Det Norske Veritas As. DNV-OS-F101: offshore standard – submarine pipeline systems. Hovik: DNV; 2013.
- [4] Barbedo, ND. Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas e resistência mecânica [dissertação de mestrado]. Itajubá: UNIFEI; 2011.
- [5] Quintino L, Liskevich O, Vilarinho L, Scotii A. Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (GMAW). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;68(9-12). p. 2833-2840. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4862-8>.
- [6] Hamada M, Nagayama H, Nakamura J, Shitamoto H, Fukuba T. Study on test procedure development to evaluate pipe properties at HAZ in girth welded portion. In: Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. API 1104 Committee Meeting; 2013 Jan; New Orleans. Tokyo: NSSMC; 2013. [acesso em 9 abr. 2017]. Disponível em: http://mycommittees.api.org/standards/api1104/Meeting%20Materials/2013%20January/Addendum%201%20-%20API-1104_hamada_r0.pdf
- [7] Yapp D, Blackman A. Recent developments in high productivity pipeline welding. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2004;26(1):89-97. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782004000100015>.
- [8] Trindade VB Fo, Guimarães AS, Payão JC Fo, Paranhos RPR. Normalizing heat treatment on the mechanical behavior of low alloy steel weld metals. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2004;26(1):62-66. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782004000100011>.
- [9] American Petroleum Institute. API 1104: welding of pipelines and related facilities. 20th ed. Washington: API; 2008.
- [10] American Welding Society. AWS A5.18M: specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding. Miami: AWS; 2005.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM E562: standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. West Conshohocken: ASTM; 2011.
- [12] Araújo LCSD, Candido LC, Trindade VB, Porcaro RR. Avaliação da influência de tratamentos térmicos pós-soldagem sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de um aço API 5L X70Q. *Soldagem & Inspeção*. 2015;20(2):171-179. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.05>.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM A370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken: ASTM; 2014.
- [14] Braz MHP. Propriedade de fadiga de soldagem de alta resistência e baixa liga com diferentes composições microestruturais [dissertação de mestrado]. São Carlos: Universidade de São Paulo; 1999.
- [15] Kou S. *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken: Wiley Interscience; 2003.
- [16] Kang Y, Jeong S, Kang JH, Lee C. Factors affecting the inclusion potency for acicular ferrite nucleation in high-strength steel welds. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016;47(6):2842-2854. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-016-3456-0>.
- [17] Laitinen R. Improvement of weld HAZ toughness at low heat input by controlling the distribution of M-A constituents [tese de doutorado]. Oulu: Universidade de Oulu; 2006.
- [18] Mine Y, Hirashita K, Takashima H, Matsuda M, Takashima K. Micro-tension behaviour of lath martensite structures of carbon steel. *Materials Science and Engineering*. 2013;560:535-544. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.099>.

Errata

No artigo “Características Microestruturais e Mecânicas ao Longo da Seção Transversal de Juntas Soldadas em Multipasses pelo Processo GMAW de um Aço API 5L X65Q”, DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/S12202.10>, publicado no periódico Revista Soldagem & Inspeção, vol. 22, no. 2, pp. 217-227, na página 217:

Onde se lê:

“Geraldo Lúcio de Faria Lima”

Leia-se:

“Geraldo Lúcio de Faria”

