

CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA E DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO API 5L X80 OBTIDAS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO COM ARAME TUBULAR ROBOTIZADO COM DIFERENTES APORTES TÉRMICOS¹

Angel Rafael Arce Chilque²
Patrícia Sheilla Costa³
Rúbia da Silva Celina Rocha³
Alexandre Queiroz Bracarense⁴

Resumo

Um estudo do comportamento da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço ARBL (aço de alta resistência e baixa liga) tipo API 5L X80, soldado com o processo de soldagem ao Arco Elétrico com Arame Tubular (FCAW) robotizado, com diferentes níveis de energia de soldagem foi realizado. Para tal foram utilizadas técnicas convencionais de metalografia óptica, microdureza *Vickers* Hv e ensaios mecânicos de tração e *Charpy*. Inicialmente, foram depositados cordões de solda em forma de camadas sobre chapas do aço API 5L X80, variando a energia de soldagem e sem pré-aquecimento visando a caracterização da microestrutura. Em seguida foram executadas soldagens multipasses com chanfro em V e chanfro em K para caracterização das propriedades estruturais e mecânicas (tração, resistência ao impacto) das juntas soldadas. Os resultados mostram que é possível a obtenção de juntas soldadas com boas propriedades de soldabilidade utilizando procedimento de soldagem pelo processo FCAW específico.

Palavras-chave: Aço API 5L X80; Arame tubular; Caracterização metalográfica; Metalurgia da soldagem.

METALLOGRAPHIC CHARACTERIZATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF STEEL API 5L X80 OBTAINED BY THE PROCESS OF FLUX-CORED ARC WELDING ROBOTIZED WITH DIFFERENT CONTRIBUTIONS THERMAL

Abstract

A study of the behavior of the microstructure and mechanical properties of HSLA (high strength low alloy) API 5L X80 type steel, welded with flux-cored electric arc welding robotized process (FCAW), with different welding energy levels was performed. Conventional techniques of optical metallography, microhardness Hv and tensile test and Charpy were used. Initially, weld beads in the form of layers were deposited on plates of API 5L X80 steel by varying the welding energy without preheating in order to characterize the microstructure. In the sequence multipass welds were performed in V and K grooves to characterize the structural and mechanical properties (tensile, impact resistance). The results show that it is possible to obtain a welded joint with good weldability properties by using a specific welding FCAW procedure.

Key words: API 5L X80 Steel; Tubular wire; Metallographic characterization; Welding metallurgy.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Eng. Metalúrgico, Docteur es Sciences, Professor da Faeng, UEMG, João Monlevade, MG, Brasil.

³ Graduanda, Engenharia Metalúrgica, UEMG, João Monlevade, MG, Brasil.

⁴ Físico, PhD., Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos estão sendo desenvolvidos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) com o objetivo de atender à demanda crescente do mercado, em particular de petróleo e gás,⁽¹⁾ que busca menores custos das instalações e dos reparos e por isso requer o menor peso dos tubos, fazendo com que sejam necessários aços de maior resistência mecânica permitindo a diminuição da espessura dos tubos sem que o desempenho seja afetado.

Uma das formas de fabricar aços com maior resistência mecânica é o aumento do teor de carbono e de elementos de liga, porém, com o aumento do teor de carbono a soldabilidade fica comprometida necessitando de cuidados especiais durante a soldagem das tubulações.⁽²⁾ De acordo com Svensson⁽³⁾ uma alternativa viável para conseguir um aço com baixo teor de carbono e que possua propriedades de resistência, tenacidade e soldabilidade adequadas, são os aços ARBL com adição de microelementos (Nb,V,Ti) obtidos pelo processo TMCP (*Termomechanical Controlled Processing*) e com resfriamento acelerado.

Em termos de Brasil, a Petrobrás vem fazendo investimentos na construção de novos gasodutos e com isso é necessário uma operação mais econômica de transporte desse combustível, exigindo o aumento das dimensões das tubulações que também devem resistir a pressões cada vez mais elevadas.⁽⁴⁾ Há então a necessidade de utilizar tubos em aços de elevada resistência mecânica, superiores aos utilizados normalmente, fazendo com que os investimentos, segundo Stalheim e Siciliano,⁽¹⁾ se direcionem para os aços ARBL tipo API 5L X70, X80, X100 e X120.

O aço API 5L X80 é um ARBL que possui um limite de escoamento mínimo de 550 MPa utilizado na fabricação de tubos soldados de grande diâmetro para transporte de óleo e seus derivados. Por ter um baixo teor de carbono (em torno de 0,08%) o referido aço possui boa soldabilidade o que é essencial para o tipo de aplicação requerida deste aço, onde a soldagem é realizada em campo.

Dado o elevado volume de soldas previstas para a soldagem de dutos, é importante considerar a introdução racional de processos de soldagem semi-automáticos e automáticos, principalmente nas juntas orbitais. Uma alternativa na soldagem para os passes de enchimento e de acabamento de juntas soldadas é o uso do processo de soldagem ao Arco Elétrico com Arame Tubular automatizado e robotizado (FCAW - *Flux Cored Arc Welding*) que é fortemente desejável tanto pela qualidade da solda como pela maior produtividade que o processo oferece.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense,⁽⁵⁾ o processo de soldagem ao Arco Elétrico com Arame Tubular consiste na união da peça de trabalho e metal de adição pelo aquecimento destes através de um arco elétrico. O metal de adição é um eletrodo tubular consumível, contendo um fluxo no seu interior com funções de proteção, adição de elementos de liga e desoxidação. Ele reúne as principais características do processo MIG/MAG como alto fator de trabalho e elevada taxa de deposição e também do processo com eletrodo revestido como versatilidade e possibilidade de ajuste da composição química.

Além disso, a consideração dessas tecnologias inovadoras deve ser acompanhada de estudos de caráter metalúrgico e de soldabilidade, alguns destes aspectos são abordados neste trabalho, incluindo estudos sobre, a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona fundida (ZF) como forma de corroborar com informações já existentes deste aço.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O aço de alta resistência e baixa liga API 5L X80 é o metal de base do presente estudo sendo que a primeira etapa do trabalho foi realizada sobre chapa de 19,00 mm de espessura. Nessa etapa foram depositados cordões de solda em camadas sobre a chapa para verificar as características metalúrgicas da ZTA e da ZF do aço quando soldado em diferentes energias de soldagem, desta forma obtendo subsídios para melhor interpretar as juntas soldadas multipasses obtidas.

Na segunda etapa do trabalho foi realizada a soldagem multipasse de juntas com chanfro em V e K em chapa de 17,30 mm de espessura do mesmo aço com composição química e propriedades mecânicas apresentadas no Quadro 1. O aço foi fornecido pela Usiminas na forma de chapa. A chapa de 19,00 mm possui composição química similar.

Quadro 1. Dados de Composição química e propriedades mecânicas do aço API 5L X80

Metal de base	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
API 5L X80	0,070	0,230	1,720	0,019	0,002	0,010	0,130	0,190	0,010
Metal de base	Al	V	Nb	Ti	Ce(iiw)	V+Nb+Ti	Rm (MPa)	LE _{0,5} (MPa)	AL (%)
API 5L X80	0,035	0,021	0,063	0,013	0,430	0,097	683	561	34

Fonte: USIMINAS

No Quadro 1 pode-se observar o baixo teor de carbono, característica principal dos aços ARBL, assim como a conformidade com os requisitos da norma API 5L⁽⁶⁾ em termos de composição química e propriedades mecânicas. Além disso, na mesma tabela observa-se o valor do Carbono Equivalente do IIW (*International Institute of Welding*). De acordo com Malcolm¹ (apud ROCHA, p.66)⁽⁷⁾ o carbono equivalente pode ser calculado por duas fórmulas que são as comumente utilizadas:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

A primeira é a fórmula do carbono equivalente do IIW indicada para aços normalizados com alto teor de carbono, sendo que se o carbono equivalente for maior que 0,45% serão necessários cuidados quando o aço for soldado.

Já a segunda fórmula é conhecida como parâmetro do carbono equivalente e foi desenvolvida no Japão na década de 60 sendo indicada para os novos aços com baixo teor de carbono como é o caso do API 5L X80, sendo que de acordo com Malcolm (apud Rocha, p.66)⁽⁷⁾ valores de 0,18 a 0,20 de P_{cm} são compatíveis com 0,40 da fórmula do CE_{IIW} . De acordo com os cálculos percebe-se que a princípio o aço API 5L X80 apresenta boa soldabilidade, pois seus valores de CE_{IIW} e P_{cm} respectivamente são de 0,43 e 0,186.

Para a soldagem sobre chapa foi utilizado corpos de prova de 150 x 250 mm com espessura de 19,00 mm e as camadas de solda foram realizadas sobre a chapa sem pré aquecimento e em diferentes níveis de energia, sendo estes de 650 J/mm, 1.250J/mm e 2.200J/mm em média. O metal de adição utilizado nessa etapa foi o arame tubular autoprotetido OK Tubrod98OA (AWS E91T8-G) com diâmetro de 1,6mm. Considerou-se a soldagem feita sempre na direção transversal à direção de laminação para as duas etapas do trabalho.

Para a soldagem multipasses os corpos de prova foram preparados de acordo com as normas ASME IX⁽⁸⁾ e API 1104.⁽⁹⁾ As dimensões dos corpos de prova foram de 125 x 250 mm com espessura de 17,30 mm. Na raiz foi utilizado o eletrodo básico AWS E9018M de 3,25mm de diâmetro e para enchimento e acabamento foi escolhido o Arame Tubular Autoprotetido AWS E91T8-K8 (OK Tubrod98OA) com diâmetro de 2,00 mm. As propriedades mecânicas e composição química dos consumíveis utilizados encontram-se descritas no Quadro 2.

Quadro 2. Composição química e propriedades mecânicas dos consumíveis

Metal de adição	Diâmetro (mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
E-91T8-K8	2,00	0,079	0,418	1,929	0,015	0,005	0,639	0,044	0,025	0,021	0,517
E-9018-M	3,25	0,072	0,418	1,087	0,023	0,013	1,589	0,084	0,170	0,035	0,002
E-91T8-G*	1,60	0,060	0,170	1,920	-	-	0,830	-	-	-	0,900

Metal de adição	Diâmetro (mm)	W	V	Nb	Ti	Fe%	V+Nb+Ti	Rm (Mpa)*	LE (Mpa)*	AL (%)*	Ce(iiw)
E-91T8-K8	2,00	0,063	0,018	0,016	0,072	96.139	0,106	650	560	26	0,457
E-9018-M	3,25	0,000	0,014	0,003	0,023	96.467	0,040	630-700	-	24-26	0,381
E-91T8-G*	1,60	-	-	-	-	-	-	650	560	26	0,330

*Catálogo do fabricante (ESAB,2008)⁽¹⁰⁾

Para as juntas multipasses o corte e o Bisel das chapas foram feito com chama Oxi-acetilênica e com acabamento por esmerilhamento. Os tipos de junta e chanfro selecionados foram de topo com chanfro em V de 65°. A abertura de raiz foi de 3,00 mm e face de raiz ou nariz de 1,50 a 2,00 mm.

As soldas em camadas foram realizadas na posição plana utilizando o robô MOTOMAN; O programa de testes é apresentado no Quadro 3.

Quadro 3. Programa de testes e parâmetros utilizados na soldagem

Tipo de Soldagem	Corpo de Prova	Eletrodo	Chanfro	Energia de Soldagem (J/mm)	Temperatura pré-aquecimento	Temperatura Interpasses	Testes realizados					
							Macrografia	Micrografia	Microdureza	Tamanho de grão da GGZTA	Ensaio de Tração	Ensaio Charpy
Sobre Chapa	01ATB	Arame Tubular (AWS E91T8-G) 1,6mm	NR	640	NR	NR	R	R	R	R	NR	NR
	02ATB		NR	608	NR	NR	R	R	R	NR	NR	NR
	03ATB		NR	608	NR	NR	R	R	R	NR	NR	NR
	01ATM		NR	1173	NR	NR	R	R	R	R	NR	NR
	02ATM		NR	1173	NR	NR	R	R	R	NR	NR	NR
	03ATM		NR	1202	NR	NR	R	R	R	NR	NR	NR
	01ATA		NR	2229	NR	NR	R	R	R	R	NR	NR
	02ATA		NR	2464	NR	NR	R	R	R	NR	NR	NR
	03ATA		NR	2522	NR	NR	R	R	R	NR	NR	NR
Multipasse	CP04	Arame Tubular (AWS E91T8-K8) 2,0mm	V	800	≈100°C	≈100°C	R	R	R	NR	R	NR
	CP05		V	520	≈100°C	≈100°C	R	R	R	R	R	NR
	CP08		K	470	≈250°C	≈250°C	R	NR	NR	NR	NR	R

NR: Não Realizado; R: Realizado; ATB: arame tubular baixa energia; ATM: arame tubular média energia; ATA: arame tubular alta energia.

Para os cordões obtidos sobre chapa, a numeração 01, 02 e 03 antes das siglas ATB, ATM e ATA significa 1^o, 2^o e 3^o cordão respectivamente para cada condição. Sendo que o segundo cordão foi sobreposto ao primeiro e o terceiro cordão sobreposto ao segundo. Além disso, tentou-se manter o mesmo nível de energia de soldagem para os três cordões de cada condição (baixa energia, média energia e alta energia). Dessa forma, os valores de energia mostrados no Quadro 3 equivalem a cada cordão separadamente como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1. Significado das siglas dos corpos de prova mencionados

Corpo de Prova	Posição	Energia de soldagem (J/mm)	Referência do nível de Energia Empregado
01ATB	1 ^o cordão	640	Baixa Energia
02ATB	2 ^o cordão	608	Baixa Energia
03ATB	3 ^o cordão	608	Baixa Energia
CP05	Última camada de multipasse	520	Baixa Energia
CP08	Última camada de multipasse	470	Baixa Energia
01ATM	1 ^o cordão	1173	Média Energia
02ATM	2 ^o cordão	1173	Média Energia
03ATM	3 ^o cordão	1202	Média Energia
CP04	Última camada de multipasse	800	Média Energia
01ATA	1 ^o cordão	2229	Alta Energia
02ATA	2 ^o cordão	2464	Alta Energia
03ATA	3 ^o cordão	2522	Alta Energia

As macrografias e micrografias das seções transversais dos corpos de prova, tanto nas juntas soldadas como nas camadas foram feitas fazendo uso de ataque com Nital a 2% e o ensaio de microdureza Vickers efetuado no microdurômetro Shimadzu, foi realizado com 100g de carga aplicada durante 15 segundos. Para a medição do tamanho de grão da região de grão grosseiro da zona termicamente afetada (GGZTA) foi utilizado o método planimétrico e o ataque foi realizado com solução de ácido pícrico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Macrografia

Na Figura 1 são apresentadas as macrografias obtidas de todos os corpos de prova do presente estudo. Nas fotos estão registradas ainda, as linhas onde foram efetuadas as medidas de dureza, da esquerda para a direita, ao longo das camadas de solda.

Analisando a Figura 1 observa-se que os cordões sobre chapa obtidos com o arame tubular autoprotetido AWS E91T8-G (01ATB, 02ATB, 03 ATB, 01ATM, 02ATM, 03ATM, 01ATA, 02ATA e 03ATA), foram sobrepostos de forma a obter uma camada regular. Verifica-se que com o aumento de energia de soldagem a penetração diminuiu e o ângulo de reforço aumentou. Esse aumento do ângulo de reforço não é tão prejudicial já que a soldagem ao arco elétrico com arame tubular autoprotetido foi projetada para preenchimento de juntas, devido a maior produtividade do processo. Já para as juntas soldadas obtidas com o arame AWS E91T8-K8 (CP04,

CP05 e CP08), pode-se observar a disposição dos cordões, bem como as zonas e regiões da junta soldada em passes múltiplos.

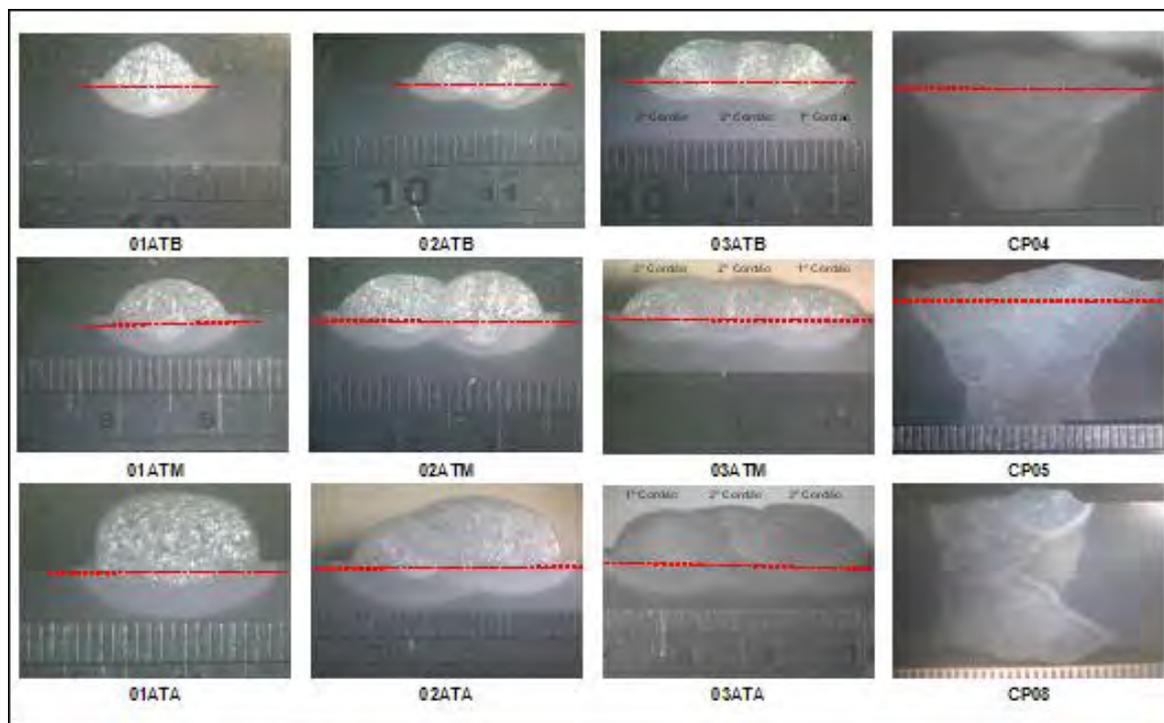


Figura 1. Macrografias dos corpos de prova em estudo.

3.2 Microdureza

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os gráficos das microdurezas obtidas ao longo dos cordões sobre chapa no que diz respeito à dureza horizontal transversal ao cordão e em baixo do cordão na região de grão grosseiro respectivamente.

Observa-se na Figura 2 que a zona fundida apresenta maior dureza em todos os corpos de prova. Comparando os três corpos de prova de baixa energia, foi encontrada dureza de 373 HV na ZTA do primeiro cordão, o que indica a presença de estruturas frágeis como a martensita. Já nos corpos de prova de média energia foi encontrada dureza pontual acima de 350 HV apenas na ZF do último cordão da camada, além disso, não houve diminuição considerável de dureza do 1º cordão após sobreposição do 2º e 3º cordões. Comparando-se o 01ATB e 01ATM verifica-se que não há diferença significativa nas durezas da ZF e ZTA. Com relação aos corpos de prova de alta energia (01ATA, 02ATA, 03ATA), quando comparados com os de baixa e média energia, percebe-se que apresentaram durezas inferiores. Nota-se ainda que a dureza do 1º cordão de alta energia diminui 5% na ZTA e 15% na zona fundida com a sobreposição do 2º cordão, e 2% na ZTA com a sobreposição do 3º cordão. A dureza na zona fundida do 1º cordão não foi significativamente influenciada pela sobreposição do 3º cordão para os corpos de prova analisados.

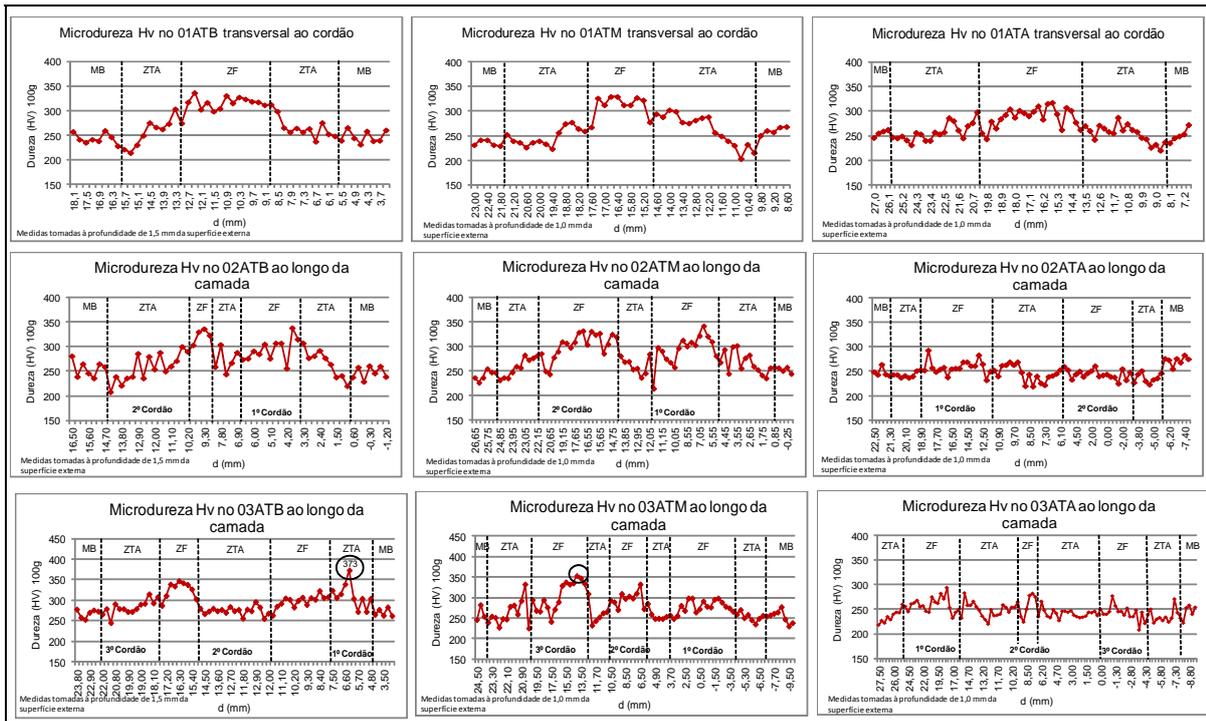


Figura 2. Perfil de microdureza ao longo do cordão das soldas sobre chapa para os corpos de prova 01ATB, 02ATB, 03 ATB, 01ATM, 02ATM, 03ATM, 01ATA, 02ATA e 03ATA.

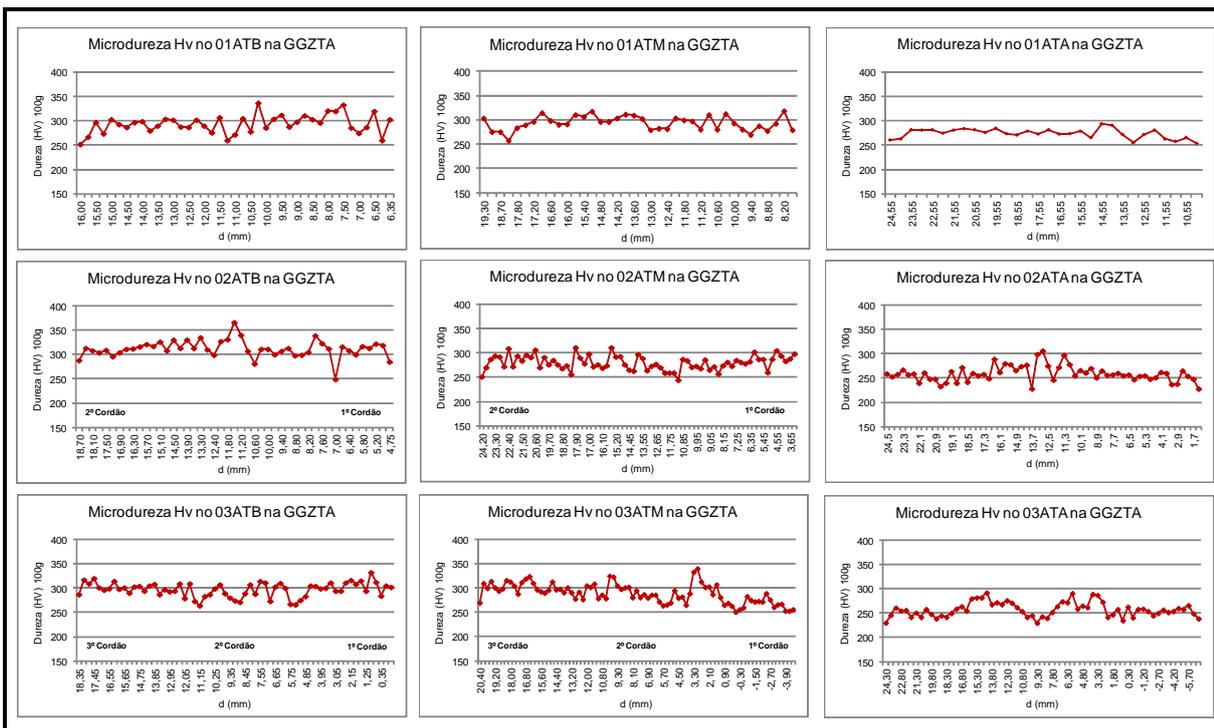


Figura 3. Perfil de microdureza embaixo do cordão das soldas sobre chapa para os corpos de prova 01ATB, 02ATB, 03 ATB, 01ATM, 02ATM, 03ATM, 01ATA, 02ATA e 03ATA.

Na Figura 3 são apresentadas as durezas embaixo do cordão para os corpos de prova da solda em camadas. Verifica-se que nos corpos de prova de baixa e média energia das soldas em camadas não foi verificada influência na dureza do primeiro cordão na região de grão grosso da zona termicamente afetada (GGZTA), após a sobreposição do 2º e 3º cordões. Já nos corpos de prova de alta energia verificou-se

que ocorreu uma diminuição da dureza de 6,2% na GGZTA do primeiro cordão após a sobreposição do 2º cordão e após sobrepor o 3º cordão não houve influência significativa no valor de dureza do 1º cordão.

Nas juntas soldadas dos corpos de prova CP04 e CP05, as medidas de dureza foram tomadas na última camada a 2,00 mm da superfície externa da chapa; os resultados são apresentados na Figura 4. Verifica-se que a dureza na zona fundida (ZF) é da mesma ordem de grandeza da dureza da zona termicamente afetada (ZTA). No CP04 a dureza ao longo da junta soldada é da ordem de 250 HV, possuindo valores de durezas em torno de 220Hv na ZF devido a sub regiões de grão fino afetadas da ZF causadas pelo efeito térmico de um cordão em cima do outro e valores da ordem de 250HV para as sub regiões de grão grosseiro afetada da ZF pelo efeito térmico de um cordão em cima do outro, como pode ser visto nas micrografias da Figura 5 respectivamente. No CP05 o perfil de dureza apresenta maior dispersão de valores ao longo da junta chegando inclusive a valores de 350 HV do lado esquerdo da junta, o que não é observado do lado direito; podendo estar relacionado ao menor nível de energia de soldagem utilizado no CP05 (520J/mm) e ao efeito térmico de um cordão sobreposto ao último cordão do lado direito e que pode ser visto na macrografia na Figura 1.

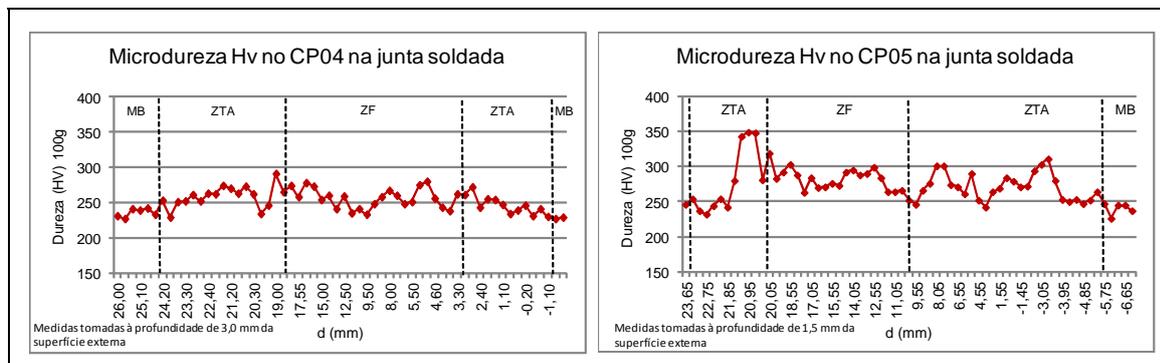


Figura 4. Perfil de dureza ao longo da junta soldada da última camada para os corpos de prova CP04 e CP05.

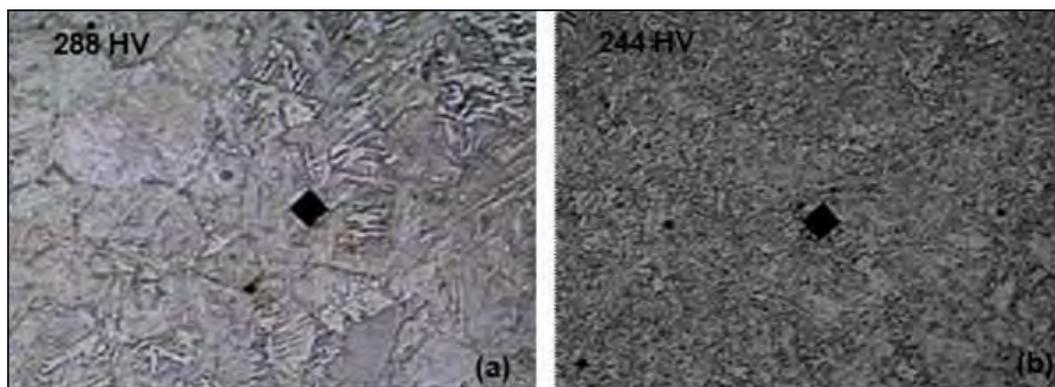


Figura 5. (a) Na região de grão grosseiro afetada da ZF no 02ATB. (b) na região de grão fino afetada da ZF no 02ATB. Aumento de 200X.

Na Figura 6 são apresentadas as médias de dureza de cada região da junta soldada por corpo de prova analisado. Verifica-se com a análise da Figura 6 que, em média, não houve dureza acima de 350HV na última camada das juntas soldadas e nas camadas sobre chapa com um cordão. Observa-se que a região de grão grosseiro do CP05 apresenta dureza sensivelmente superior, o que pode estar relacionado com a baixa energia utilizada na soldagem (520J/mm).

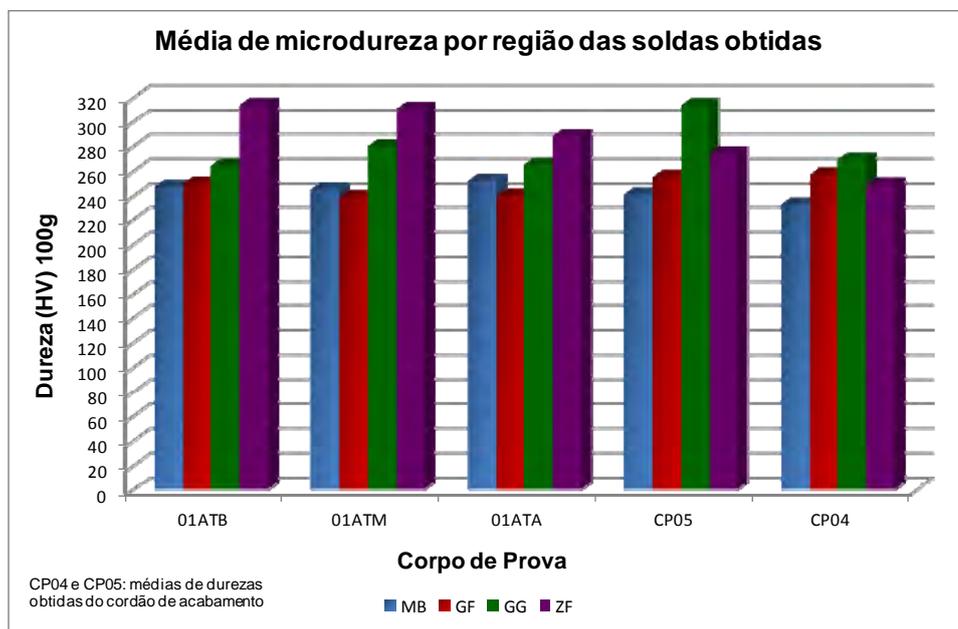


Figura 6. Média de dureza por região para 01ATB, 01ATM, 01ATA, CP04 e CP05.

3.3 Micrografia

Na Figura 7 são apresentadas as micrografias das diferentes regiões de uma solda para os corpos de prova sobre chapa com um cordão e no último cordão de acabamento das juntas soldadas em estudo. Observa-se que o metal de base apresenta estrutura bandeada composta por ferrita e carbonetos, normalmente encontrada nos aços obtidos por laminação controlada, como é o caso do API 5L X80. A região de refino de grão apresenta estrutura de ferrita com grãos finos e carbonetos. A região de grão grosseiro apresenta pontos duros nos corpos de prova de baixa energia indicando presença de martensita e em geral a estrutura sendo de ferrita e carbonetos, tipo bainita.

Na zona fundida percebe-se um alto nível de dureza que pode estar relacionado com os elementos de liga presentes no metal de adição e com a morfologia da estrutura presente nessa região. Os corpos de prova com um cordão de solda (01ATB, 01ATM e 01ATA) podem ser comparados com o último cordão das soldas multipasses, pois estes não sofrem alterações microestruturais pelo efeito de outros cordões. Além disso, a zona fundida apresenta ferrita com segunda fase alinhada e não alinhada, alguns pontos de martensita; em geral não foi detectada a presença de ferrita primária e os valores médio de dureza da zona fundida correspondentes para cada corpo de prova são indicados na figura 6 e estes resultados estão coerentes com outros resultados encontrados anteriormente para a ZTA e ZF do mesmo aço por Arce et al.⁽¹¹⁾

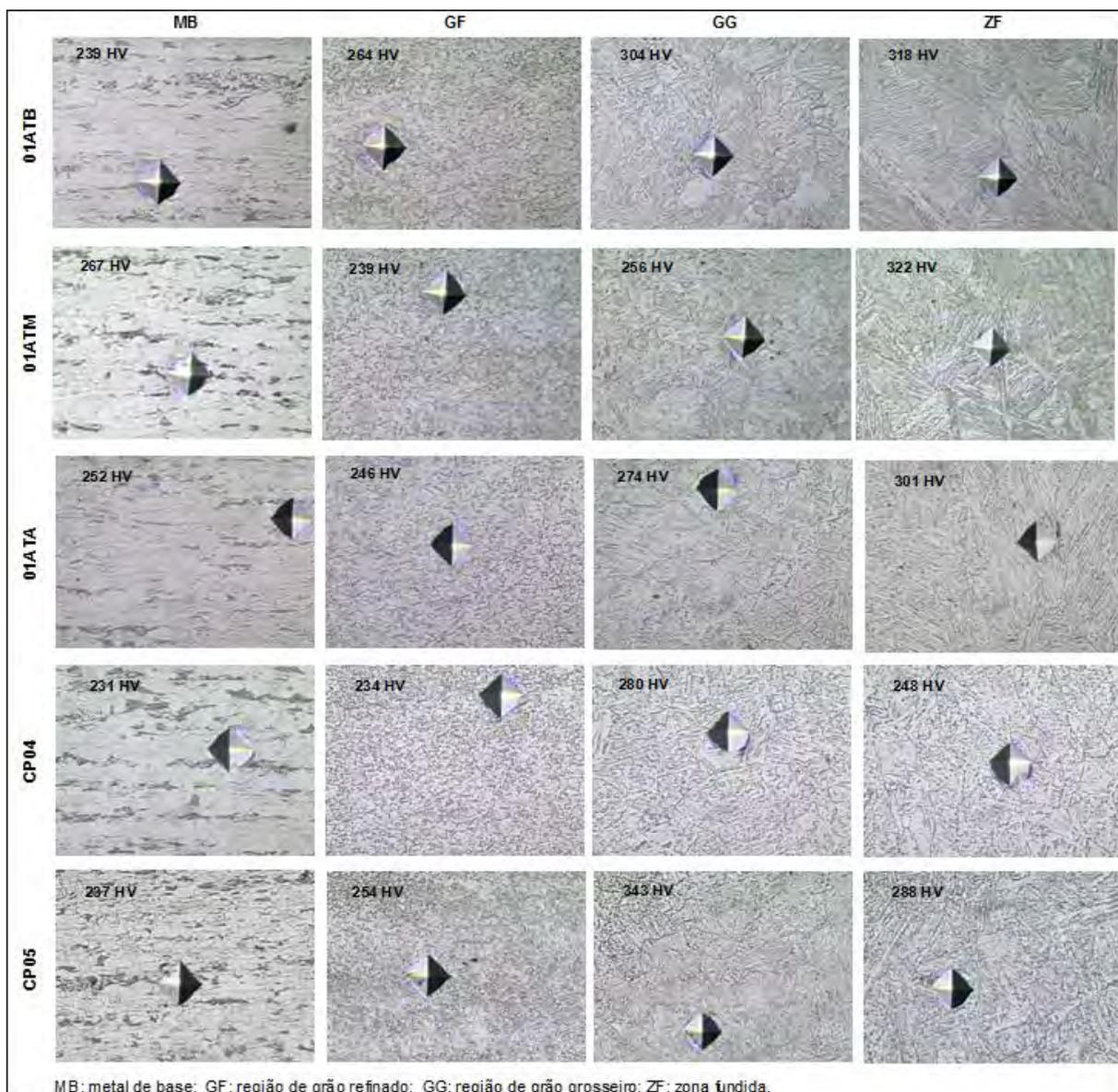


Figura 7. Micrografias das diferentes regiões dos cordões obtidos sobre chapa e do cordão de acabamento das juntas soldadas. Aumento de 500x.

3.4 Tamanho de Grão da ZTA

No Quadro 4 é apresentado o tamanho de grão da ZTA na região de grão grosseiro para os corpos de prova com um cordão e para o último cordão de acabamento das juntas soldadas do CP04 e CP05.

Quadro 4. Tamanho do grão da região de grão grosseiro da ZTA

Corpo de Prova	Energia de Soldagem (J/mm)	Pré-aquecimento	Tamanho de Grão da GGZTA		
			Diâmetro (μm)	Desvio padrão (\pm) (μm)	ASTM
01ATB	640	NR	20	2,5	8,4
01ATM	1173	NR	49	1,0	5,8
01ATA	2229	NR	61	7,0	5,2
CP04	800	100°C	NR	NR	NR
CP05	520	100°C	21	1,5	7,8

Verifica-se com a análise do Quadro 4 que quanto maior a energia de soldagem maior será o tamanho médio do grão, sendo que no 01ATA o tamanho do grão é quatro vezes maior (60µm) que o metal de base que tem tamanho de grão da ordem de 15 microns e três vezes maior que o tamanho de grão do corpo de prova soldado com baixa energia (01ATB).

3.5 Ensaios Mecânicos

No Quadro 5 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de tração e Charpy das juntas soldadas.

Quadro 5. Ensaios mecânicos realizados nas juntas soldadas

Corpo de Prova	Chanfro	Energia de Soldagem (J/mm)	Ensaio de Tração		Ensaio Charpy		
			Rm (MPa)	Local de Ruptura	Energia (J) a 0°C	Energia (J) a -20°C	Estrutura da ZTA (GG)
Metal de Base	-	-	683*	-	207	201	Bainita e Ferrita
CP04	V	800	651	Metal de base	NR	NR	Bainita e Ferrita
CP05	V	520	656	Metal de base	NR	NR	Bainita com vestígios de Martensita
CP08**	K	470	NR	NR	236	104	Bainita com vestígios de Martensita
					246	184	
					236	-	

NR: Não realizado * : Fonte Usiminas ** : Realizado ensaio Charpy em 3 corpos de prova.

Para as juntas soldadas dos CP04 e CP05 verificou-se que o local de ruptura no ensaio de tração foi na região do metal de base, indicando assim, uma boa resistência da junta soldada e em conformidade com a norma API1104⁽⁹⁾ que especifica que no teste de tração a ruptura deve ocorrer fora do metal de solda.

O valor de resistência ao impacto do CP08 relaciona-se com o tipo de estrutura metalúrgica presente na região de grão grosseiro da ZTA (GGZTA) e bons resultados a -20°C foram alcançados indicando uma boa tenacidade da junta soldada até essa temperatura. Além disso, cuidados devem ser tomados no posicionamento do entalhe, dada a estreita dimensão da mesma, em que há sempre a possibilidade de se ter influência da ZF e/ou do metal de base, principalmente na propagação da ruptura; nesse caso, estará se medindo a resistência ao impacto da junta soldada como um todo o que é também um bom resultado tecnológico segundo Pepin et al.⁽¹²⁾

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem concluir que:

- a ZTA dos corpos de prova soldados sobre chapa com alta energia de soldagem, é influenciada significativamente com a sobreposição do segundo passe e levemente alterada pela sobreposição do terceiro passe. A zona fundida é alterada apenas pelo segundo passe, não sofrendo influência do terceiro;
- a zona fundida é a zona que apresenta maior dureza nos corpos de prova analisados neste trabalho. A microestrutura desta zona é complexa e composta por sub regiões de grãos finos e de grãos grosseiros afetadas pelo

efeito térmico de um cordão em cima do outro, sendo que a sub região de grão grosseiro afetada apresenta valores de dureza sensivelmente superior à sub região de grão fino afetada. Esta variação de dureza corresponde à encontrada ao longo da zona fundida multipasses. Os valores de dureza encontrados correspondem à presença principalmente de ferrita e carbonetos;

- a região de GGZTA, que é a região mais crítica da ZTA, não sofreu influência significativa na dureza com a sobreposição dos cordões de revenimento nos corpos de prova soldados com baixa e média energia sobre chapa. Já para os corpos de prova de alta energia a dureza nessa região, diminuiu em 6,2% com a sobreposição do segundo e terceiro cordões, mostrando com isso que para baixa e média energia a técnica de sobreposição da forma efetuada neste trabalho não foi suficientemente adequada para alterar a dureza da GGZTA;
- as juntas soldadas apresentaram bons resultados nos ensaios mecânicos, pois a ruptura no ensaio de tração ocorreu no metal de base e no ensaio de impacto (a -20°C) os resultados foram satisfatórios;
- os resultados metalográficos obtidos nas juntas soldadas e nos corpos de prova sobre chapa para média e baixa energia foram satisfatórios, indicando uma boa soldabilidade do aço API 5L X80 para os parâmetros de soldagem utilizados. Para a alta energia serão necessários estudos complementares;
- alguns pontos de dureza elevada encontrados nos perfis de microdureza medidos sugerem a necessidade de, juntamente com a técnica de cordões de revenido utilizada neste trabalho utilizar preaquecimento à temperatura igual ou superior a 100°C; estes resultados são coerentes com outros resultados encontrados anteriormente para a ZTA; e
- os resultados metalográficos e da dureza na zona fundida encontrados, sensivelmente maiores que os do metal de base, indicam sobre a conveniência em se experimentar consumíveis com características mais próximas ainda das do metal de base.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG, a Esab pelo fornecimento de consumíveis, ao Cetem pelo apoio logístico, aos alunos de Pós-graduação Siderley Fernandes Albuquerque, José Aniceto Monteiro Gomes e Luis Edmundo Ramírez Luna e aos graduandos de Engenharia metalúrgica do grupo de soldagem da FaEnge/UEMG do pelo apoio dado na execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 STALHEIM, D. G., SICILIANO, F., *The Application of High Temperature Processing (HTP) Steel for Oil and Gas Transmission Pipelines*. Rio Pipelines 2007 Conference – R.J. 02-04 de outubro de 2007.
- 2 GORNI, A.A.; DA SILVEIRA, J.H.D.; REIS, J.S.S. Metalurgia dos aços microligados usados em tubos soldados de grande diâmetro. *Revista Corte e Conformação de Metais*, 5:59 Março 2010, 50-63.
- 3 SVENSSON, L.E. *Control of microstructures and properties in steel arc welds*. CRC Press, Boca Raton FLA, 1994.
- 4 BOTT, I. Corrosão na Indústria do petróleo. *Revista ABM*, 621, volume 69 jan/fev 2013, 053-057.

- 5 MARQUES, P.V; MODENESI, P.J; BRACARENSE,A.Q.. Soldagem: fundamentos e tecnologia. ed.3 UFMG, Belo Horizonte, 2011.
- 6 API 5L 2000. Specification for Line Pipe. API Specification 5L Forth-second edition, january 2000. Washington, D.C, 2000.
- 7 ROCHA, D.B. Estudo da soldabilidade do tubo API 5L X80 utilizando os processos de soldagem: MAG com transferência controlada e eletrodo tubular. 2010. 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em <http://scielo.com.br>. Acesso em 18 dez. 2013.
- 8 ASME, Welding Qualifications, section IX, 2004 edition.
- 9 API 1104. Welding of Pipelines and Related Facilities, 1104. Washington, 2008.
- 10 Catálogo de produtos da ESAB. OK Arames Tubulares, 2008.
- 11 Arce Ch., A.R; Bracarense, A.Q.; et al. Estudo comparativo da microestrutura e propriedades mecânicas de soldas do aço X80 feitas pelos processos SMAW, por gravidade (normal e subaquática) e FCAW robotizados. In Congresso anual da ABM, 67., 2012, Rio de Janeiro. Anais...São Paulo: ABM, 2012. CD-ROM, INSS 1516-392X
- 12 PEPIN, J, Penniston C, Henein H, Ivey D.G,Wiskel J.B, Boyd J.D, The effects of Squarewave polarity parameters on Microalloyed Steel Charpy V-Notch Results , Proceedings of IPC 2008 7^a International Pipeline Conference (IPC 2008), September 29-October 3,2008,Calgary, Alberta, Canada.