

EFEITOS DA ENERGIA DE SOLDAGEM SOBRE A MICROESTRUTURA DO METAL DE SOLDA DEPOSITADO POR ARCO SUBMERSO

Alexandre Augusto Cesario Asselli

UNESP – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
MAPROTEC - Departamento de Engenharia Mecânica
Avenida Brasil Centro, 56 – Caixa Postal 31 – CEP 15385-000 – Ilha Solteira/SP
aacasselli@aluno.feis.unesp.br

Juno Gallego

gallego@dem.feis.unesp.br

Resumo: *No presente trabalho foi realizado um estudo sobre a influência da energia de soldagem sobre a microestrutura do metal de solda depositado sob diferentes condições de processamento. A soldagem por arco submerso foi realizada sobre chapas de aço estrutural, utilizando-se dois níveis de energia (1 e 3 kJ/mm) e um fluxo ativo comercial. A observação de amostras preparadas em três planos ortogonais distintos, correspondentes às seções transversal, longitudinal e normal em relação a direção de soldagem, permitiu identificar as morfologias de ferrita presentes no metal de solda, classificadas como ferrita primária de contorno de grão – PF(G), ferrita poligonal intragranular – PF(I), ferrita acicular – AF e ferrita com fase secundária alinhada – FS(A). Empregando-se microscopia ótica e técnicas de metalografia quantitativa, constatou-se que as frações volumétricas dos microconstituintes variaram de acordo com o insumo de calor. Para relacionar o efeito da morfologia da ferrita no seu endurecimento, avaliou-se individualmente a dureza da ferrita primária de contorno de grão e da ferrita acicular. A presença de inclusões no metal de solda foi analisada e houve indícios que estas partículas tenham alguma interferência sobre a nucleação da ferrita acicular do metal de solda.*

Palavras-chave: *Soldagem por Arco Submerso, Energia de soldagem, Ferrita, Metalografia Quantitativa, Inclusões.*

1. INTRODUÇÃO

A soldagem por arco submerso é extensivamente empregada na fabricação de peças e perfis estruturais constituídos em aço, sendo uma técnica que alia a automação do processo com produtividade e qualidade. As propriedades mecânicas do metal de solda depositado pelo processo de arco submerso são afetadas pela microestrutura formada nessa região. Os efeitos resultantes da diluição química e dos ciclos térmicos tornam as transformações de fase na zona fundida um tanto complexas, promovendo a nucleação de ferrita com diversas morfologias. A ferrita acicular pode ser considerada um microconstituente bastante desejável no metal de solda, considerando os seus níveis de resistência mecânica e tenacidade. A formação da ferrita acicular sofre efeito das inclusões, as quais são consideradas sítios para nucleação para este microconstituente. De acordo com Wainer et al (1992), para melhorar as propriedades mecânicas, a quantidade de ferrita acicular deve estar na faixa de 65 a 80%.

No presente trabalho realizou-se um estudo sobre o efeito da energia de soldagem nas variações microestruturais do metal de solda. Pela técnica de metalografia quantitativa obteve-se a fração volumétrica das morfologias de ferrita presentes no metal de solda. Com a análise das inclusões foi possível relacionar o seu tamanho médio com a nucleação da ferrita acicular. Medidas de microdureza Vickers comprovaram o efeito da morfologia de ferrita no seu endurecimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Processo de Soldagem

O metal base usado nos ensaios foi o aço estrutural tipo ASTM A36, e este foi dividido em dois lotes, nos quais realizou-se a têmpera em água após a austenitização em 950 ou 1100°C por uma hora. O arame sólido cobreado usado na soldagem é do tipo AWS E70-S6, cuja bitola usada foi de 1,2 milímetros. Em cada ensaio foi depositado um cordão de solda por arco submerso (SAS) sobre a superfície da chapa (*bead on plate*), sendo empregada uma determinada energia de soldagem - 1,0 ou 3,0kJ/mm. Um código foi usado para identificar o metal base (09 ou 11) e a energia (10 ou 30) usados na soldagem, separados pelas letras AL. Deste modo a amostra 09AL10 corresponderia à soldagem da chapa tratada a 950°C com um aporte térmico de 1,0kJ/mm. Para a proteção da poça de fusão foi empregado um fluxo granulado ativo, conforme especificação AWS F7AZ-EM12K. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal do metal base e do arame sólido usados no trabalho.

Tabela 1: Composição química nominal do metal base e do arame (% peso)

Material	C (máx.)	Mn	Si	P (máx.)	S (máx.)	Cu (máx.)
Metal base	0,25	0,8-1,2	0,15-0,40	0,04	0,05	0,20
Arame sólido	0,15	1,4-1,8	0,80-1,15	0,02	0,03	0,50

2.2. Preparação Metalográfica

Pequenos pedaços foram cortados com disco abrasivo refrigerado nas seções longitudinal (L), normal (N) e transversal (T) dos cordões, conforme nomenclatura indicada por Liu (1992). O diagrama ilustrativo da geometria do cordão de solda e das seções cortadas (transversal, longitudinal e normal) de cada amostra é demonstrado pela Figura 1. A preparação metalográfica das superfícies foi realizada da maneira convencional, com o lixamento até a grana #1200 seguido de polimento mecânico com alumina 1µm. A observação e a documentação das inclusões não metálicas foram feitas com as amostras na condição polida. Para a revelação da microestrutura realizou-se um ataque químico na superfície polida, feito com a combinação do uso de nital 2% com o reativo de Marshall (5ml ácido sulfúrico, 8g ácido oxálico, 10ml peróxido de hidrogênio, 100ml água destilada). Para ativar a superfície das amostras, estas foram atacadas entre 2 a 3 segundos no nital e então transferidas diretamente para o reativo de Marshall. Este procedimento foi utilizado para melhorar a revelação da microestrutura de solda, especialmente nas interfaces ferrita-ferrita que normalmente apresentam menor visibilidade (Vander Voort, 1984).

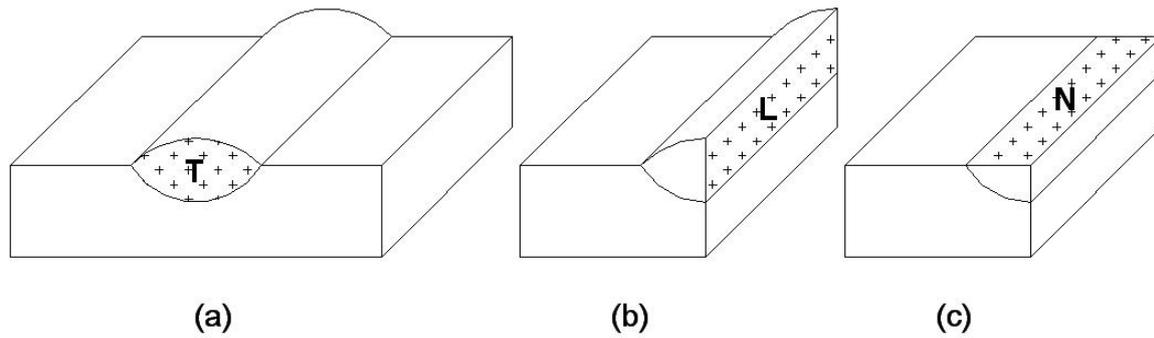


Figura 1: Diagrama ilustrativo das seções cortadas de cada cordão de solda; (a) Transversal, (b) Longitudinal, (c) Normal.

2.3. Análise das Inclusões

A caracterização quantitativa da dispersão de inclusões foi desenvolvida através da observação e documentação de micrografias óticas tiradas com auxílio de uma câmera digital de alta resolução acoplada a um estereomicroscópio. As micrografias digitais foram capturadas em 25 campos contíguos de maneira ordenada e sistemática, visando o mapeamento de uma área de amostragem bastante representativa com a presença das inclusões não-metálicas existentes no metal de solda em cada um dos cordões produzidos. As imagens foram coletas no formato JPEG com resolução 314 ppi e processadas em editor gráfico para binarização, como demonstra a Figura 2.a. Este formato e resolução foram escolhidos como padrões, pois apresentam uma boa relação entre tamanho de arquivo e qualidade de imagem. Verificou-se o tamanho e a resolução da imagem através da escala tirada na série de micrografias, e com isso determinou-se o aumento real. Posteriormente a imagem com as inclusões foi convertida para tons de cinza (Figura 2.b). Em seguida um melhor contraste foi ajustado para a micrografia visando uma melhor identificação das inclusões (Figura 2.c). Finalmente eliminou-se a matriz metálica da imagem, restando somente as inclusões não-metálicas, como apresenta a Figura 2.d. A seqüência do processo de tratamento de imagens para o estudo das inclusões do cordão de solda é demonstrada pela Figura 2.

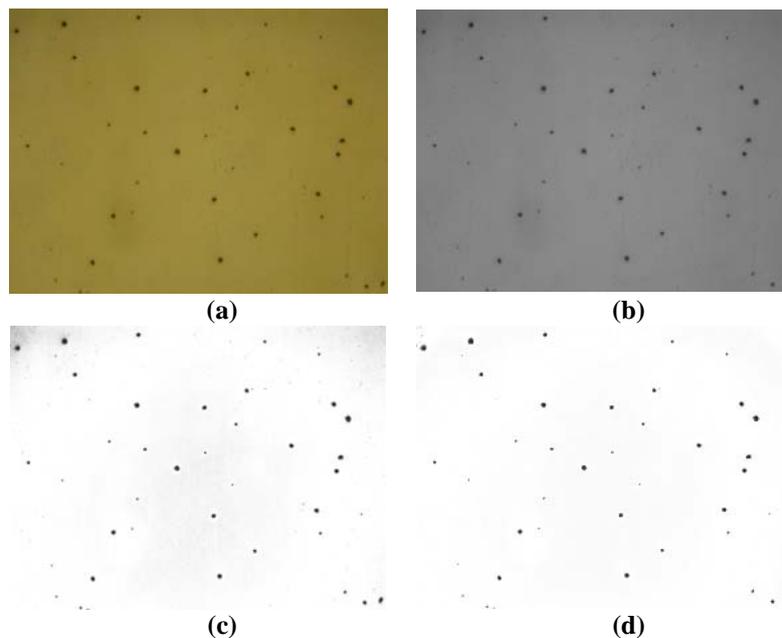


Figura 2: Seqüência do procedimento de tratamento das micrografias digitais para estudo das inclusões não-metálicas. (a) imagem original; (b) conversão da imagem para tons de cinza; (c) imagem com contraste de fundo (matriz); (d) eliminação do contraste da matriz metálica na imagem.

Após as imagens serem tratadas digitalmente determinou-se os aspectos quantitativos relativos ao tamanho e a quantidade de inclusões observadas com auxílio do *freeware Image Tool*. Os resultados obtidos foram processados estatisticamente com o auxílio de uma planilha eletrônica. Foi analisado um número de inclusões superior a 1000 para cada amostra, sendo contados 2700 pontos para avaliar sua fração volumétrica, em cada condição de soldagem.

2.4. Metalografia Quantitativa

Utilizando-se das amostras que foram previamente atacadas quimicamente, desenvolveu-se a análise microestrutural do metal de solda através da observação e documentação de micrografias óticas tiradas com auxílio de um estereomicroscópio dotado de câmera digital com alta resolução. As micrografias digitais foram capturadas em 16 campos contíguos, com o objetivo de se obter uma área de amostragem bastante representativa dos microconstituintes existentes no metal de solda em cada um dos cordões produzidos. As imagens foram coletadas no formato e resolução definidos como padrão.

Após todas as imagens serem processadas, definiu-se os tipos de microconstituintes que seriam analisados pela técnica de contagem de pontos. As morfologias da ferrita de maior interesse para o presente estudo, encontradas no metal de solda e que foram analisadas para caracterização das frações volumétricas foram: ferrita poligonal de contorno de grão – PF(G) (Figura 3.a); ferrita poligonal intragranular – PF(I) (Figura 3.b); ferrita com segunda fase alinhada (Widmanstätten) – FS(A) (Figura 3.c) e ferrita acicular – AF (Figura 3.d). A classificação deste microconstituintes do metal de solda, vem sendo tentado pelo International Institute of Welding (Dolby, 1986; Duncan, 1986). A Figura 3 apresenta os microconstituintes encontrados no metal de solda e que foram analisados para obtenção das frações volumétricas de cada fase.

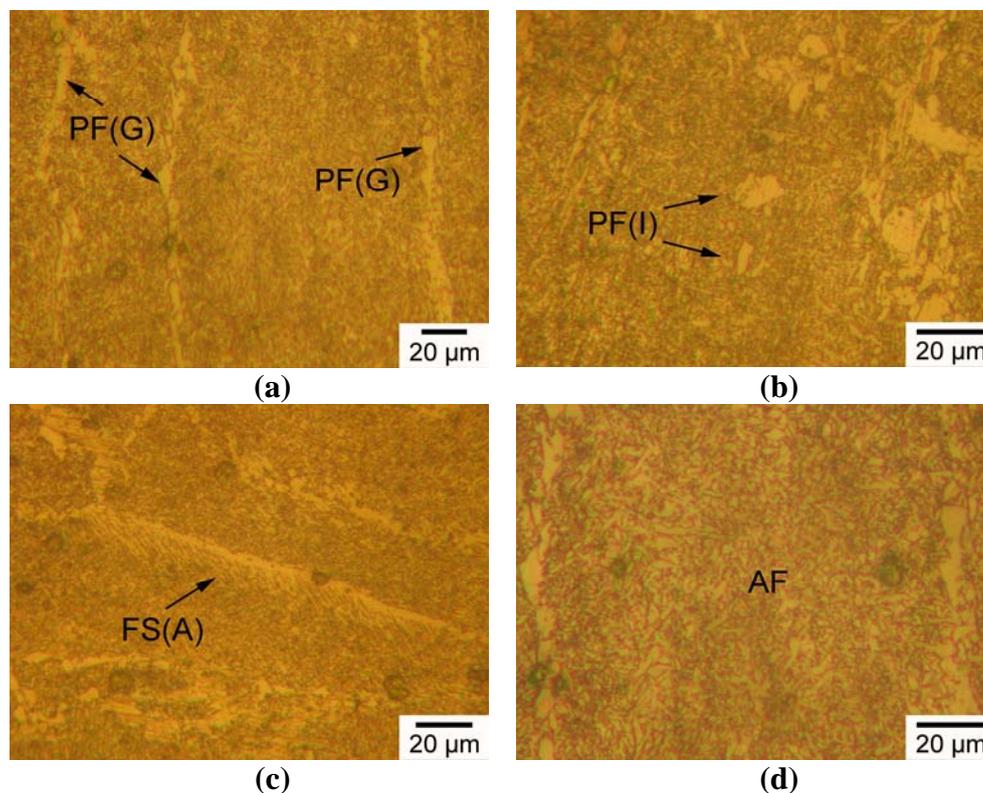


Figura 3: Morfologias de ferrita encontradas no metal de solda da amostra 11-AL-10. (a) Ferrita Primária de Contorno de Grão; (b) Ferrita Poligonal Intragranular; (c) Ferrita com Secunda Fase Alinhada; (d) Ferrita Acicular.

A obtenção da fração volumétrica dos constituintes identificados foi feita através da técnica de contagem de pontos, normalizada pela ASTM E562. Este procedimento foi realizado com auxílio do *freeware Image J*. Os resultados obtidos foram processados estatisticamente com o auxílio de uma planilha eletrônica. Foi analisado um número de pontos superior a 1500 para cada seção de corte, sendo contados 4752 pontos para avaliar a fração volumétrica dos microconstituintes encontrados em cada condição de soldagem. No total foram contados 19008 pontos para os quatro ensaios de soldagem.

2.3. Microdureza Vickers

Para relacionar o efeito da morfologia da ferrita no seu endurecimento, ou seja, se a ferrita poligonal formada nos antigos contornos de grão da austenita apresenta dureza semelhante à encontrada em um grão ferrítico com morfologia acicular avaliou-se a dureza destes dois microconstituintes individualmente. As medidas de microdureza Vickers seguiram a norma ASTM E384 e foram realizadas com a aplicação de uma carga de 10g. Foram realizadas 10 medidas para cada microconstituente em cada uma das amostras da seção transversal do cordão de solda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise das Inclusões

A observação de uma área polida com aproximadamente $1,8\text{mm}^2$ na região central da zona fundida dos cordões de solda permitiu a identificação e caracterização da dispersão de inclusões com morfologia globular, como mostra a Figura 4.

A classificação dos tamanhos das inclusões encontradas no metal de solda das diferentes amostras preparadas para microscopia ótica é apresentada graficamente nos histogramas da Figura 5. Essas curvas indicam que a variação dos tamanhos das inclusões pode ser interpretada como uma distribuição do tipo “log-normal”, confirmada pela análise estatística dessas curvas que revelou nas mesmas um coeficiente de assimetria positiva, que variou entre 0,4 a 13,0. O grau de curtose ou de achatamento das distribuições variou entre 3,2 a 9,0 – valores típicos para distribuições leptocúrticas, onde a frequência modal é bastante pronunciada (Costa Neto, 2002).

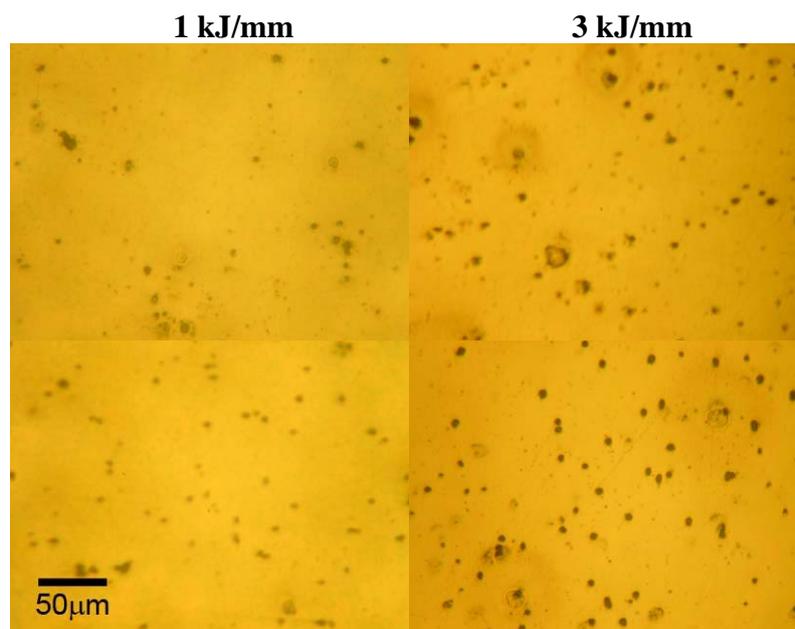


Figura 4: Exemplos típicos da dispersão de inclusões observadas no metal de solda depositado sob diferentes energias de soldagem (1 e 3kJ/mm). Sem ataque químico. Aumento padrão.

O efeito das inclusões não metálicas sobre a estrutura austenítica pode ser considerado ainda controverso. Bhadeshia e Svensson (1993) indicaram que essas partículas seriam incapazes de atuar no ancoramento dos contornos de grão da austenita e nos grãos formados a partir da ferrita delta ou diretamente do aço líquido. Investigando soldas produzidas por arco submerso, Basu e Raman (2002) verificaram que as inclusões poderiam afetar tanto a estrutura austenítica quanto a formação da ferrita acicular.

A Tabela 2 apresenta alguns importantes parâmetros estatísticos extraídos das distribuições de frequência mostradas na Figura 5, especialmente o número de partículas observadas N , o seu tamanho médio \bar{d} , as densidades de inclusões planar N_A e volumétrica N_V e a fração volumétrica V_V .

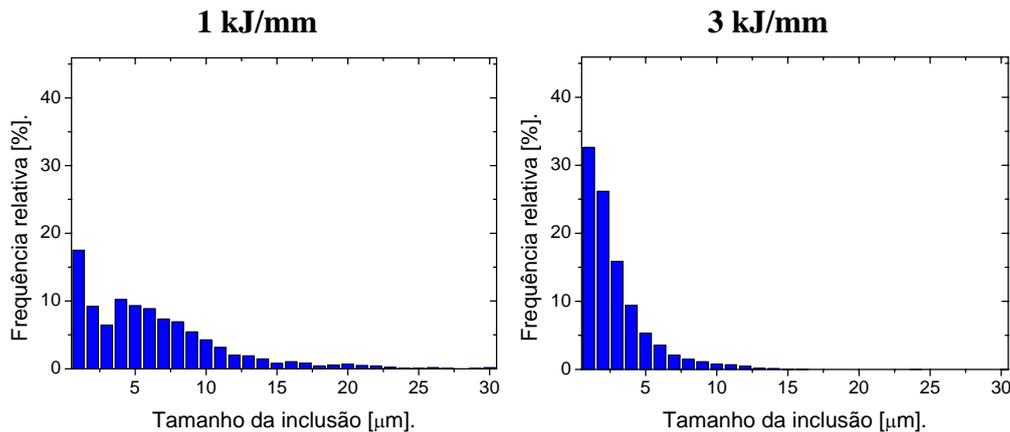


Figura 5: Distribuição de frequência dos tamanhos das inclusões existentes no metal de solda depositado sob diferentes energias de soldagem (1 e 3kJ/mm).

Tabela 2: Parâmetros estatísticos da dispersão de inclusões encontradas nas seções longitudinal, normal e transversal analisadas do metal de solda.

amostra	N	\bar{d} [μm]	N_A [mm^{-2}]	N_V [mm^{-3}]	V_V
09AL10	10966	11,0	1741	532229	0,0097
09AL30	12495	6,1	1983	837435	0,0058
11AL10	6119	7,0	971	399596	0,0030
11AL30	9034	11,0	1434	468586	0,0070

A análise dos resultados mostra que o efeito dos parâmetros de soldagem sobre as inclusões é complexo. Verifica-se pela Tabela 2 que o aumento de energia contribuiu para diminuir tanto o tamanho quanto a fração volumétrica das partículas formadas durante a soldagem das chapas tratadas termicamente a 950°C/1h, mas um efeito contrário foi observado nas amostras feitas das chapas 11AL10 e 11AL30.

3.2. Fração Volumétrica dos Microconstituintes Encontrados no Metal de Solda

A observação e documentação das 16 imagens de cada uma das três seções das amostras da zona fundida dos cordões de solda possibilitou a identificação das fases presentes no metal de solda e a estimação das frações volumétricas dos microconstituintes pelo método de contagem de pontos (ASTM E562).

Uma análise estatística dos dados permitiu a determinação do percentual de fração volumétrica ($\% V_v$) das fases em estudo, assim como a obtenção de indicadores quantitativos sobre as mesmas, como desvio padrão (s), coeficiente de variação (CV), limite de confiança de 95% ($95\% CL$) e o percentual de erro relativo ($\% RA$) (Vander Voort, 1984).

Estes resultados obtidos da análise estatística da contagem de pontos para cada microconstituente estão dispostos nas Tabelas 3 e 4. A representação gráfica das frações volumétricas das diversas morfologias de ferrita presentes na zona fundida do metal de solda pode ser vista na Figura 5.

Tabela 3: Resultados da análise estatística referente as amostras do metal de base tratado termicamente a 950°C/1h

	09-AL-10				09-AL-30			
	PF(G)	PF(I)	FS(A)	AF	PF(G)	PF(I)	FS(A)	AF
$(\% V_v)$	15,47	1,70	0,61	76,94	18,39	4,36	0,27	72,77
(s)	4,56	1,68	0,88	4,69	7,68	2,51	0,68	8,93
(CV)	0,29	0,99	1,44	0,06	0,42	0,58	2,50	0,12
$(95\% CL)$	1,34	0,49	0,26	1,38	2,26	0,74	0,20	2,62
$(\% RA)$	8,65	28,99	42,25	1,79	12,27	16,93	73,33	3,60

Tabela 4: Resultados da análise estatística referente as amostras do metal de base tratado termicamente a 1100°C/1h

	11-AL-10				11-AL-30			
	PF(G)	PF(I)	FS(A)	AF	PF(G)	PF(I)	FS(A)	AF
$(\% V_v)$	16,27	1,66	0,40	78,41	28,30	2,67	0,39	64,35
(s)	4,59	1,22	0,80	5,76	7,63	1,41	0,87	6,95
(CV)	0,28	0,74	2,00	0,07	0,27	0,53	2,31	0,11
$(95\% CL)$	1,35	0,36	0,24	1,69	2,24	0,41	0,26	2,04
$(\% RA)$	8,28	21,62	58,78	2,16	7,92	15,45	67,84	3,17

Verificou-se pelos dados que a ferrita acicular é predominante em todas as amostras. Também pode se observar que com o aumento do insumo de calor de 1,0 para 3,0 kJ/mm ocorreu um acréscimo da fração volumétrica para as ferritas de morfologia primária de contorno de grão e poligonal intragranular. Entretanto, a ferrita com segunda fase alinhada e a de morfologia acicular apresentaram um decréscimo na sua fração volumétrica com aumento da energia de soldagem. Este comportamento por ser explicado com os resultados obtidos do estudo da distribuição de inclusões no metal de solda, com os quais se verificou que o acréscimo da energia de soldagem promoveu um aumento no número de inclusões formadas na poça de fusão, embora as mesmas tenham sofrido uma redução em seu tamanho médio. De acordo com o trabalho de Lee et al (2000), o tamanho das inclusões tem um efeito significativo na nucleação da ferrita. Seus resultados experimentais mostram que as inclusões maiores são locais preferenciais para a nucleação da ferrita acicular, tendo por resultado a transição da classificação das inclusões de não-nucleante para nucleante com o tamanho crescente das inclusões.

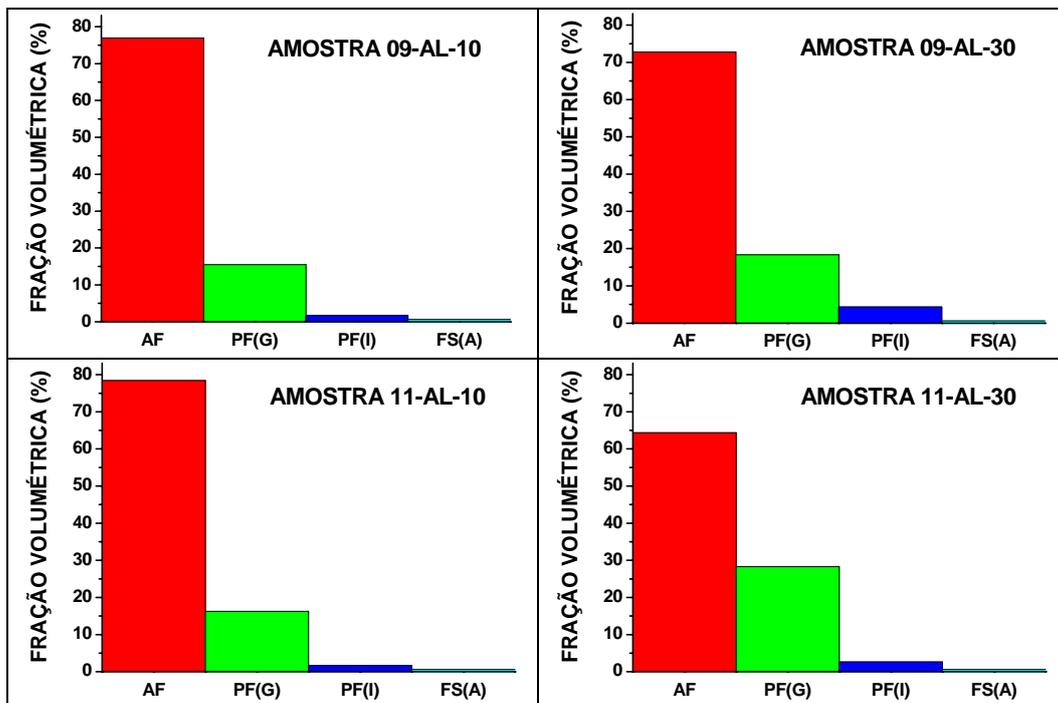


Figura 5: Fração volumétrica das morfologias de ferrita, analisadas no metal de solda de cada amostra.

3.3. Microdureza Vickers

O metal de solda além de ser uma região crítica no ponto de vista mecânico, apresenta uma microestrutura complexa. Por esses motivos avaliou-se a dureza de dois microconstituintes individualmente, com o objetivo de relacionar o efeito da morfologia da ferrita no seu endurecimento. Uma análise estatística dos resultados permitiu a determinação da microdureza Vickers média (\overline{HV}) para cada um dos dois microconstituintes analisados individualmente e o seu correspondente desvio padrão (DEP) em cada uma das 4 amostras. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 5 e sua representação gráfica é apresentada pela Figura 6.

Tabela 5: Microdureza Vickers média e Desvio Padrão relativos as morfologias de ferrita poligonal de contorno de grão e acicular para cada uma das amostras.

AMOSTRA	PF(G)		AF	
	\overline{HV}	DEP	\overline{HV}	DEP
09-AL-10 (T)	248,9	22,8	327,5	29,1
09-AL-30 (T)	237,4	17,5	342,5	33,5
11-AL-10 (T)	271,8	18,0	357,9	9,4
11-AL-30 (T)	270,6	18,6	340,8	16,2

Com os resultados obtidos pode-se relacionar o efeito da morfologia da ferrita no seu endurecimento. A ferrita poligonal formada nos antigos contornos de grão da austenita não possui dureza semelhante à encontrada em um grão ferrítico com morfologia acicular. Em todas as amostras avaliadas a Ferrita Acicular apresentou um valor de dureza média superior entre 25 e 45% em relação à Ferrita Primária de Contorno de Grão. Este comportamento se deve ao fato que a ferrita acicular resulta de uma transformação ocorrida em temperaturas mais baixas, onde o processo não é puramente difusional, mas proporciona um aumento na densidade de discordâncias existente na matriz – principal responsável pela maior dureza encontrada para a ferrita acicular.

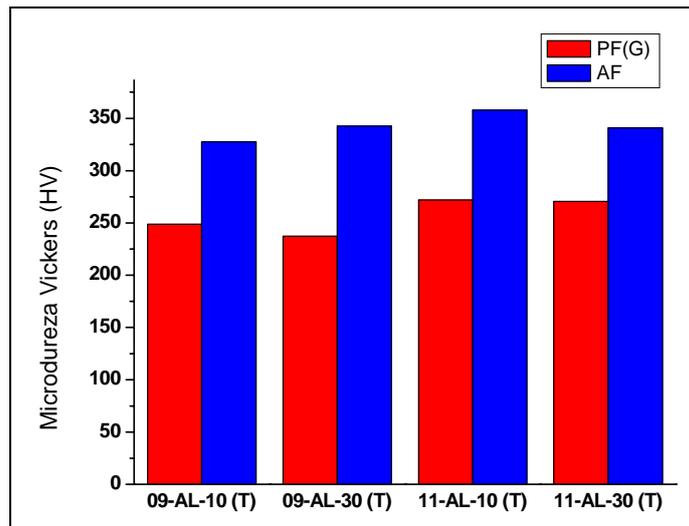


Figura 6: Média dos valores de microdureza Vickers para as duas morfologias de ferrita analisadas (Ferrita Primária de contorno de Grão – PF(G) e Ferrita Acicular – AF) em cada amostra.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos do estudo das inclusões no metal de solda indicam que a distribuição de tamanhos das inclusões não metálicas possui um comportamento “log-normal”, que foi afetado pelo ciclo térmico imposto pelo processo de soldagem por arco submerso. Constatou-se também que o incremento da energia de soldagem de 1,0 para 3,0 kJ/mm resultou no aumento da quantidade de inclusões formadas no metal de solda, embora as mesmas tenham sofrido uma redução em seu tamanho médio. Este resultado é esperado se consideramos que com o aumento da temperatura pode haver maior dissolução dos óxidos no metal fundido. É importante ressaltar que a visualização das inclusões restringiu-se a limitação técnica do microscópio óptico, sendo observadas assim, inclusões maiores que 0,5 μm .

A análise da fração volumétrica apresentou resultados que mostram que a energia de soldagem colaborou com o acréscimo da fração volumétrica para as ferritas de morfologia primária de contorno de grão e poligonal intragranular. Entretanto, a ferrita com segunda fase alinhada e a de morfologia acicular apresentaram um decréscimo na sua fração volumétrica com aumento da energia de soldagem. Este comportamento é relacionado com as variações no tamanho médio das inclusões, devido ao incremento do insumo de calor.

As medidas de microdureza confirmaram que há variações significativas no comportamento mecânico das diferentes morfologias da ferrita que foram observadas. A ferrita com morfologia acicular apresentou valores de dureza média superiores entre 25 e 45% em relação à ferrita de contorno de grão.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico prestado pela SERVTEC Serviços Técnicos e à FAPESP pela concessão de auxílio à pesquisa e de uma bolsa de estudos (AACA).

4. REFERÊNCIAS

Basu, B.; Raman, R., 2002, “Microstructural variations in a high-strength structural steel weld under isoheat input conditions”, *Welding Journal*, pp. 239-248, Nov.

- Bhadeshia, H. K. D. H.; Svensson, L.-E., 1993, "Modelling the evolution of microstructure in steel weld metal", In: Cerjak, H; Easterling, K. E. "Mathematical Modelling of Weld Phenomena", Institute of Metals, London, pp. 109-182.
- Costa Neto, P. L. O., 2002, "Estatística". Ed. Edgard Blucher, São Paulo.
- Dolby, R. E., 1986, "Guidelines for Classification of Ferritic Steel Weld Metal Microstructural Constituents Using the Light Microscope", *Welding in the World*, Vol. 24, No. 7-8, pp. 144-148.
- Duncan, A., 1986, "Classification of Ferrite Steel Weld Metal Microstructural", Results of 4th International Collaborative Exercise, IIW Doc. IIX J-110-86.
- Image Tool, Freeware disponível para download em: <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>.
- Image J, Freeware disponível para download em: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>.
- Lee, T.; Kim, H.J.; Kang B.Y.; Hwang, S.K., 2000, "Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds", *ISI International*, Vol. 40, No.12, pp. 1260-1268.
- Liu, S., 1992, "Metallography of HSLA steel weldments", *Key Engineering Materials*, Vol. 69-70, pp. 1-20.
- Vander Voort, G. F., 1984, "Metallography – Principles and Practice", McGraw-Hill Book Co, New York.
- Wainer, E., Brandi, S. D., Mello, F. D. H., 1992, "Soldagem: Processos e Metalurgia", Edgard Blücher, São Paulo.

EFFECT OF HEAT INPUT ON THE MICROSTRUCTURE OF THE WELD METAL DEPOSITED BY SUBMERGED ARC WELDING

Alexandre Augusto Cesario Asselli

UNESP – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
MAPROTEC - Departamento de Engenharia Mecânica
Avenida Brasil Centro, 56 – Caixa Postal 31 – CEP 15385-000 – Ilha Solteira/SP
aacasselli@aluno.feis.unesp.br

Juno Gallego

gallego@dem.feis.unesp.br

Abstract: *In the present work has been doing a study on the influence of the heat input on the microstructure of the weld metal deposited by submerged arc welding (SAW). Bead on plate welding were carried out on some pieces of ASTM A36 structural steel grade where two levels of welding energy (1 and 3 kJ/mm) and a commercial active flux were applied. Metallographic specimens were machined from three main sections related to the welding direction, such as transversal, longitudinal and normal section. Metallographic analysis made by optical microscopy was able to identify several ferrite morphologies in the weld metal, which can be classified as grain boundary ferrite - PF (G), intragranular polygonal ferrite - PF (I), acicular ferrite - AF and ferrite with aligned second phase - FS (A). Using quantitative metallographic techniques, it was determined volume fractions of microconstituents have showed changing in accordance with heat input. The effect of the morphology of the ferrite on its hardness was evaluated by Vickers hardness measurements carried out on grain boundary ferrite and acicular ferrite. The presence of inclusions in the weld metal was analyzed and there are indications that these particles have some effect on the nucleation of the acicular ferrite observed in weld metal.*

Keywords: *Submerged Arc Welding, Heat Input, Ferrite, Quantitative Metallography, Inclusions.*