

Efeito da Corrente de Ar Durante o Processo de Soldagem FCAW-S sobre a Microestrutura e Dureza dos Cordões de Solda.

(Effect of the Air Current During the Welding Process FCAW-S on the Microstructure and Hardness of the Weld bead.)

Mario Wolfart Junior¹, Aloysio Arthur Becker Fogliatto¹, Tomaz Fantin De Souza², Cristiano José Turra¹

¹Instituto Federal Catarinense, Departamento de Engenharia Mecânica, Luzerna, Santa Catarina, Brasil, mario.wolfart@ifc.edu.br

²Instituto Federal Sul-rio-grandense, Departamento de Engenharia Mecânica, Luzerna, Santa Catarina, Brasil

Resumo

A soldagem em campo é restrita à velocidade do vento. O efeito do vento é prejudicial ao processo, pois compromete a resistência e qualidade da junta soldada. A taxa de resfriamento do cordão é crítica, pois é nessa etapa que acontece as mais importantes transformações microestruturais nos aços. De forma geral, o ciclo térmico de soldagem é quem dita as características e propriedades do cordão de solda, principalmente a tenacidade e dureza. Desta forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da corrente de ar sobre a dureza e microestrutura, em corpos de prova ASTM A36 [1], soldados pelo processo arame tubular auto protegido (FCAW-S Self-Shielded Flux-Cored Arc Welding), em diferentes velocidades de corrente de ar. Foi realizado análise visual, análise micrográfica e dureza Brinell nos cordões de solda, que comprovaram a inexistência de descontinuidades que desqualificam a junta soldada.

Palavras-chave: Vento. FCAW-S. Microestrutura. Dureza.

Abstract: *The open air welding depends of the wind speed. The wind effect is harmful to the process, because it commits the resistance and the quality of the melted joint. The weld cooling rate is critical, because in this stage are the most important microstructural transformations in steels. Usually, the weld thermal cycle shows the welding characteristics and properties, mainly the hardness and tenacity. This way, this work had as objective, to evaluate the wind effects in the hardness and microstructures in ASTM A36 [1] samples, welded by Self protected wire welding (FCAW-S Self-Shielded Flux-Cored Arc Welding), in different wind speeds. It was made the visual analysis, metalographic analysis and Brinell Hardness on the weld region, that proves the absence of failures that harms the welded joint.*

Key-words: Wind. FCAW-S. Microstructure. Hardness.

1. Introdução

A soldagem em campo aberto é comum em diversas atividades que, devido ao tipo, porte ou aplicação, não é possível realizar em locais isolados de intempéries. O vento, por exemplo, é uma condição na soldagem em campo e restringe o tipo de processo que tem melhor performance, já que alguns processos suportam velocidades de ventos superiores a outros. A falha na proteção da poça fundida gera instabilidade no arco elétrico, que por sua vez gera porosidades, rechupes, trincas e inclusões. Além disso, a troca de calor e o resfriamento do cordão de solda com o ambiente é muito maior sob correntes de ar do que em ambientes sem perturbações.

O tempo de resfriamento influi diretamente na microestrutura da junta soldada [2,3]. Taxas de resfriamento muito baixas promovem a formação de grãos grosseiros, e taxas de resfriamento muito elevadas promovem alta dureza e microestruturas características de baixa temperatura de transformação [4]. O resfriamento acelerado do metal líquido, como no caso da soldagem em velocidades de vento elevadas, pode causar uma camada solidificada na superfície do cordão, impedindo a evolução dos gases presentes na poça fundida [5].

As soldagens realizadas sob ação de ventos de velocidade superior a 0,3 m/s ($\approx 1,1$ km/h), podem causar ondulações na superfície e sensibilidade no arco, além de contaminação do depósito de solda [4]. O cordão de solda pode absorver o nitrogênio do ar atmosférico, causando a diminuição da resistência e dureza do cordão [5], além de porosidade e rechupes [2]. Apesar das indicações para não realizar soldagens em locais com velocidades de vento superiores a 0,3 m/s, vários estudos indicam que os processos suportam velocidades de vento superiores

à recomendada [6]. Os processos MIG/MAG (GMAW - Gas Metal Arc Welding) e arame tubular (FCAW-G - Gas Shielded Flux Cored Arc Welding), para correntes de ar com velocidade de 1 m/s (3,6 km/h), apresentam grande quantidade de poros [5], além de diminuir a tenacidade com o aumento da velocidade do vento [7].

O processo eletrodo revestido (SMAW - Shielded Metal Arc Welding), quando submetido a velocidades de vento de 4,5 m/s (16,2 km/h), produz soldas com durezas significativamente inferiores quando comparadas com soldas realizadas sem o efeito da corrente de ar [5]. A velocidade máxima de vento suportada pelo processo SMAW sem que ocorra defeitos no cordão é de 4 m/s (14,4 km/h) [8].

O processo arame tubular auto protegido (FCAW-S Self-Shielded Flux-Cored Arc Welding), que faz a proteção da poça fundida através da queima do fluxo interno sem gás de proteção adicional, é indicado para soldagem em campo e apresenta características de resistência ao vento superiores aos demais processos. Estudos revelam que o processo FCAW-S suporta velocidades de corrente de ar de 5 m/s (18 km/h) [8].

2. Matérias e Métodos

2.1. Preparação do Corpo de Prova

O tipo de Metal de Base (MB) escolhido é um aço ASTM A36 [1], de espessura 3/8" e comprimento de 200 mm, que é muito utilizado para construção de estruturas metálicas e na soldagem em campo de forma geral. Foi usinado um chanfro de 60° (bisel de 30°), nas chapas de soldagem para obter a penetração total na junta. A posição de soldagem utilizada é a plana 1G, que apresenta maior facilidade no processo de soldagem. A Figura 1 representa o formato e as dimensões da junta e das chapas para soldagem.

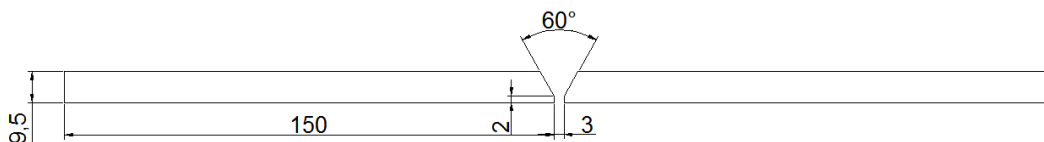


Figura 1. Corpo de prova. Escala em milímetros.

O consumível utilizado é o AWS E71T-11 [9], de 1,6 mm de diâmetro, que utiliza como meio de proteção da poça fundida a queima do fluxo interno sem adição de gás. Esse tipo de consumível foi escolhido por ser um dos mais utilizados e próprios para a soldagem estrutural e por ser aplicável em todas as juntas, além de ser compatível com o metal de base.

2.2. Equipamento para Fixação das Chapas a Serem Soldadas.

Foi utilizado um dispositivo para a fixação das chapas para a soldagem com o objetivo de impedir que, durante o teste, as chapas se movimentassem devido à dilatação promovida pela geração de calor através do arco.

2.3. Equipamento para Geração de Corrente de Ar.

Para a geração de corrente de ar foi utilizado um exaustor de ar conectado a um inversor de frequência para ajustar a velocidade desejada. A medição e controle da velocidade da corrente de ar simulada, foi realizada através de um anemômetro digital. Foram realizadas medições das velocidades do ar antes, durante e depois da soldagem para garantir a velocidade desejada.

2.4. Definição dos Parâmetros de Soldagem.

Os parâmetros de soldagem foram definidos através das recomendações especificadas pelo fabricante do consumível, da revisão bibliográfica [5;8], dos testes preliminares e condições de soldagem (formato e dimensões da junta). Os parâmetros escolhidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem das chapas.

Velocidade da corrente de ar (m/s)	Corrente Raiz (média) (A)	Corrente Preenchimento (média) (A)	Tensão Raiz (V)	Tensão Preenchimento (V)	Polaridade (raiz e preenchimento)	Temp. Ambiente (°C)
0 m/s	125	125	18	18,5	CC-	19
2 m/s	120	125	18	19	CC-	19
3,5 m/s	115	120	19	19	CC-	20
5 m/s	120	110	19	19	CC-	23

2.5. Soldagem dos Corpos de Prova.

Foram utilizados três juntas de solda para cada teste realizado, para se garantir a repetitividade dos ensaios e diminuir possíveis erros de interpretação de resultados.

As soldagens foram realizadas em local fechado, para que se obtivesse total controle das correntes de ar que age na região do cordão de solda. A limpeza superficial da junta antes da soldagem foi realizada através do lixamento da superfície, de forma que não se tenha imperfeições como rebarbas, poeiras, resíduos, carepas e oxidação.

Para a soldagem, as chapas foram presas no equipamento de fixação conforme o item 2.2, de forma que, uma vez fixas, elas são movimentadas somente após o teste ter acabado. A corrente de ar gerada foi direcionada para a região de soldagem, sendo que sua velocidade atingiu a desejada. A Figura 2 apresenta o esquema de soldagem simulando correntes de ar.

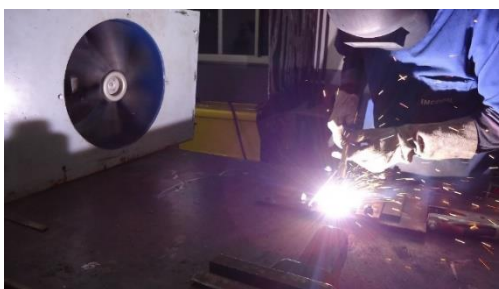


Figura 2. Sistema de soldagem. Corrente de ar agindo no sentido transversal ao sentido de soldagem.

A soldagem foi realizada com uma fonte Hylong MIG-400, em dois passes (raiz e preenchimento). A recomendação [10] relacionada ao processo FCAW-S foi utilizada para a soldagem das chapas do presente estudo.

2.6. Ensaios.

Para verificação da qualidade do cordão de solda foi realizada a inspeção visual e a análise química da junta soldada, com objetivo de verificar a perda de algum elemento ou a existência (ou não), de defeitos como porosidade, acabamento e respingos, na superfície do cordão. Basicamente, nesta análise avalia-se, em um primeiro momento, se o cordão de solda está com boa ou má qualidade.

Para a verificação da influência da corrente de ar na microestrutura do cordão de solda foi realizada a análise micrográfica, com o objetivo de avaliar a mudança (ou não), da microestrutura na Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF), com as respectivas velocidades de vento estudadas. Como referência para a análise, foi utilizada a norma ASTM E3 [11], referente a preparação metalográfica.

Para relacionar a dureza com a microestrutura e consequentemente com o efeito da velocidade da corrente de ar, foi realizado o ensaio de dureza Brinell. Para isso, foi utilizado como referência principal a norma ASTM E10 [12]. O perfil de dureza foi realizado de acordo com a Figura 3, que indica os pontos de penetração do indentador nas diferentes regiões da junta soldada.

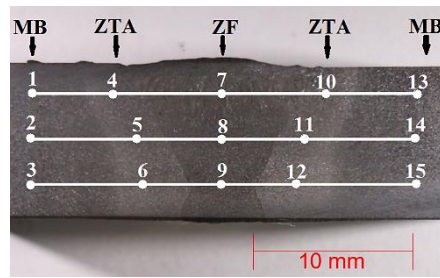


Figura 3. Perfil de dureza Brinell utilizado nos corpos de prova. Fonte: Próprios Autores.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise Visual e Análise Química

A inspeção visual mostrou que os testes realizados sem correntes de ar, apresentam alguns respingos e acabamento superficial regular (Figura 4). Para os testes simulando correntes de ar de 2 m/s (7,2 km/h), notou-se um aumento de respingos, porém o acabamento superficial e a penetração não se modificaram (Figura 4).

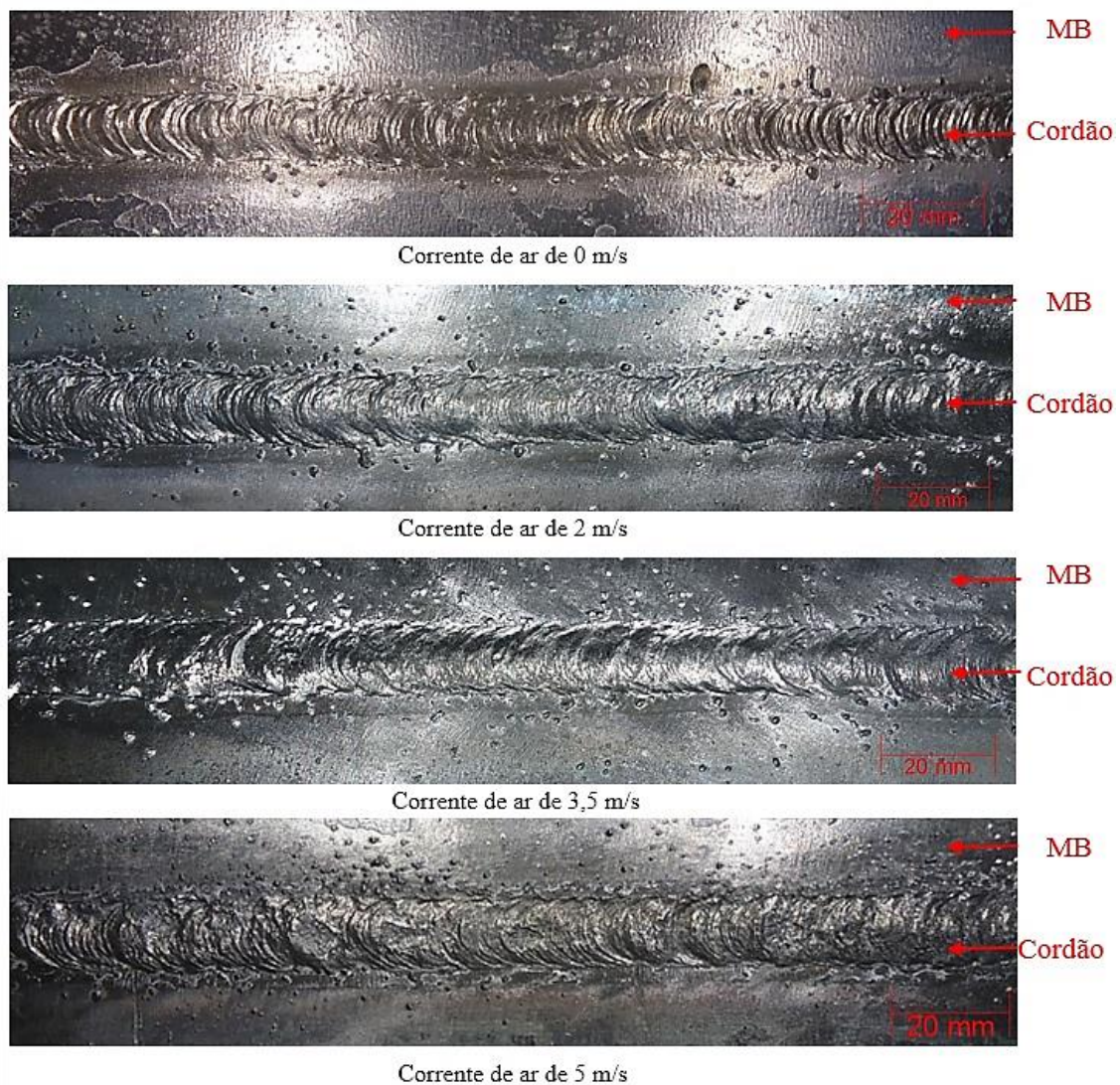


Figura 4. Superfície dos cordões de solda realizados em diferentes velocidades de corrente de ar. Fonte: Próprios Autores.

Os cordões de solda submetidos a correntes de ar de velocidade 3,5 m/s (12,6 km/h), demonstraram alterações na superfície do cordão. O acabamento superficial do cordão apresentou ondulações e variações de deposição de material, assim como maior quantidade de respingos (Figura 4). Cordões de solda realizados sob

velocidade de vento simulada de 5 m/s (18 km/h), apresentam acabamento superficial de má qualidade, com ondulações superficiais e maior quantidade de respingos (Figura 4). Esses defeitos encontrados nesta condição de soldagem também são descritos em outros estudos [8]. Em nenhum dos cordões foi observado mordeduras. A Tabela 2 apresenta a análise química (% em massa) através de espectrometria de emissão óptica no Metal de Base (MB) e Metal de Solda (MS) para a condição de inexistência de corrente de ar, e a composição especificada do arame consumível.

Tabela 2. % em massa de elementos de liga no MB e MS.

Elemento	MB	DESV. PAD.	MS	DESV. PAD.	AC
C	0,094	0,012	0,209	0,003	0,25
Mn	0,459	0,010	0,526	0,005	0,7
Si	0,216	0,025	0,25	0,004	0,4
Cr	0,006	0,003	0,018	0,002	-
P	0,018	0,003	0,013	0,002	-
S	0,007	0,001	0,001	0,001	-
Cu	0,011	0,001	0,017	0,001	-

Como esperado, conforme a especificação do consumível, a ZF apresentou mais elementos de liga, como C e Cr, em relação ao metal de base. Porém, as faixas de elementos não tiveram grandes alterações.

3.2. Micrografia.

Foi realizada a análise micrográfica da Zona Termicamente Afetada (ZTA), Metal de Base (MB), e Zona Fundida (ZF) do passe raiz e preenchimento. A Figura 5 apresenta ferrita (regiões claras) na forma primária (FP) na ZTA. Pode ser observado que, com o aumento da velocidade de vento, a microestrutura se torna mais refinada quando comparada com velocidades inferiores, como já é citado em outros estudos [2-3]. Em comparação com o MB, os grãos apresentam menor tamanho.

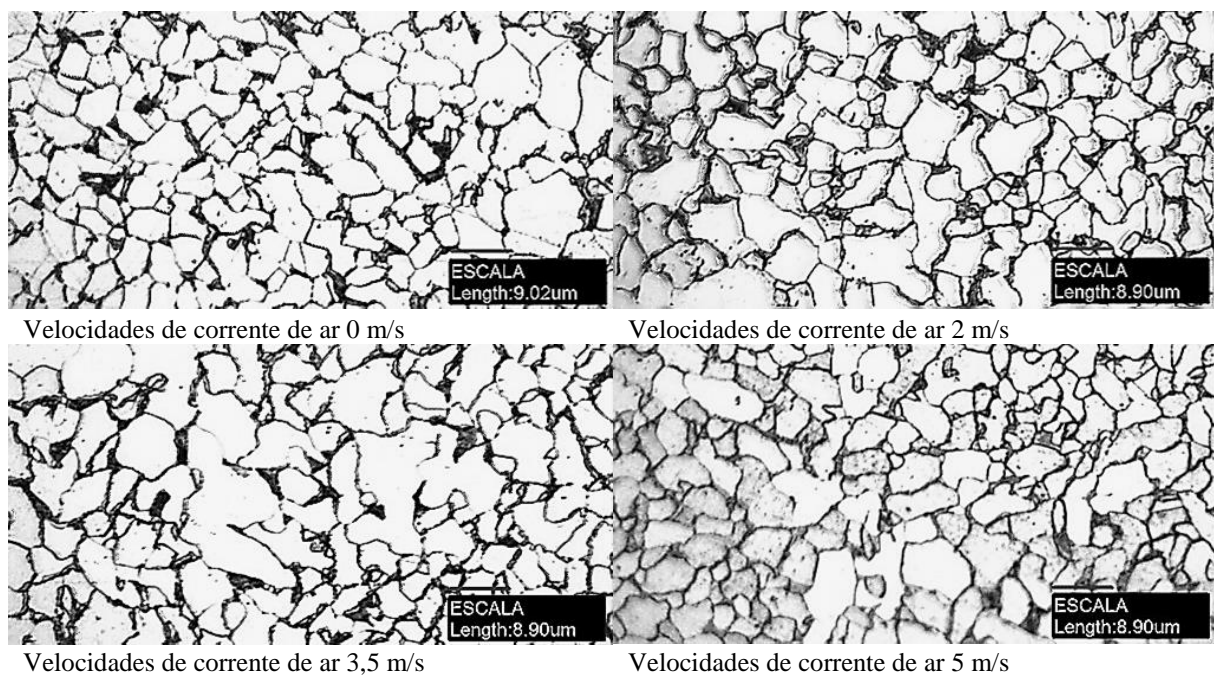
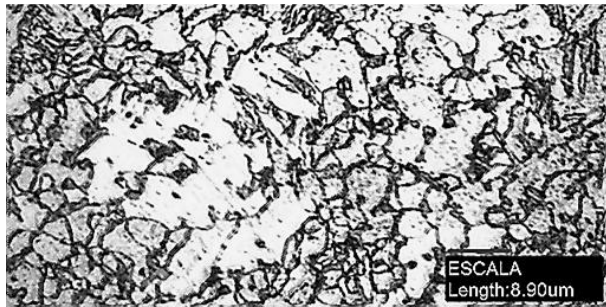
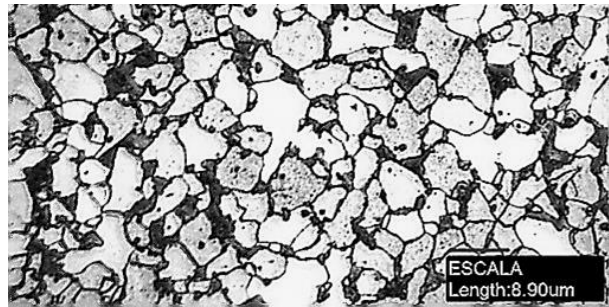


Figura 5. Microestrutura da Zona Termicamente Afetada em diferentes velocidades de vento. Apresenta basicamente FP. Aumento de 500X. Ataque Nital 2%.

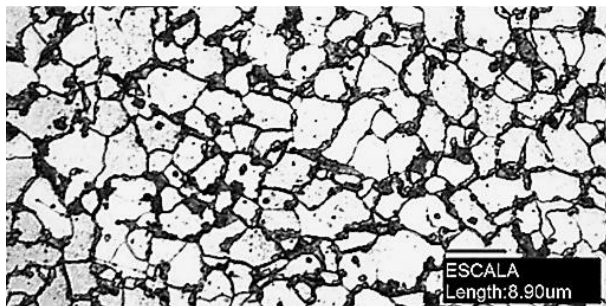
A Figura 6 apresenta a microestrutura do passe raiz dos cordões realizados em diferentes velocidades de corrente de ar. Nota-se que, devido ao segundo passe, o passe raiz apresentou uma microestrutura com mais grãos refinados. Assim, como na ZTA, o refino de grão foi maior conforme o aumento da velocidade de vento. O resfriamento mais rápido do metal aumenta a convecção e consequentemente impede o crescimento de grão. Nessa região, em condições de velocidades de corrente de ar, ainda é possível observar a formação de sub-grãos que, provavelmente, ocorre devido a plastificação [2].



Velocidades de corrente de ar 0 m/s



Velocidades de corrente de ar 2 m/s



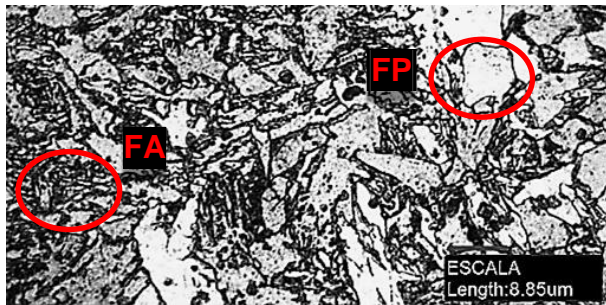
Velocidades de corrente de ar 3,5 m/s



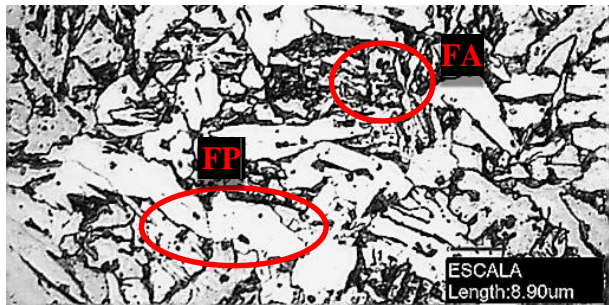
Velocidades de corrente de ar 5 m/s

Figura 6. Microestrutura da Zona Fundida do passe raiz em diferentes velocidades de vento. Apresenta FP refinada pelo passe posterior. Aumento de 500X. Ataque Nital 2%.

A Figura 7 mostra a microestrutura da ZF dos cordões realizados em diferentes velocidades de vento. Para esta região, como esperado, a microestrutura se apresenta na forma de ferrita acicular (FA), ferrita primária (FP), ferrita secundária alinhada (FSA).



Velocidades de corrente de ar 0 m/s



Velocidades de corrente de ar 2 m/s



Velocidades de corrente de ar 3,5 m/s



Velocidades de corrente de ar 5 m/s

Figura 7. Microestrutura da Zona Fundida do passe preenchimento em diferentes velocidades de vento. Apresenta FP, FA e FSA. Aumento de 500X. Ataque Nital 2%.

De forma geral, a análise micrográfica não revelou a presença de descontinuidades ou defeitos no cordão de solda e grandes alterações na microestrutura, comprovando a resistência na proteção da poça fundida contra correntes de ar no processo de soldagem FCAW-S.

3.3. Dureza Brinell.

Foram realizadas medições de dureza em quinze pontos, em três corpos de prova para cada velocidade de corrente de ar, a fim de identificar o efeito do aumento da velocidade de corrente de ar na dureza. Foi utilizado uma esfera de diâmetro 2,5 mm e carga 187,5 kgf. É perceptível que com o aumento da velocidade de vento a dureza diminui na zona fundida (ZF). Isso ocorre provavelmente devido a absorção de nitrogênio no cordão de solda [5]. Esse comportamento com a dureza também ocorreu no estudo de [5] utilizando o processo SMAW. Com a corrente de vento, a superfície do cordão solidifica mais rapidamente, e impede a evolução do nitrogênio para fora do cordão. Nesta condição, em pequenas quantidades, o nitrogênio se apresenta misturado com o metal, sem apresentar porosidades [5]. A Figura 8 representa o diagrama da dureza Brinell versus posição no corpo de prova.

Nota-se ainda que os maiores valores de dureza foram obtidos na ZF, com perda gradual para a ZTA até o MB. As durezas superiores obtidas na ZTA podem ser relacionadas ao processo de têmpera causado pelo resfriamento gerado pela corrente de ar.

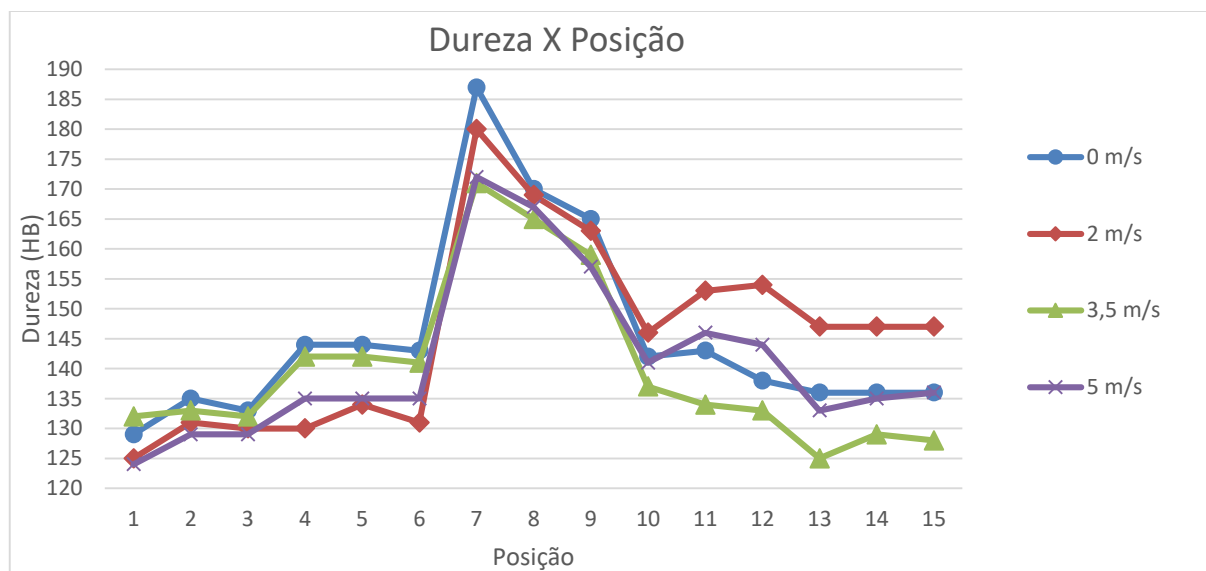


Figura 8. Diagrama dureza versus posição no corpo de prova (conforme a Figura 3).

4. Conclusões

Após a realização das soldagens e dos ensaios para avaliação do cordão de solda, conclui-se que:

- O aumento da velocidade de vento gera maior instabilidade no arco, que por sua vez gera maior quantidade de respingos e ondulações na superfície do material líquido, que diminui a qualidade do acabamento superficial;
- Para o processo FCAW-S, neste estudo, os cordões não apresentam descontinuidades e grandes alterações na microestrutura em relação a velocidades de vento. Somente há alterações microestruturais ocasionadas por passes subsequentes (neste estudo especialmente, pelo segundo passe), como por exemplo o refino de grão no passe raiz;
- A dureza da zona fundida diminui com o aumento da velocidade de vento, muito provavelmente pela absorção de nitrogênio no metal líquido.
- Os maiores valores de dureza estão na ZF, com perda gradual até o MB.
- A análise química revelou que praticamente não ocorreu perda de elementos de liga na ZF.

5. Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao IFC (Instituto Federal Catarinense – Campus Luzerna) e a FAPESC Edital N°02/2015, pelo financiamento da bolsa do projeto. A empresa ESAB do Brasil, que disponibilizou o arame consumível para a realização do estudo, bem como suporte técnico. A empresa HISA (Hidráulica Industrial SA), que forneceu o metal de base, assim como assistência e acompanhamento no

desenvolvimento do projeto.

6. Referências Bibliográficas

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A 36: Standard Specification for Carbon Structural Steel. United States, 2012. 3 p.
- [2] LESSA, R. M. de A. Efeito do ventos sobre as propriedades mecânicas do Aço A-36: 2010. 98p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco.
- [3] MOOJEN R.G., MACHADO I. G., MAZZAFERRO J. A. E. et al., Efeitos da Taxa de Resfriamento na Soldagem do Aço API 5L-X80. 2015. p. 1-13
- [4] RADAJ, D. Heat Effects of Welding. Berlim, Springer-Verlag. 1992, 348p.
- [5] FEMA (Federal Emergency Management Agency), State of the Art Report on Welding and Inspection, FEMA-355B/September, 2000.
- [6] VILARINHO, L.O. Medição, Controle e Armazenamento. Notas de Aula, Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Universidade Federal de Uberlândia, 2013, 1-88.
- [7] BONISZEWSKI, T. Self-Shielded Arc Welding. Abington Publishing. Cambridge, England. 1992.
- [8] SOUZA, D.; ARAÚJO, D. B. et al., Estudo Exploratório sobre a Resistência da Soldagem as Correntes de Ar (Ventos) Utilizando os Processos de Soldagem Eletrodo Revestido (SMAW), Eletrodo Tubular (FCAW) e Eletrodo Tubular Auto protegido (FCAW-S). In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 39º, 2013, Curitiba, Associação Brasileira de Soldagem, 2013. 1-12.
- [9] AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.29: Specification For Low-alloy Steel Electrodes For Flux Cored Arc Welding. United States, 1996. 62 p.
- [10] MACHADO, I. G. Soldagem a Arco com Eletrodo Tubular. 1ªEd., Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. Pg. 158-169.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. EUA. 1995. 8 p.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 10: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials1. EUA. 2001. 9 p.