

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM INNERSHIELD NAS CARACTERÍSTICAS DA SOLDA DE UM AÇO ESTRUTURAL ASTM - A36

W.P. Martins¹, P.C. Caetano¹, J.J. Costa¹, V.S. Leal¹, C.C.F. Nascimento¹
Av. Getúlio Vargas, nº. 04. Monte Castelo. CEP:65030-005. São Luís/MA.
waldemir@ifma.edu.br

¹Departamento de Mecânica e Materiais – IFMA – Instituto Federal do Maranhão.
Campus Monte Castelo.

RESUMO

Este trabalho avalia a influência dos parâmetros do processo de soldagem Innershield, também conhecido como processo de soldagem com arame tubular autoprotetido (Flux Cored Arc Welding – Self Shielded/FCAW-SS), nas características da solda do aço ASTM A-36. São variados os parâmetros de tensão e corrente do arco e a velocidade de soldagem a fim de se detectar suas influências sobre a largura, a penetração, o reforço do cordão e a dureza do metal de solda. As medições geométricas dos cordões de solda são realizadas em macrografias obtidas da seção transversal da solda, por meio de microscópio óptico, bem como as análises da microestrutura. As medições de dureza são realizadas com microdurômetro na seção transversal dos cordões. A taxa de deposição é determinada pela velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem bem como da pesagem dos corpos de prova antes e depois da deposição da solda. Com este estudo é possível afirmar, qual a melhor morfologia do cordão de solda.

Palavras-Chaves: fcaw-ss, geometria do cordão de solda, dureza, taxa de deposição.

INTRODUÇÃO

O grande avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas tem contribuído consideravelmente no desenvolvimento de novos materiais. Dentre estes materiais os aços ainda se destacam como os mais utilizados e comercializados mundialmente. Entretanto, uma das principais características para comercialização de um aço é a sua soldabilidade, fortemente influenciado pelo teor de carbono

presente em sua composição química, e por isto tendo sido necessário um grande desenvolvimento tecnológico nesta área, para viabilizar sua utilização⁽¹⁾. O processo de soldagem FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), além da ótima aparência da solda e da alta qualidade do metal depositado, apresenta-se como uma excelente alternativa na soldagem dos aços estruturais, capaz de proporcionar ganhos na produtividade com um mínimo de investimento em relação a outros processos, visto que os princípios de funcionamento e os equipamentos do processo FCAW são semelhantes aos usados no processo com arame sólido (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*), também conhecido como *MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas)*^(2,3).

O FCAW acumula as vantagens da alta taxa de deposição e alto rendimento do GMAW, aliadas à alta versatilidade da soldagem do processo com eletrodos revestidos (*Shielded Metal Arc Welding - SMAW*), fazendo com que o FCAW, apresente flexibilidade e produtividade superiores ao MIG/MAG devido à alta densidade de corrente, proporcionado pela forma tubular do eletrodo⁽⁴⁾.

A soldagem FCAW, dada a sua excelente taxa de deposição, alcançando até 11 kg/h quando comparada à soldagem com eletrodo revestido^(4,5), é de grande utilização na construção naval, na qual se tem grandes extensões de chapas a serem unidas e em posições fora da plana⁽⁵⁾.

O uso do processo Innershielded (FCAW-SS) na soldagem de estruturas metálicas ainda é pouco conhecida e pode ser melhorada, por meio do aumento da taxa de deposição do metal de adição, porém a complexidade de resultados indesejáveis que podem ocorrer em razão da variação, sem um estudo científico, de valores da tensão, da velocidade de alimentação do arame e da distância bico de contato-peça, pode resultar em riscos de não-conformidades da solda. Portanto, este trabalho apresenta uma avaliação da influência dos parâmetros de soldagem que conduzem a uma soldagem Innershielded, sem comprometimento das características metalúrgicas e das propriedades mecânica da junta soldada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais e equipamentos

Como material de base foi utilizado o aço de classificação ASTM Grau A36 (NBR 6648/6650/7007), correspondendo ao aço do tipo estrutural, em forma de chapas com dimensões de 200 mm x 100 mm x 10 mm (comprimento x largura x

espessura), com bisel de 30° para junta em “V”, como mostra a Figura 1. Aos pares essas peças geraram os corpos de prova com chanfro de 60°. A composição química e propriedades mecânicas do material são apresentadas na Tabela 1. As características do consumível (ASME SFA A-5.20: E71T-11, diâmetro 1,6 mm) são apresentadas na Tabela 2. O arame tubular autoprotégido E71T -11 é indicado para soldagem simples ou multipasse no modo de transferência spray e comumente utilizado em aços de baixo e médio teor de carbono até 3/4”.

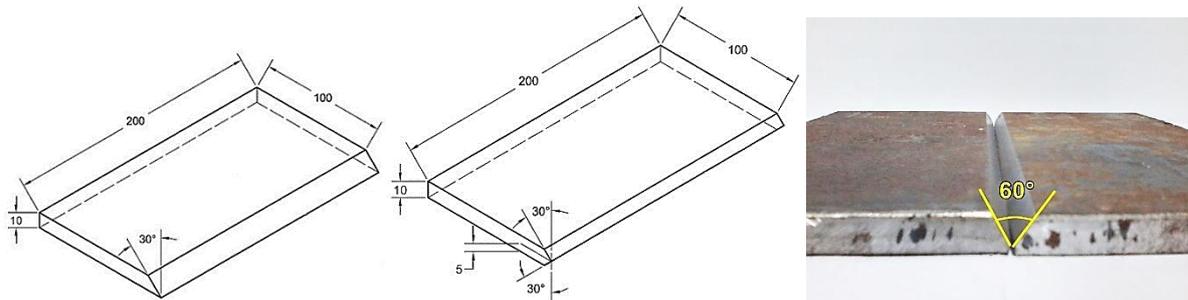


Figura 1 – Esquema ilustrativo das chapas biseladas para formação dos chanfros.

Tabela 1 – Composição química (%máximo em peso) e propriedades mecânicas do aço ASTM A36.

Composição	C	P	S	Si	Cu
% Máximo	0,26	0,04	0,05	0,40	0,20
Propriedade Mecânica	LE (MPa) 250 (mín.)	LR (MPa) 400 – 550	Alongamento 20 %	Ceq = 0,27	

Tabela 2 – Composição química (% em peso) e propriedades mecânicas do arame tubular

Composição	C	Si	Mn	Al	P	S
E71T-11	0,25	0,40	0,70	1,60	-	-
Propriedade Mecânica	LE (MPa) 500	LR (MPa) 630	Alongamento 23 %	Ceq = 0,37		

Equipamentos

Foi utilizada uma fonte de soldagem modelo LAI 400 e ângulo de soldagem da tocha de 90°. Especificações técnicas: Corrente nominal/soldagem (A): 300/400 – 300; Tensão em carga convencional (V): 34 – 29. Os demais equipamentos utilizados serviram para o corte das amostras a serem analisadas metalograficamente, entre eles: 1. Para retirada dos corpos de prova da junta soldada foi utilizada uma serra de fita marca S. Ramos, modelo 260 e os cortes

foram executados em sentido transversal ao cordão da solda; 2. Para preparação das amostras foi utilizado uma lixadeira metalográfica marca Arotec, modelo Aropol E usando uma sequência de lixas de 80 a 1200 meshes; 3. Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em um microdurômetro digital de bancada HMV SHIMADZU, MODELO MICROHARDNESS TESTER HV – 1000 com endentador piramidal de diamante.

Métodos

As soldagens foram realizadas na posição plana, junta de topo, sentido puxando, modo de transferência por curto-circuito, como mostra a Figura 2. A fonte de soldagem foi operada no modo “tensão constante” e ângulo de soldagem da tocha de 90°. Variou-se a velocidade de alimentação do arame e conseqüentemente a corrente de soldagem.



Figura 2 – Foto do arranjo utilizado para realização das soldagens.

O processo de soldagem foi automatizado objetivando-se boa repetibilidade dos parâmetros de soldagem. O Objetivo foi alcançado com a utilização de um suporte para a tocha de alimentação do arame tubular, fixado em uma máquina de corte do tipo MR 36 (tartaruga), de fabricação da White Martins, com os metais de base dispostos em um gabarito fixo na mesa de soldagem. A DBCP foi mantida constante em 16 mm. Os ensaios iniciais serviram para selecionar os cordões de solda com melhores características dimensionais e de acabamento (homogeneidade do cordão, quantidade de respingos e forma da escória) que se adaptaram ao passe de raiz, enchimento e acabamento.

Após esta análise inicial novos ensaios de deposição foram realizados para que se ajustasse essa condição a condição real de soldagem e proporcionasse

juntas soldadas livres de descontinuidades. Os corpos de prova (CP) soldados podem ser vistos na Figura 3 e seus parâmetros na Tabela 3.

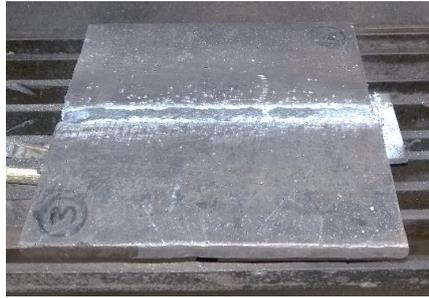


Figura 3 – Foto da chapa soldada

Tabela 3. Parâmetros de Soldagem.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Raiz	19 V/145 A	19 V/145 A	18,8 V/160 A	18,8 V/160 A
	140 mm/min	140 mm/min	160 mm/min	150 mm/min
	1,377	1,377	1,316	1,403
Enchimento1	22 V/240 A	22 V/244 A	22 V/232 A	19,6 V/180 A
	120 mm/min	120 mm/min	140 mm/min	150 mm/min
	3,080	3,131	2,552	1,646
Enchimento2	-	-	-	22 V, 172 A 140 mm/min 1,892
Reforço na Raiz	17,2 V/144 A	17,2 V/144 A	-	-
	110 mm/min	110 mm/min	-	-
	1,576	1,576	-	-

As chapas foram ancoradas com cantoneiras na parte oposta ao chanfro, do lado da raiz, como mostrado na Figura 4. As cantoneiras foram soldadas com eletrodo revestido (eletrodo E6013) com quatro cordões cada, deixando um espaço no meio, correspondente a abertura para execução do passe de raiz da junta. Esse procedimento visa garantir a restrição e evitar deformações do conjunto durante a solidificação dos cordões de solda. Foram utilizadas ainda duas chapas que auxiliaram no início e no final da soldagem.



Figura 4 – Chapas restringida mostrando na parte inferior as cantoneiras de ancoragem e nas laterais as chapas de início e fim da soldagem

A preparação metalográfica dos corpos de prova para análise microscópica foi realizada de maneira convencional, por lixamento com lixas de granulometria variando de 80 a 1200 mesh e polimento com alumina de 1 micron. O ataque químico foi feito com Nital a 2% e a análise microscópica realizada por microscopia ótica objetivando avaliar qualitativamente a microestrutura do passe de acabamento na região da zona fundida (ZF). Para o ensaio de microdureza foi adotado o método Vickers, sendo o ensaio realizado conforma a norma ASTM E384, onde os corpos de prova para este ensaio foram os mesmos usados na análise metalográfica. Em cada corpo de prova foram traçados 7 pontos de impressão aleatória de dureza na ZF, na ZTA e no MB como mostra o esquema ilustrativo da Figura 5.

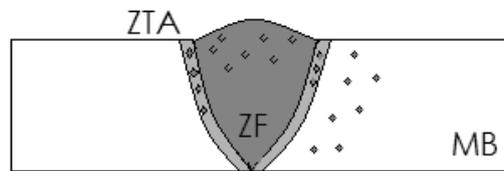


Figura 5 – Esquema ilustrativo das juntas soldada para ensaio de microdureza.

As propriedades geométricas dos cordões foram avaliadas de acordo com o mostrado na Figura 6. As características geométricas do metal depositado são definidas pela largura (l), reforço (r) e a penetração (p) medidos a partir da seção transversal da solda e têm influência significativa sobre as suas propriedades mecânicas.

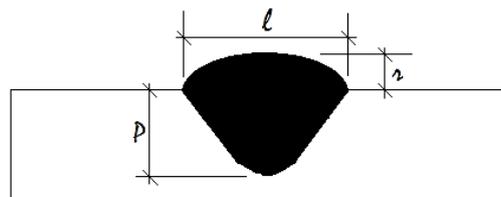


Figura 6 – Características geométricas do cordão de solda

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Energia de Soldagem

Durante a soldagem tentou-se manter a energia de soldagem (Tabela 3) a mais baixa e constante possível para o passe de raiz e variações nos demais passes para se obter características ideais de enchimento e acabamento. Os cordões de solda resultantes nos CP's tiveram boa aparência e boas dimensões e não se constatou a

falta de fusão, penetração, porosidade, inclusões de escória e mordeduras. Apesar da solda ter sido realizada de forma mecanizada e a geração de respingos oriundos do processo Innershielded, o arco se manteve estável durante toda a soldagem visto que esta é de grande importância e pode influenciar nas propriedades mecânicas dos conjuntos soldados uma vez que modificações de seus valores podem induzir a variações na morfologia do cordão de solda (penetração, largura e altura do reforço) e também na estrutura de solidificação devido às alterações provocadas no gradiente térmico na poça de fusão.

Quantidade de arame depositado

Com os parâmetros de soldagem e a massa dos corpos de prova antes e depois da soldagem, pode-se calcular a massa real de arame depositado. Na tabela 4, vemos as massas depositada em grama (g). Observa-se que, independentemente das variações de corrente e tensão nos passes de raiz, enchimento e acabamento a quantidade de material depositado variou de 55 a 69 gramas (em 200 mm).

Tabela 4. Massa depositada em grama

CP	Raiz		PEench1		PEench2		Reforço/Raiz		Massa (g)		Dif. (g)
	U	I	U	I	U	I	U	I	Antes	Depois	
1	19	145	22	240	-	-	17,2	144	2979	3044	65
2	19	145	22	244	-	-	17,2	144	2964	3019	55
3	18,8	160	22	232	-	-	-	-	2976	3045	69
4	18,8	160	19,6	180	22	172	-	-	2938	3007	69

Simbologia: CP = Corpo de prova; PEench = Passe de enchimento; Dif. = diferença. U = Tensão em Volts; I = Corrente em Ampères.

Nessas condições a taxa de deposição (calculada em função da densidade do material do arame) obtida se encontra dentro dos valores estabelecidos pelo fabricante do arame, que é de 0,95 Kg/h a 2,35 Kg/h, sendo que a maior taxa obtida neste trabalho foi de 1,6046 Kg/h. Taxa de deposição é sinônimo de velocidade de alimentação do arame e é função da corrente aplicada.

Microestrutura resultante

A microscopia ótica foi empregada para a análise qualitativa da microestrutura da ZF, ZTA e MB e a classificação dos microconstituintes seguiu o sistema adotado pelo IIW (Instituto Internacional de Soldagem). As Figuras 7 e 8 exibem o

comportamento microestrutural do MB, ZF e ZTA respectivamente. Pode-se observar que a microestrutura do MB exibiu basicamente uma matriz de ferrita (em branco) com veios de perlita (tom escuro). A ferrita é a solução sólida de carbono em ferro alfa e origina-se na zona crítica, durante o resfriamento, por transformação alotrópica do ferro gama durante a laminação. Essa é sua forma estável à temperatura ambiente. A perlita é formada por finas lamelas justapostas de ferrita e cementita mais ou menos paralelas.

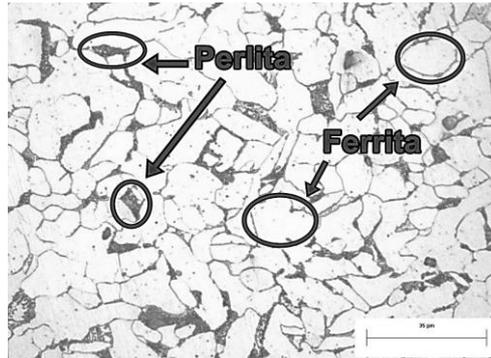


Figura 7 – Microestrutura do MB.

Na figura 8, temos a microestrutura do ZF e da ZTA. A ZF se constitui basicamente de ferrita primária (PF), perlita (P), ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)) e ferrita acicular (AF). A ZTA apresenta ferrita de contorno de grão PF(G) e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)) em termos de classificação IIV e presentes em todos os corpos ensaiados.

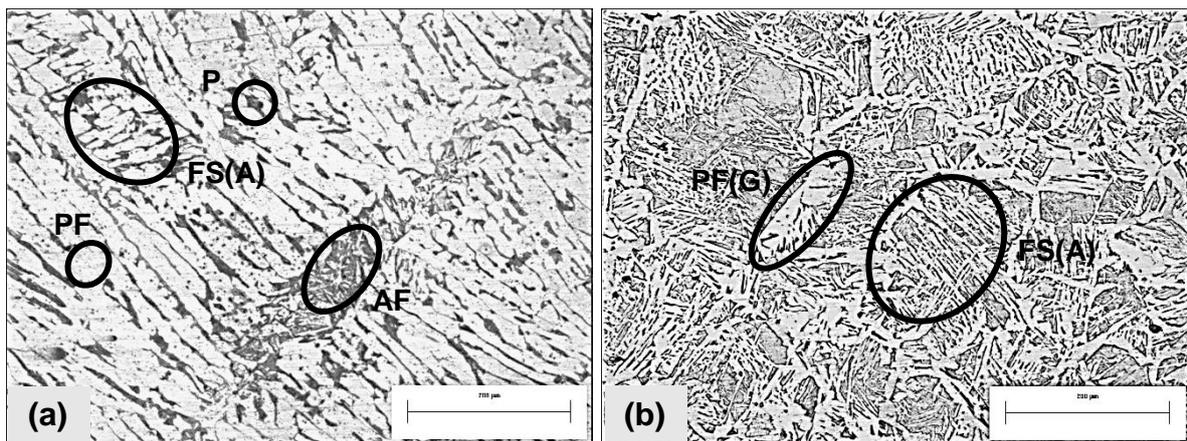


Figura 8 – Microconstituintes. (a) ZF. (b) ZTA.

A ferrita se encontra em grãos claros e a perlita em forma lamelar e em grãos escuros tanto na ZF, ZTA e MB, existindo em tamanhos de grão diferentes. A presença de apenas ferrita e perlita pode ser justificada pelo fato do aço ter sido

resfriado lentamente, fator de formação desses microconstituintes ^(6,7). A presença da AF na ZF está relacionada a presença de elementos de liga formador e estabilizador deste microconstituente, como o Mn, oriundo da composição química do arame eletrodo. A AF constitui-se como microconstituente mais desejável para prevenir trincas devido ao fato de que os finos grãos da AF e os contornos de alto ângulo favorecem uma boa resistência.

A elevação na energia de soldagem decorrente dos passes subsequentes ao de raiz promoveram aumento de PF(G). Com a elevação da temperatura mantida praticamente constante a energia de soldagem elevou o percentual de PF(G), havendo em ambos os casos a ocorrência da redução no percentual de AF, por isso não são verificadas nas microestruturas da ZTA apresentadas, sendo isto uma consequência da redução da taxa de resfriamento da ZF com a elevação dos parâmetros citados, onde as taxas lentas de resfriamento induzem a difusão do carbono que promove a nucleação de ferrita primária nos contornos dos grãos gerando PF(G)⁽⁷⁾.

Microdureza

A Figura 9 mostra a tendência do comportamento da microdureza nas diferentes regiões do chanfro “V”. Esta tendência mostra que a dureza da ZF foi maior do que a dureza nas demais regiões.

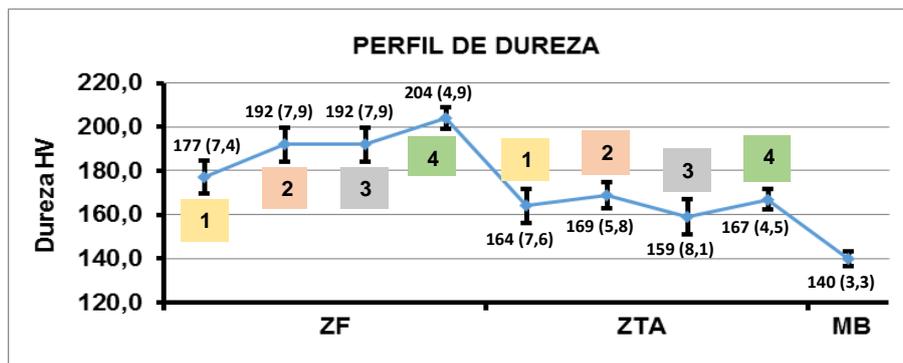


Figura 9. Perfil de microdureza dos CP's 1, 2, 3 e 4.

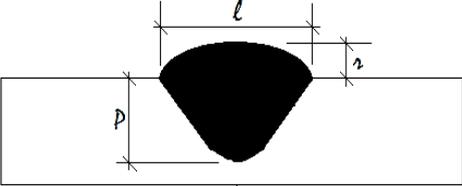
Da análise individual de cada CP (Tabela 3) verifica-se que com as energias de soldagem empregadas e número de passes houve um refinamento de um passe pelo subsequente, proporcionando uma taxa de resfriamento baixa e, com isto levando ao aumento da dureza e aumento na resistência mecânica da junta, o que é desejável nos aços A36, cujo principal objetivo é possuir alta resistência aliada a boa

tenacidade. Com o aumento da energia de soldagem e a consequente diminuição da taxa de resfriamento, há a tendência da formação de uma ZTA maior, porém apresenta microconstituintes de menor dureza⁽⁷⁾. Em aços de baixo carbono, comprovam-se a redução da dureza com o aumento dessa energia. Desta análise conclui-se que é primordial o controle do aporte térmico na soldagem multipasse.

Geometria do cordão de solda

As medidas do cordão de solda das amostras são mostradas na Tabela 5 e na Figura 13 e foram feitas utilizando o software Image J, a partir da macrografia das mesmas.

Tabela 5. Geometria do cordão de solda



CP	l (mm)	h (mm)	Z_{TA} (mm)
CP1	16,20	2,32	2,44 – 3,60
CP2	14,05	1,22	2,30 – 4,20
CP3	13,00	0,93	3,70
CP4	14,41	1,84	3,71

Observa-se que houve uma formação irregular no cordão de acabamento, possivelmente decorrente dos ajustes na mecanização do sistema de soldagem, mostrando que estes devem ser feitos com maior rigor. Não foram observadas descontinuidades.

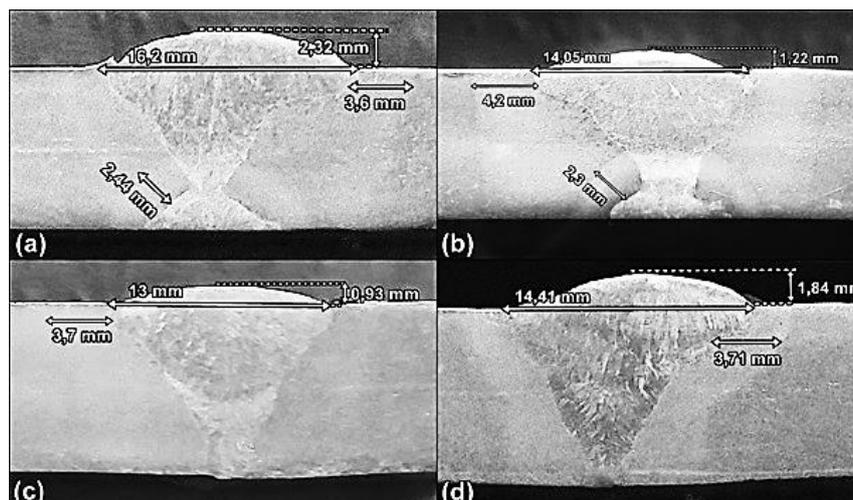


Figura 13. Perfil de geométrico. (a) CP1; (b) CP2; (c) CP3; (d) CP4

Os cordões de solda visualizados longitudinalmente para a observação de defeitos superficiais apresentaram uma sanidade satisfatória, com poucos respingos.

Tendo analisado a geometria das amostras, são observadas consideráveis diferenças nas dimensões dos cordões de solda, sendo que de acordo com o aumento da corrente a largura, a penetração e o reforço da solda aumentaram gradativamente.

Quanto à geometria do cordão de solda a altura decresceu à medida que a tensão, a corrente e a velocidade de soldagem cresceram. A largura também diminuiu com o aumento dos parâmetros de soldagem. No entanto, sua relação com a variação de tensão é parabólica. A penetração se mostrou adequada para as condições de soldagem impostas. A largura da ZTA aumentou à proporção que a corrente e tensão aumentaram⁽⁸⁾.

CONCLUSÕES

O processo de soldagem Innershilded apresentou um comportamento estável, gerando soldas com acabamento superficial e penetração satisfatória. Para a penetração, os resultados individuais foram satisfatórios. A zona fundida apresentou maior perfil de dureza, sendo isto atribuído a sua maior taxa de resfriamento e ao seu maior percentual de AF, cuja ocorrência se deu em função da sua menor energia de soldagem. Em todos os cordões de solda, houve refinamento na microestrutura da zona fundida.

Quanto à geometria do cordão de solda a altura decresceu à medida que a tensão, a corrente e a velocidade de soldagem cresceram. A largura também diminuiu com o aumento dos parâmetros de soldagem. No entanto, sua relação com a variação de tensão é parabólica. A largura da ZTA aumentou à proporção que a corrente e tensão aumentaram.

AGRADECIMENTOS

Ao IFMA, Campus Monte Castelo pelo financiamento desta pesquisa, ao LabSolda/DMM pela realização das soldas e ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

1. FEDELE, R. **Soldagem de tubulações: metalurgia, procedimentos e desafios.** Metalurgia & Materiais, v.58, n.52. 2002.

2. MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. UFMG. Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais. Belo Horizonte. 2012. Disponível em <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>, acessado em 07/08/2016.
3. BRACARENSE, A. Q., MODONESI, P. J., MARQUES, P. V. **Soldagem – Fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362 p.
4. JOAQUIM, R. **Processo de soldagem por arame tubular**. Disponível em www.infosolda.com.br, acessado em 06/2015.
5. MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre. Editado pelo autor, 1996.
6. ARAÚJO, M. R. V. et al. **Microstructural analysis of submerged-arc weldment in low-carbon steel by scanning electron microscopy**. Brazilian Journal of Morphological Sciences, Campinas, v. 22, n. (Suppl.), p. 355-356, 2005.
7. Bubnoff, D. V., Ventrela, V. A. **Efeito da tensão do arco elétrico em soldagem por arame tubular com eletrodo aws e-81t1-ni1 na microestrutura do metal de solda**. Cbecimat. 2002.
8. MYERS, Tom. **Innershield Wire FCAW-S Welding Guide**. Disponível em <http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableFlux-CoredWires/Self-Shielded-Innershield-InnershieldNR-5/c32400.pdf>, acessado em 21/02/2016.

INFLUENCE OF PARAMETERS OF WELDING PROCESS INNERSHIELD THE CHARACTERISTICS OF WELD STRUCTURAL STEEL ASTM A – A36

ABSTRACT

This study evaluates the influence of the parameters of Innershield welding process, also known as Flux Cored Arc Welding - Self Shielded / FCAW-SS, in characteristics of steel welding ASTM A-36. Are varied voltage and current parameters of the arc and the welding speed in order to detect their influence on the width of the penetration bead strengthening and hardness of the weld metal. The geometric measurements of the weld beads are held in macrographs obtained from the cross section of the weld by means of an optical microscope as well as the analysis of microstructure. Hardness measurements are carried out using a microhardness in the cross section of the strands. The deposition rate is determined by weighing of the samples before and after welding. With this study we can say what better morphology of the weld bead.

Key Words: fcaw-ss, weld bead geometry, hardness, deposition rate.