

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NA MICROESTRUTURA DE SOLDAS EM AÇO NAVAL EMPREGANDO A TÉCNICA FCAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO¹

Lino Alberto Soares Rodrigues²

Fábio Gonçalves da Silva³

Diogo José Rocha de Castro⁴

Everton Augusto Maciel Mendonça⁴

Eduardo de Magalhães Braga⁵

Resumo

O setor naval da mesma forma que outras indústrias continuam procurando aumentar a produtividade. Por isso, o estudo da técnica FCAW com adição de arame frio que apresenta grandes vantagens comparadas ao processo FCAW, que surge como uma alternativa de inovação tecnológica. Este trabalho objetiva avaliar a influência da energia de soldagem na microestrutura formada, empregando o processo FCAW com e sem adição de arame frio. As soldagens foram realizadas em chanfros "V" de chapas de aço baixo carbono estrutural, em posição plana pelo método semi-automático. Em todas as condições de soldagem o passe de raiz realizou-se utilizando arame eletrodo AWS E71T-1 de 1,2 mm, com velocidades de 8,5 m/min e proteção gasosa de CO₂ puro com vazão de 15 L/min. Os passes de enchimento foram efetuados com o mesmo arame eletrodo, porém com três níveis de velocidade de alimentação de arame (6 m/min, 8 m/min e 10 m/min) sem e com adição de arame frio da classe AWS ER70S-6 em dois procedimentos independentes, sendo o primeiro com diâmetro de 0,8 mm e o segundo com 1,0 mm. A relação entre as velocidades de alimentação do arame eletrodo e do arame frio foram as seguintes 6/2 m/min, 8/3 m/min e 10/4 m/min. O processo FCAW com adição do arame frio apresentou maiores quantidades de ferrita acircular ocasionada por maiores valores de energia de soldagem em relação ao processo convencional. As imagens revelam diversas morfologias de ferritas nas mais variadas formas, como: ferrita acircular e ferrita de windmännstatten.

Palavras-chave: FCAW com adição do arame frio; Energia de soldagem; Microestrutura.

INFLUENCE OF WELDING ENERGY IN MICROSTRUCTURE OF WELD IN STEEL NAVAL USING TECHNIQUE FCAW WITH ADDITION OF COLD WIRE

Abstract

The naval sector in the same way that other industries are still looking to increase productivity. Therefore, the study of technical FCAW wire with the addition of cold that has major advantages compared to FCAW process, that appears as alternative to technological innovation. This study evaluates the influence of heat input on microstructure formed, using the FCAW process with and without addition of cold wire. The welds were made in chamfers "V" of plates low carbon structural steel in flat position for semi-automated method. In all welding conditions the root pass was realized out using wire AWS E71T-1 electrode of 1.2 mm, with speed 8.5 m / min and gas protection of pure CO₂ with flow of 15 L / min. The filler passes were made with the same electrode wire, but with three speed of wire feed (6, 8 and 10 m / min) without and with addition of cold wire class AWS ER70S-6 in two independent procedures, the first of diameter of 0.8 mm and the second 1.0 mm. The relation between the speed of feeding of electrode wire and cold wire were 6/2, 8/3 and 10/4 m / min. The FCAW process with the addition of cold wire showed higher amounts of acircular ferrite caused by higher values of heat input compared to the conventional process. The images reveal different morphologies of ferrites in various forms, as acircular ferrite and windmännstatten ferrite.

Key words: FCAW wire with the addition of cold, Welding energy and Microstructure.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Químico. Doutorando, Universidade Federal do Pará. Belém Brasil.

³ Engenheiro Químico. Doutorando, Universidade Federal de Uberlândia.

⁴ Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará. Belém. Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico. Doutor, Universidade Federal do Pará. Belém. Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Falando-se em processos de soldagem, atualmente o que mais tem chamado a atenção das empresas e/ou dos setores que a utilizam de forma intensiva, corresponde basicamente a duas características que influenciam diretamente na escolha de tal processo, trata-se da produtividade e da qualidade. Visando fatores que elevam a produção dando qualidade ao produto final referindo-se aos processos de união ou revestimento de metais, enquadra-se muito bem a esse perfil a soldagem com arame tubular, mundialmente conhecida como FCAW (*Flux Cored Arc Welding* – Soldagem a arco com eletrodo tubular). Este processo que é similar em procedimento e concorrente direto do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding* – Soldagem a arco com proteção gasosa), também conhecido como MIG/MAG que é amplamente empregado nas indústrias, tem se apresentado como uma fonte riquíssima de estudo. Não obstante, o FCAW-AF ou processo arame tubular com adição de arame frio, surge como uma promissora alternativa de técnica de soldagem com uma larga empregabilidade industrial, principalmente em processos que necessitam de um elevado contingente produtivo, como a indústria de construção pesada como plataformas de petróleo, embarcações, dutos em geral, entre outros.⁽¹⁾

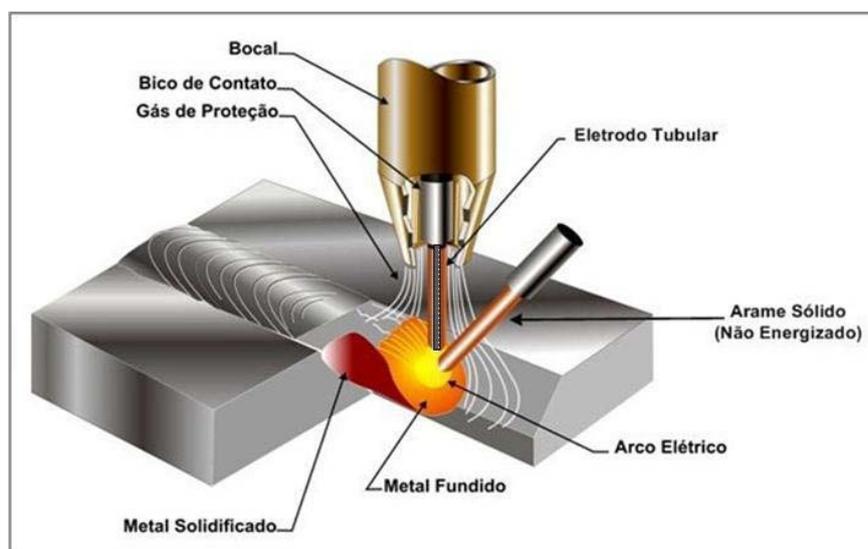


Figura 1. Representação esquemática do processo FCAW-AF.

A energia de soldagem é a energia calorífica gerada pelo processo de soldagem que será calculada com base nos valores de corrente, tensão, velocidade de soldagem e o rendimento térmico do processo através da Equação 1. Tal parâmetro influencia de forma direta o surgimento de microestruturas importantes para soldagem. Como é o caso da ferrita acicular que nucleia no interior dos grãos de austenita primária, apresentando-se na forma de estruturas agulhadas com um certo grau de desorganização gerando uma grande quantidade de discordâncias que acabam melhorando a tenacidade do material sem ocorrer grandes perdas de resistência mecânica do material. Este trabalho objetiva comparar a influência da energia de soldagem na microestrutura dos processos de FCAW e FCAW com adição do arame frio.

$$H = \eta \frac{V * I}{v}$$

Equação (1)

Onde:

V- Tensão (V);

I-Corrente (A);

η -Rendimento térmico;

v-Velocidade de soldagem (mm/min)

2 MATERIAL E MÉTODOS

O Aço ASTM A-131 Grau A foi selecionado como o metal de base para a soldagem das amostras devido a sua ampla utilização na indústria naval. É um aço estrutural da classe dos aços com baixo teor de carbono e baixa liga, destinado a construção de estruturas navais ou off-shore, apresenta maior resistência a corrosão⁽²⁾ e sua composição química é apresentada na Tabela 1. Este aço foi cortado nas medidas de 300 x 150 x 9,5 mm, com ângulo de bisel de 22.5° usinado em uma das arestas maiores e sem nariz.

Tabela 1 – Composição química do aço ASTM A-131 Grau A⁽²⁾

Elementos Químicos Determinados (%)									
C	Si	Mn min	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Vmin* *
0,2 1*	0,5	2,5 x C	0, 035	0,0 35	≤ 0,02				0,030

Os metais de adição utilizados foram os arames compostos da classe AWS E71T-1⁽³⁾ de 1,2 mm de diâmetro com composição expressa na Tabela 2, como o arame eletrodo, e os da classe AWS ER70S-6⁽⁴⁾ com 0,8 mm e 1,0 mm de diâmetro com composição química expressa na Tabela 3, como arames frios. Foram mantidos constantes: o ângulo de inclinação da tocha com o bico de alimentação de arame frio, com vazão de gás em 15 L/min para dióxido de carbono CO2 comercialmente puro.

Tabela 2 Composição química do arame tubular E71T-1⁽³⁾

Elemento	C	Si	Mn
(%)	0,05	0,50	1,20

Tabela 3 Composição química do arame maciço ER70S-6⁽³⁾

Elemento	C	Si	Mn
(%)	0,07	0,80	1,20

O processo FCAW convencional foi efetuado nas velocidades de alimentação de arame eletrodo (classe AWS E71T-1 com diâmetro de 1,2 mm) em três níveis 6 m/min, 8 m/min e 10 m/min. Para cada uma destas velocidades foram adquiridas amostras em duplicata, totalizando seis amostras. Esta decisão foi tomada, devido o processo FCAW apresentar uma tecnologia já dominada pelo mercado, considerado de simples aplicação. Este processo será chamado de processo C durante o trabalho.

Entretanto, já para o processo FCAW-AF foram realizados dois momentos distintos de aquisição das amostras, o primeiro com adição de arame frio (classe AWS ER70S-6) de diâmetro de 0,8 mm (processo A) e o segundo adicionando arame frio com 1,0 mm (processo B) de diâmetro, as variáveis de velocidade de alimentação de arame eletrodo foram as mesmas do modo convencional, sendo essas relacionadas às velocidades de alimentação de arame frio na seguinte proporção: 6/2 m/min, 8/3 m/min e 10/4 m/min. Dessa maneira, as amostras foram obtidas em triplicata (três amostras) para cada relação de velocidade, ou seja, adquiriu-se 9 amostras para cada diâmetro do arame frio acrescentado.

Para o cálculo da energia de soldagem foram utilizados os valores de tensão e corrente média retirados dos oscilogramas de cada processo. Os rendimentos térmicos foram estimados em 0,8 tanto para o processo FCAW convencional quanto para o FCAW com adição do arame frio. A velocidade de soldagem foi medida durante o processo. O cálculo foi realizado conforme a Equação 1.

A preparação para a análise microestrutural da junta solda, cada amostra foi lixada em uma máquina de polimento, utilizando lixas d'a água com granulometria de 80, 100, 220, 320, 400, 600, 1.200, fazendo uma mudança na direção de lixamento de 90° ao mudar para uma lixa de menor granulometria, exercendo uma pressão mínima necessária. Finalmente as superfícies foram polidas de maneira semiautomática utilizando pasta de diamante de 3 µm e 1 µm. As amostras polidas foram atacadas com uma solução de Nital 3% por 20 segundos, secas com ar quente e posteriormente se obtiveram as imagens destas superfícies mediante um panorama prévio da superfície com resolução de 100X, 200X e 500X.

Nesta etapa deve se avaliar a microestrutura de todas as regiões da junta soldada, havendo um maior interesse na região da ZTA e metal de solda. Observando as possíveis formas microestruturais adquiridas sujeitando-as às comparações com as imagens micrográficas padrões do Metals Handbook.⁽⁵⁾

3 RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os valores de corrente média, tensão média e energia de soldagem média para todos os processos realizados. Verificou-se que para mesma velocidade de alimentação, a energia de soldagem média tende a alcançar valores mais altos a medida em adiciona-se massa no sistema. Isto é possível de verificar em quase todos os experimentos, exceto o valor em destaque no processo FCAW-AF ($\Phi=1,2$ e 0,8 mm) com velocidade alimentação de 10 m/min em que o valor da energia encontrada foi menor que o valor do processo convencional.

Tabela 4. Descrição do conteúdo e data

Processo de Soldagem	Vel. Arame Eletrodo (m/min)	Vel. Arame Frio (m/min)	Parâmetros Obtidos			Energia de Soldagem Média (J/mm)
			Im (A)	Um (V)	Vsm (mm/min)	
FCAW $\Phi=1,2$ mm	6	-	131	28,6	143,63	20,87
	8	-	148	29,1	166,18	20,73
	10	-	163	31,0	169,74	23,82
FCAW-AF $\Phi=1,2$ E 0,8 mm	6	2,5	181	29,7	202,22	21,27
	8	3	242	28,5	195,20	28,27
	10	4	212	29,2	237,64	20,84
FCAW-AF $\Phi=1,2$ e 1,0 mm	6	2	165	28,1	149,60	24,80
	8	3	191	36,1	200,18	27,55
	10	4	226	34,1	250,27	25,00

As Figuras 2 (a) e (b) apresentam as microestruturas de uma região da zona fundida, onde foi aplicado o processo FCAW convencional na velocidade de 6 m/min e 10 m/min. Na Figura 2 podem ser observadas algumas variações de ferrita presente no metal, como Ferrita Primária - (PF), Ferrita de Contorno de Grão – PF(G) e alguns Agregados de Ferrita com Carbetos - (FC), justificando uma diversidade de tipos de ferrita. A presença de ferrita acicular (AF), também pode ser observada.

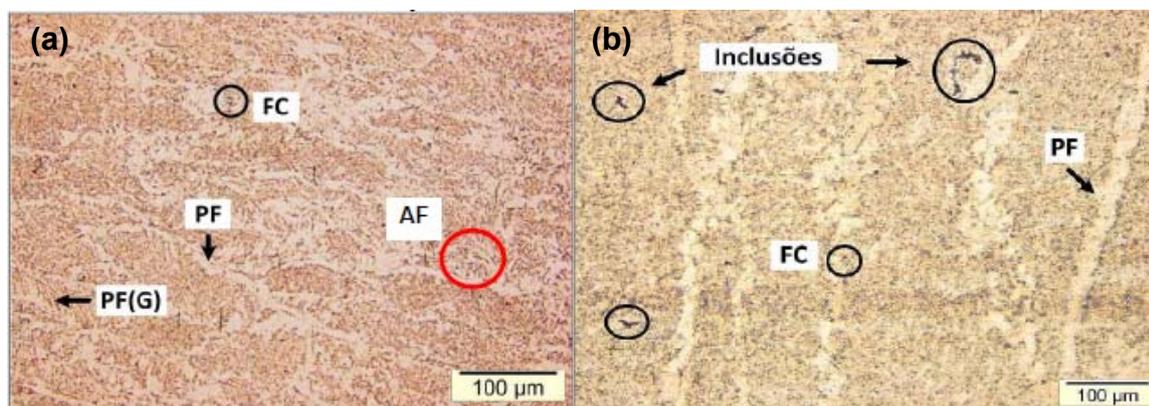


Figura 2. (a) Microestrutura da ZF usando o processo FCAW com velocidade V6 e (b) Microestrutura da ZF usando o processo FCAW com velocidade V10, indicando a presença de Ferrita Primária – PF; Ferrita de Contorno de Grão – PF(G), Ferrita Acicular (AF) e Agregados de Ferrita e Carbetos – FC. Aumento de 200X em MO. Ataque nital 2%.

As Figuras 3 (a) e 3 (b) apresentaram similaridade quanto à morfologia gerada no processo FCAW-AF em relação ao processo FCAW convencional. Algumas microestruturas não apresentadas nas amostras do FCAW convencional estão presentes na forma de Ferrita Acicular (AF), Ferrita Primária Intergranular – PF(I).

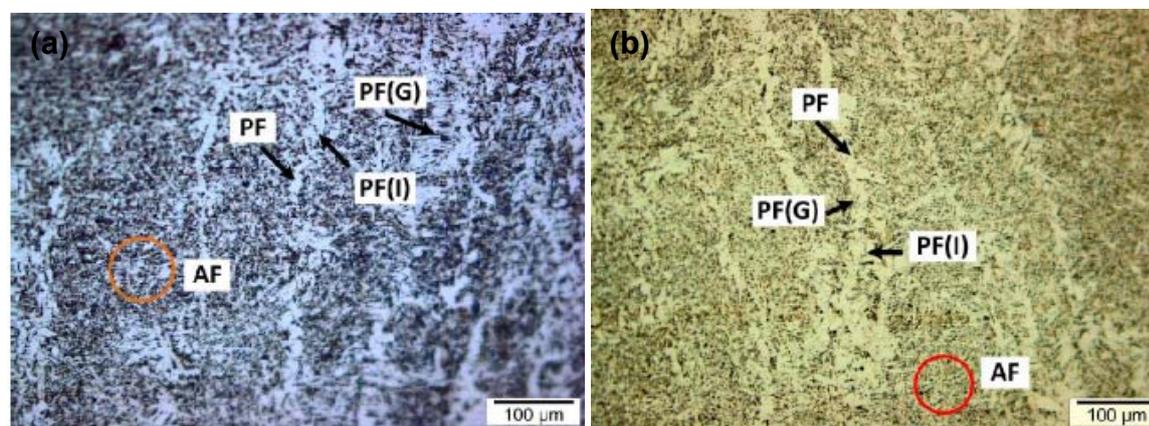


Figura 3. (a) Microestrutura da ZF usando o processo FCAW-B com velocidade V6 e (b) Microestrutura da ZF usando o processo FCAW-B com velocidade V8, indicando a presença de Ferrita Primária – PF, Ferrita Intergranular - PF(I), Ferrita Acicular (AF) e Ferrita de Contorno de Grão - PF(G). Aumento de 200X em MO. Ataque nital 2%.

As Figuras 4 (a) e 4 (b) mostram uma área da ZTA-S em 500X em uma amostra do FCAW convencional e FCAW com adição do arame frio, respectivamente. Ressaltando a diversidade de microestruturas encontradas nesta região, onde se encontram fases diferentes das verificadas nas três regiões convencionalmente estudadas, MB, ZTA e ZF. Entre as fases que merecem destaque, estão as presenças de ferrita alotriomórfica e ferrita de Widmanstätten, sendo que na Figura 4(a) estas se encontram em estágio de desenvolvimento, estando em forma

não muito bem definida. No entanto, as Figuras 4(b) representa a imagem do FCAW-AF, estando no aumento 500X. As fases presentes são similares às encontradas nas amostras do FCAW, sendo que as ferritas de Widmanstätten estão melhores definidas quanto a sua forma característica de ripas e placas.

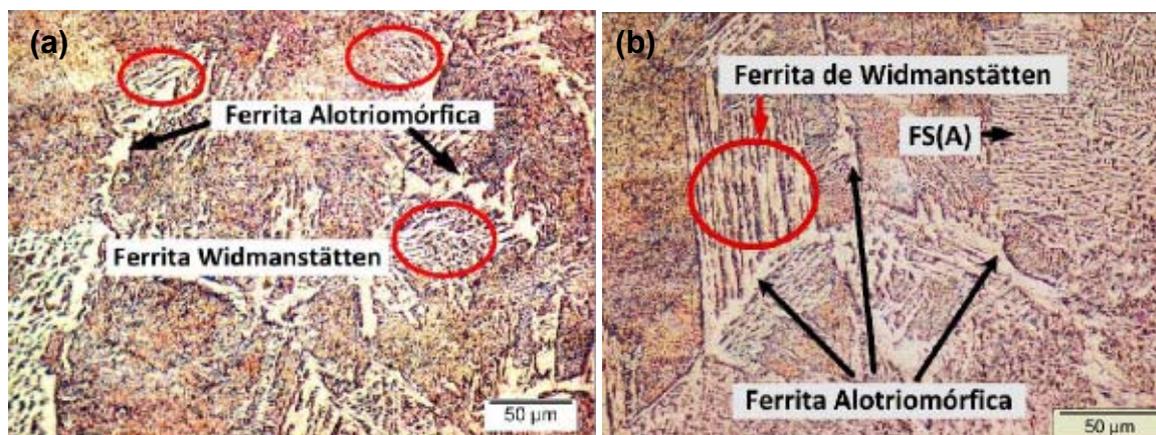


Figura 4. (a) Micrografia da ZTA-S de uma amostra FCAW e (b) Micrografia da ZTA-S de uma amostra FCAW-AF. Em destaque a Identificação das Fases Presentes: Ferrita com Segunda Fase Alinhada – FS(A); Ferrita Alotriomórfica e Ferrita de Widsmanstäten. Aumento de 500X em MO. Atque nital 2%.

4 DISCUSSÃO

É importante notar que com a introdução de um arame dito frio, seja ele de 0,8 mm ou 1,0 mm de diâmetro, a energia de soldagem tende a aumentar para mesma velocidade de alimentação, tendo em vista que está se adicionando mais massa para ser fundida, porém não pode-se afirmar que é somente por este motivo, pois tem-se um processo semi automático. Este aumento de energia de soldagem reflete no maior surgimento de ferrita acicular nas amostras do processo FCAW com adição do arame frio. Este tipo de ferrita se forma intergranularmente, nucleando-se de forma heterogênea em sítios como inclusões, precipitados e outras irregularidades nos grãos austeníticos.⁽⁶⁾ Pode-se afirmar que a microestrutura mais desejada no metal de solda é a ferrita acicular, pois esta aumenta consideravelmente a tenacidade do metal.⁽⁷⁾

A presença de ferritas secundárias nas formas alotriomórficas e de Widmanstätten são de certa forma inesperadas. A ferrita alotriomórfica usualmente nucleia ao lado da austenita para seu contorno de grão. Primeiro ela cresce lateralmente ao longo do contorno de grão e então pode seguir perpendicularmente dentro do grão da austenita.⁽⁸⁾ A nucleação e o crescimento envolvem um modo reconstrutivo da mudança da estrutura cristalina que leva a uma ausência de qualquer forma macroscópica, e apenas uma mudança de volume é observada. A ferrita de Widmanstätten pode ser formar diretamente a partir da superfície de grãos de austenita, sendo denominada Ferrita de Widmanstätten Primária ou, a partir da ferrita alotriomórfica, conhecida como Ferrita de Widmanstätten Secundária.⁽⁹⁾ Outra observação importante é que esta ferrita cresce competitivamente com a Ferrita acicular. Como a ferrita de Widmanstätten se forma com baixo super-resfriamento, termodinamicamente é necessário que o teor de carbono seja redistribuído durante o crescimento.⁽¹⁰⁾ Porém para comprovar que o surgimento dessas microestruturas se deu pelo baixo teor de carbono a análise de composição química deveria ter sido feita em cada região da junta soldada.

5 CONCLUSÃO

A energia de soldagem aumenta com a introdução do arame frio para uma mesma velocidade de alimentação, porém a partir da análise metalográfica realizada nas soldas do processo FCAW-AF, não se observou diferenças significativas das fases presentes, em relação às soldas do processo convencional. Apenas uma maior incidência de ferrita acicular e de Widmanstätten nos processos FCAW-AF, provavelmente devido o aumento da energia de soldagem. Considerando a energia de soldagem como reflexo da instabilidade do processo, a técnica FCAW-AF menos favorável para sua execução seria o que adiciona arame frio com $\Phi=0,8$ mm, devido a alguns resultados operacionais (corrente e tensão) e descontinuidades (inclusões excessivas) encontrados.⁽¹¹⁾

Esta observação é de grande relevância, já que o processo convencional é um método consolidado no mercado. Logo, se o processo FCAW-AF não difere muito do processo convencional, isto é, a sua implantação é viável na indústria levando em consideração apenas a análise microestrutural da junta soldada que é objetivo deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, F. G; *Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem FCAW com Adição de Arame Frio, Aplicado a Indústria Naval*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
- 2 ASTM A131, *Standard Specification for Structural Steel for Ships*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. West Conshohocken, PA, USA, 2001.
- 3 ESAB. OK TUBROD WS Arame Tubular. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: jan. 2009.
- 4 ESAB. OK Autrod 12.51 – Arame Sólido, Catálogo de Soldagem. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: jan. 2009.
- 5 METALS HANDBOOK, *Metallography and Microstructures*. 1st ed., vol. 9, Colorado: ASM, 2004.
- 6 KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*. 2ª ed. Wiley-Interscience Publication: United States of America, 2003.
- 7 MONDENESI, P. J.: *Soldabilidade dos Aços Transformáveis*, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004. Disponível em: www.infosolda.com.br. Acesso em: mar/ 2009.
- 8 BABU, S. S. *Classification and Mechanisms of Steel Transformation, Steel Heat Treatment – Metallurgy and Technologies*, 2006.
- 9 BHADESHIA, H. K. D. H.; ALI, A. *Nucleation of Widmanstätten ferrite*. *Materials Science & Technology*. 1990. v. 6
- 10 BHADESHIA, H. K. D. H. *Widmanstätten ferrite*. *Materials Science & Metallurgy*. 1990.
- 11 RODRIGUES, L.A.S. *Caracterização das Propriedades Mecânicas e Microestrutura de Soldas Utilizando o Processo FCAW com Adição de Arame Frio Aplicadas ao Aço Naval*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.