

COBEF2017-0073 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO LENTO NA SOLDAGEM DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS USANDO O PROCESSO DE ELETRODO REVESTIDO

Hector Di Maiochi, hector.maiochi@gmail.com¹

Nathan Bitencourt Pereira, nathanbitencourt@hotmail.com¹

Cleiton de Quadros, cleiton_quadros@yahoo.com¹

Gabriel Costa Souza, gabrielcosta@ifsc.edu.br¹

Fernando Henrique Gruber Colaço, fernandogruber@ifsc.edu.br¹

¹ Instituto Federal de Santa Catarina, Rua dos Imigrantes 445, Bairro Rau – Jaraguá do Sul – CEP 89254-430.

Resumo: O ferro fundido cinzento é amplamente utilizado na indústria, porém apresenta difícil soldabilidade. As técnicas de pré e pós aquecimento ajudam a controlar a formação de microestruturas frágeis, resultando em uma melhor qualidade do cordão de solda. O processo de soldagem com eletrodo revestido foi utilizado por ser o mais prático e o mais barato, sendo utilizado um eletrodo E9258 (ENiFe-Cl). Oito diferentes condições de soldagem foram utilizadas, avaliando a microestrutura, a microdureza e a resistência a esforços de dobramento. O resfriamento lento teve resultados mais satisfatórios em relação aos aspectos estudados. A qualidade de soldagem está relacionada com o tipo do resfriamento.

Palavras-chave: Ferro fundido cinzento, eletrodo revestido, soldabilidade, resfriamento lento, pré-aquecimento.

1. INTRODUÇÃO

Conforme Paris (2003), a versatilidade do ferro fundido cinzento torna um material com grande aplicabilidade na indústria, pois possui baixo ponto de fusão, alta fluidez e menor contração. Apesar dessas qualidades, os ferros fundidos apresentam problemas quando relacionado com alguns processos posteriores a fundição. Um dos principais problemas é na soldagem do ferro fundido, devido à alta porcentagem de carbono em sua composição, formando uma grande quantidade de estruturas duras e frágeis, como a martensita e os carbonetos (PARIS, 2003 e ASKARI-PAYKANI, Mohsen; SHAYAN, Mehrdad; SHAMANIAN, Morteza, 2014).

A soldagem por eletrodo revestido é um dos principais processos de soldagem por ser mais barato e mais prático, isso não se mostra diferente na soldagem do ferro fundido, pois existe uma classe especial de eletrodos, neste caso o AWS E9258. Essa praticidade do eletrodo revestido tem grande importância na solda de manutenção de máquinas e equipamentos mecânicos, porém a alta concentração de carbono dos ferros fundidos geram alguns problemas na sua soldagem.

Paris (2003) mostra que para evitar a formação de microestruturas duras e frágeis como a martensita na zona termicamente afetada (ZTA) pode-se adotar algumas técnicas de soldagem. Neste trabalho, serão usados o pré-aquecimento e o resfriamento lento. O intuito de pré-aquecer a peças é, principalmente, diminuir a taxa de resfriamento, além de ajudar na redução de tensões residuais e distorções.

Após a soldagem, as peças são resfriadas lentamente, assim como no pré-aquecimento, com o objetivo de diminuir a taxa de resfriamento. Essa técnica de resfriamento poderia ser aprimorada com um tratamento térmico mais completo e eficaz como o recozimento, porém como em muitas vezes, na indústria não há tempo de tais processos, principalmente quando se trata de manutenção de máquinas e equipamentos.

Para Pouranvari (2010), a soldagem dos ferros fundidos requer um melhor e maior estudo entre a relação da composição química, microestrutura, parâmetros de soldagem e tratamentos térmicos. El-Banna (1999) complementa afirmando que as taxas de pré-aquecimento também podem variar em função da composição química do ferro fundido, porém há mais fatores que influenciam nesta variável da soldagem, como o tamanho e complexidade das peças, e também do tipo de metal de adição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O material utilizado foi o ferro fundido cinzento da classe FC-200, muito aplicado na indústria por seu baixo custo, boa resistência ao desgaste e boa usinabilidade, podendo ser utilizado na fabricação de carcaças de motores, redutores, em estruturas de máquinas e um infinidade de aplicações. Para a realização deste estudo os corpos de prova foram

cortados e usinados conforme é mostrado na Fig. (1) junto à sua composição química.

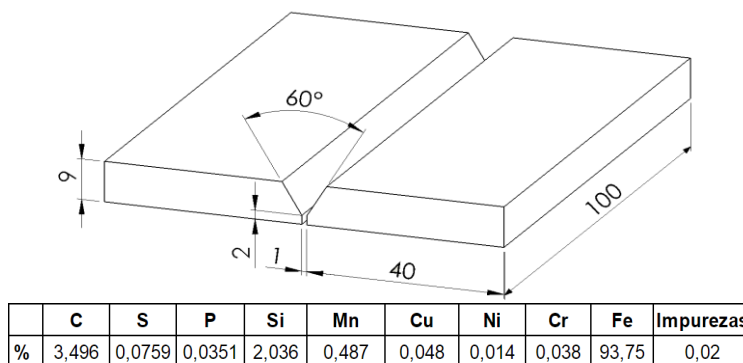


Figura 1. Dimensões (em milímetros) das amostras e tipo da junta soldada.

2.2. Procedimento de Soldagem

Após um estudo com base em diversas literaturas as amostras foram pré-aquecidas em duas diferentes temperaturas, uma a 200°C e outra a 400°C. A soldagem foi realizada na posição plana, utilizando o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) utilizando o consumível OK E9258 (NiFe-CI) com diâmetro de 2,5 mm em um equipamento de soldagem do tipo inversora até 160A. A velocidade de soldagem foi de aproximadamente 100 mm/min e foram necessários três passes de solda para preencher a junta. Foram utilizados dois valores de corrente de soldagem 50A e 70A (CC+), esses valores são próximos ao menor e o maior valor de corrente indicado pelo fabricante. Dois métodos foram adotados para o resfriamento após soldagem, um no forno e outro ao ar livre. Na Tabela (1) são mostrados os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 1. Parâmetros analisados por amostra.

Nº da Amostra	Fator A	Fator B	Fator C
	Corrente (A)	Pré-aquecimento (°C)	Resfriamento
1	50	200	Ambiente
2	70	200	Ambiente
3	50	400	Ambiente
4	70	400	Ambiente
5	50	200	No forno
6	70	200	No forno
7	50	400	No forno
8	70	400	No forno

Após a soldagem os corpos de prova foram cortados retirando-se de cada peça duas amostras, uma para ensaio de dobramento com as dimensões de aproximadamente 20 mm x 100 mm x 9 mm, e outra para análise metalográfica e microdureza, com as dimensões próximas de 30 mm x 10 mm x 9 mm.

As amostras para ensaio de dobramento receberam acabamento de modo que suas superfícies ficassem planas, retirando qualquer reforço do cordão e raiz da solda. Já as amostras para análise metalográfica e ensaio de microdureza foram lixadas e polidas para poderem receber o ataque químico e serem analisadas microscopicamente.

2.3. Métodos e Avaliação dos Resultados

Após o preparo das amostras, as mesmas foram atacadas com Nital 2% para análise metalográfica, visando estudar a mudança das microestruturas nas diferentes regiões do cordão de solda, que são: Metal Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA), Zona Parcialmente Fundida (ZPM) e Zona Fundida (ZF), como mostrado na Fig. (2).

Os ensaios metalográficos tiveram por objetivos a comparação das diferentes regiões do cordão entre as amostras, para isso foi usado um microscópio ótico com ampliação de 400x, essas regiões apresentaram microestruturas diferentes dos originais, isso ocorreu devido as altas temperaturas no qual as amostras foram submetidas durante a soldagem.

Para a avaliação de microdureza foi utilizado o ensaio Vickers, realizando três medições em cada região da solda e em diferentes partes da peça, ou seja, as coletas de dados de dureza não foram feitas na mesma área, mantendo uma diversificação dos resultados. Após a captação desses valores o resultado final para cada região da solda foi obtido por média aritmética. A carga de teste para o ensaio foi de 200 g durante 10 s.

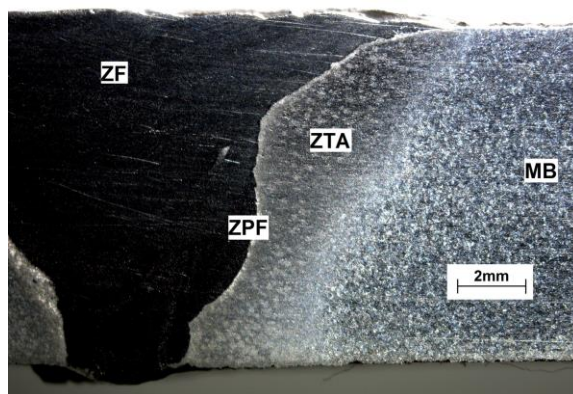


Figura 2. Regiões do cordão de solda obtida através da macrografia.

O ensaio de dobramento foi realizado com uma distância entre apoios de 70 mm com um limite de carga de 100 kN, estes corpos de prova foram submetidos ao teste até o seu rompimento, este ensaio foi feito em comparativo com uma amostra somente com o metal de base, sem nenhum cordão de solda, tendo em vista uma análise comparativa entre as características do metal de base como padrão.

Uma análise macrográfica foi feita a partir das amostras atacadas com Iodo, resultando em uma melhor compreensão dos comprimentos das regiões da solda. Este ensaio teve por objetivo uma comparação qualitativa das amostras, não sendo apresentados valores dessas dimensões.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Micrografia

Em um breve comparativo as amostras ficaram com microestruturas similares entre si, porém a maior variação das amostras em relação a microestrutura foi dada em função do tamanho das regiões do cordão de solda e em algumas delas a formação de estruturas dendríticas. No metal de base a estrutura apresentada foi de uma matriz ferrítica com grãos de perlita, a grafita apresentou-se em forma de veios e em alguns locais, também houve distorção radial em torno de núcleos com aspecto eutético, caracterizando uma grafita do tipo B (PARIS, 2003 e COLPAERT, 2008), como pode ser visto na Figura 3.

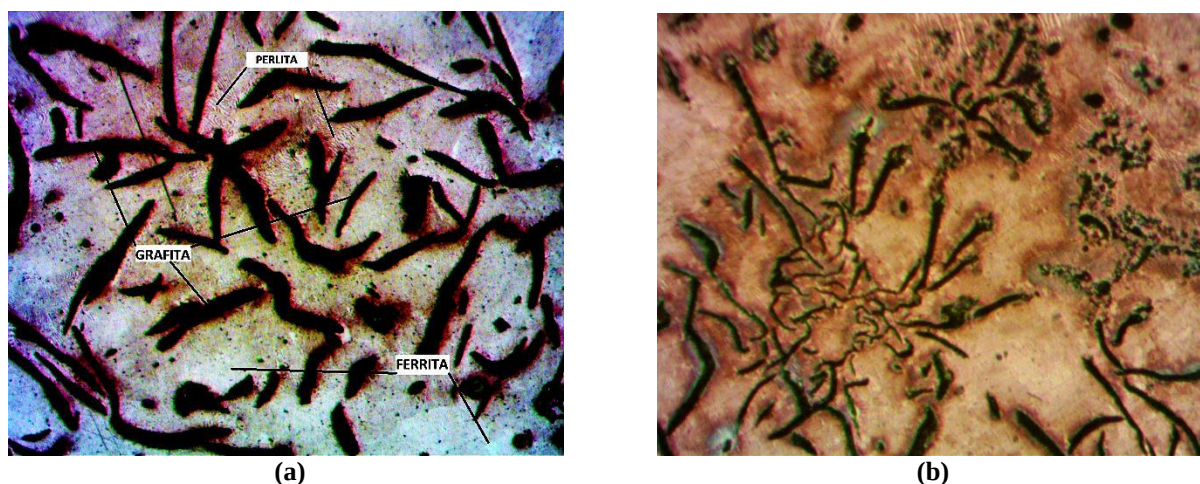


Figura 3. Microestrutura do metal de base (a) e distorção radial em torno de um núcleo de aspecto eutético(b). Ampliação de 400x

Na ZTA as amostras tiveram basicamente uma estrutura martensítica devido à alta taxa de resfriamento, sendo a martensita uma estrutura praticamente inevitável de se eliminar durante a soldagem do ferro fundido cinzento, mesmo com técnicas de pré e pós aquecimento, para Veiga (2011), o uso dessas técnicas pode diminuir significativamente a formação dessas estruturas duras e frágeis. Também houve uma formação de veios de grafita, e em alguns deles apresentara uma distorção radial em torno de núcleos com aspecto eutéticos assim como no metal de base, porém em

menor quantidade. Nas amostras que foram utilizados o resfriamento lento essas distorções foram vistas em maior quantidade do que nas resfriadas em ambiente aberto como pode ser verificado na Figura 4.

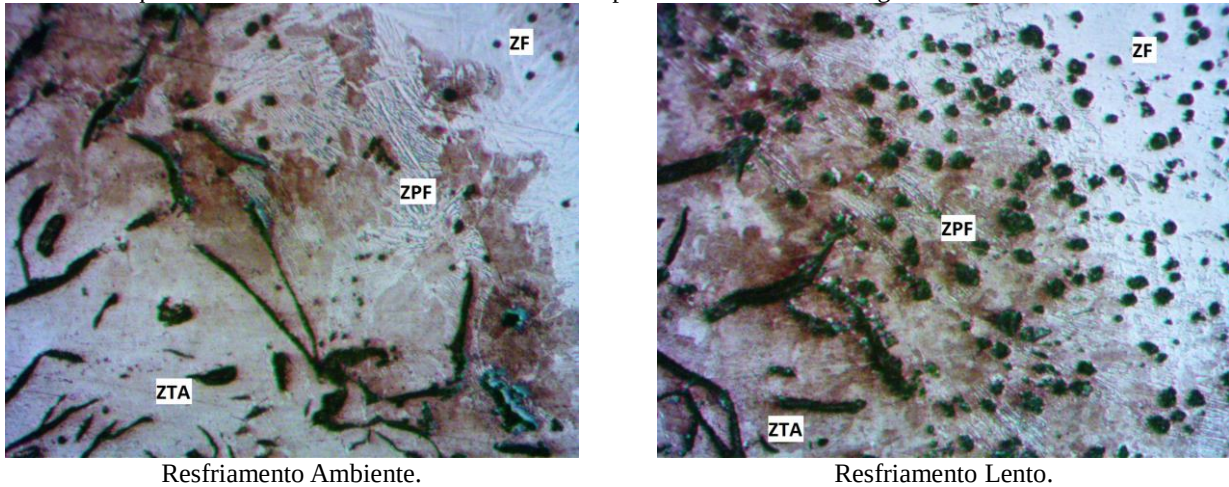


Figura 4. Comparativo entre a ZTA de um material resfriado em ambiente aberto com resfriamento lento. Ampliação de 400x

Conforme Pouranvari (2010) a ZPF é rica em carbono, porém a alta taxa de resfriamento típica da soldagem resulta na formação de carbonetos durante a solidificação, resultando em uma reação eutética. Não houve uma homogeneidade na formação da estrutura na ZPF, porém no geral apresentou estrutura composta de martensita, ledeburita, austenita e flocos de grafita, como pode ser visto na Fig. (5). Na região da parte do metal de base apresentou-se uma matriz martensítica com pequenas partes de ledeburita, houve também a variação na forma da grafita, podendo esta ser em forma de flocos ou em veios, diferenciados principalmente pelo tipo de resfriamento utilizado na amostra. Nas amostras em que foi feito o resfriamento em ambiente aberto, a grafita apresentou-se em maior quantidade na forma de veios, e quando utilizado o resfriamento lento, a mesma apresentou-se em formas de flocos na sua maioria. Na ZPF as amostras apresentaram uma matriz austenítica com flocos de grafita na sua totalidade.

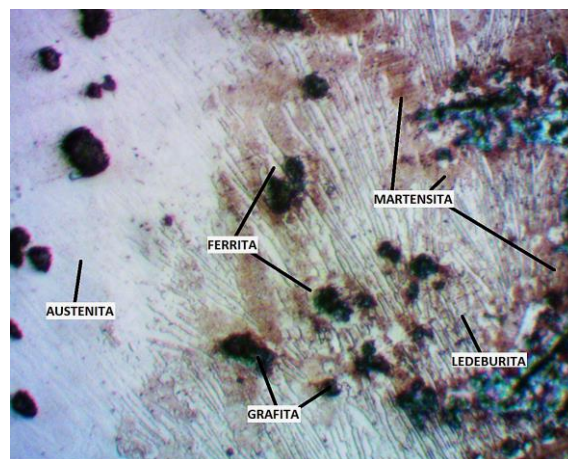


Figura 5. Microestruturas da zona parcialmente fundida. Ampliação de 400x

A zona de fusão apresentou uma matriz austenítica com pequenos nódulos de grafita não dissolvida. De acordo com Askari-Paykani; Shayan; Shamanian (2014), quando usado consumível a base de níquel na soldagem, o excesso de carbono do MB é difundido na ZF, formando a grafita. Também se apresentou a formação de dendritas na interface dos cordões solda, e em algumas amostras a estrutura dendrítica foram observadas em toda a ZF. Para todas as amostras não houve diferença significativa na microestrutura da ZF.

3.2. Resistência ao Dobramento

Foi feito um teste com um corpo de prova sem nenhuma solda, como padrão (amostra 9), para comparação de valores de deformação e força aplicada. O gráfico do diagrama força x deformação do corpo de prova sem solda é mostrado na Fig. (6).

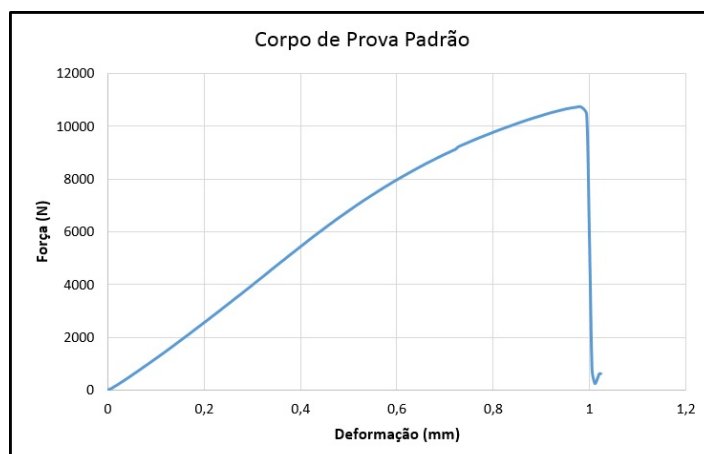


Figura 6. Gráfico de dobramento relacionando força e deformação referente ao material padrão.

Os valores obtidos com o ensaio de dobramento dos corpos de prova em relação ao padrão, mostraram que mesmo com o cordão de solda na maioria das amostras a capacidade de deformação antes da ruptura foi maior do que o próprio padrão. Porém, na força aplicada sobre as amostras houve uma perda de resistência devido a solda. Essa queda na resistência é apresentada na maioria dos corpos de prova, principalmente nas amostras em que o resfriamento foi feito em ambiente aberto, também nas amostras que se usou uma energia de soldagem mais baixa.

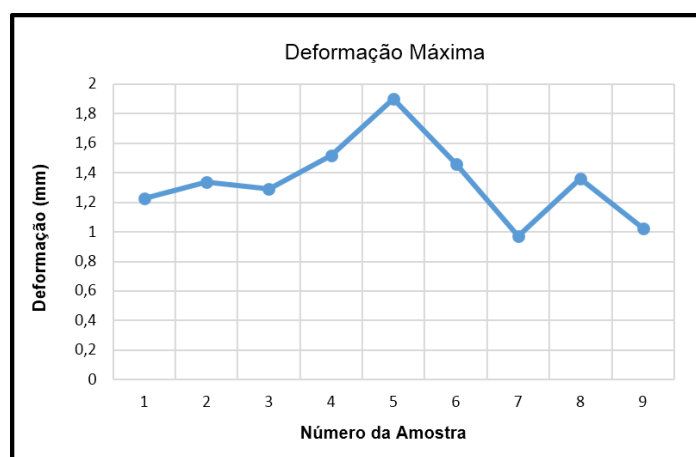


Figura 7. Gráfico de dobramento indicando deformação máxima sofrida em cada corpo de prova.

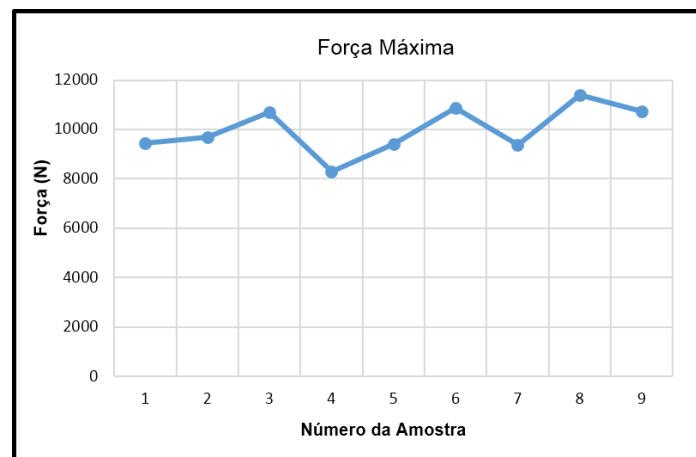


Figura 8. Gráfico de dobramento indicando força máxima aplicada em cada corpo de prova.

Quase todas os corpos de prova romperam-se na ZTA, devido à alta concentração de martensita. Essa microestrutura poderia ter sido reduzida com um tratamento térmico mais adequado, como o recozimento em temperaturas maiores, acima da temperatura eutética (723°C), ou simplesmente, utilizar temperaturas maiores no forno durante o resfriamento. Apenas na amostra 5 houve um rompimento na ZF, o que se justifica pois foi o corpo de prova com a maior deformação analisada. A amostra 8 foi a que precisou de maior força para a ruptura do corpo de prova, e sua deformação foi maior que a da amostra padrão, sendo esses os resultados da condição de resfriamento lento. As Fig. (7) e Fig. (8) mostram os gráficos com os resultados de todas as amostras do ensaio de dobramento.

3.3. Microdureza

Com o uso de técnicas de pré e pós aquecimento das amostras, as diferentes regiões do cordão de solda sofreram alterações em relação a sua dureza. O metal de base não apresentou grandes mudanças na sua dureza, teve uma variação entre 250 e 280HV devido aos níveis de pré-aquecimento. Esse pré-aquecimento resulta em um recozimento do material de base, mesmo sendo aplicado a energia de soldagem.

A ZTA, apesar de formar estruturas duras e frágeis apresentou uma microdureza menor do que a ZPF, porém, a ZTA se estende por uma área muito maior, resultando em maiores chances de rompimento, independente do esforço mecânico na qual a junta soldada é submetida. Os valores da microdureza na ZTA variaram entre 280HV e 340HV, sendo que as amostras que obtiveram uma menor dureza foram as que pré-aquecidas a 400°, e em relação ao tipo de resfriamento, não houve variações significativas.

Na ZPF houve grandes variações nos valores da microdureza, pois é uma das zonas que mais sofre com o calor gerado na soldagem. Os valores variaram entre 330HV e 470HV, podendo essa ser dada pelos parâmetros de soldagem utilizados ou pela incerteza das microestruturas geradas durante a solidificação, pois mesmo com uma análise microscópica não se pôde afirmar em qual tipo de microestrutura foi feita a identificação. Mesmo utilizando de médias aritméticas para a obtenção de resultados, a mudança na dureza das estruturas foi notada com mais sensibilidade na ZPF.

As amostras que apresentaram uma maior diferença na ZF em relação a sua dureza foram as amostras 3 e 5, no qual os parâmetros de variados foram o pré-aquecimento e o método de resfriamento. A amostra 3 teve uma microdureza de 256,2HV enquanto a amostra 5 apresentou 180,7HV. Os valores de todas as microdurezas podem ser vistos na Fig. (9).

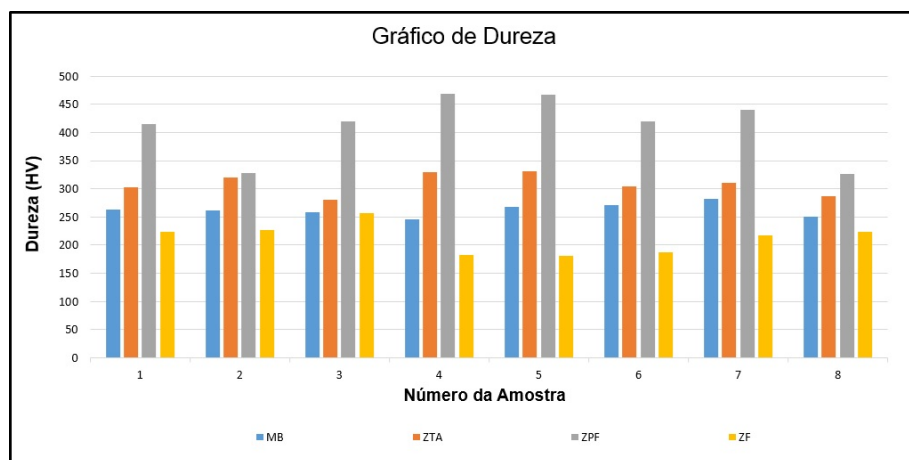


Figura 9. Gráfico de dureza Vickers comparando todas as regiões de cada amostra.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- (1) Quando se usa uma menor energia de soldagem em resfriamento ambiente, a dureza da ZTA é próxima à da amostra na qual se usou uma maior energia de soldagem e resfriamento controlado.
- (2) A deformação devido ao esforço de cisalhamento é maior quando se utilizou uma menor energia de soldagem.
- (3) Na maioria das amostras precisou-se menos força para o rompimento das mesmas quando submetidas ao esforço de dobramento comparado com o padrão.
- (4) Apesar de ser afetado com o calor do pré e pós aquecimento, o metal de base não teve mudanças significativas na sua dureza.
- (5) Quanto menor for a taxa de resfriamento, menor é a dureza da ZPF.
- (6) O resfriamento lento apresentou resultados mais satisfatórios na soldagem de ferros fundidos cinzentos.
- (7) As duas temperaturas de pré-aquecimento apresentaram resultados semelhantes em todos os aspectos estudados, sendo que o pré-aquecimento é uma variável de menor importância para a soldagem dos ferros fundidos cinzentos quando comparado com o tipo de resfriamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina pela oportunidade da realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKARI-PAYKANI, Mohsen; SHAYAN, Mehrdad; SHAMANIAN, Morteza. Weldability of Ferritic Ductile Cast Iron Using Full Factorial Design of Experiment. *Journal Of Iron And Steel Research, International*, [s.l.], v. 21, n. 2, p.252-263, fev. 2014. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1006-706x\(14\)60039-x](http://dx.doi.org/10.1016/s1006-706x(14)60039-x).

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Revisão de André Luiz V. da Costa e Silva. 4. ed. rev. atual. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. 652 p., il. Inclui bibliografia. ISBN 9788521204497.

EL-BANNA, E.m. Effect of preheat on welding of ductile cast iron. *Materials Letters*, [s.l.], v. 41, n. 1, p.20- 26, out. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-577x\(99\)00098-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-577x(99)00098-1).

PARIS, Aleir Antonio Fontana de. Tecnologia da soldagem de ferros fundidos. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2003. 140 p., il. Inclui bibliografia. ISBN 8573910380.

POURANVARI, M.. On the weldability of grey cast iron using nickel based filler metal. *Materials & Design*, [s.l.], v. 31, n. 7, p.3253-3258, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.034>.

VEIGA, Emilio. Processo de Soldagem Eletrodo Revestido. 21. ed. São Paulo: Globus, 2011. 192 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

COBEF2017-0073 - STUDY OF THE INFLUENCE OF PRE-HEATING AND SLOW COOLING ON WELDABILITY OF GREY CAST IRONS USING A PROCESSES OF SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW)

Hector Di Maiochi, hector.maiochi@gmail.com¹

Nathan Bitencourt Pereira, nathanbitencourt@hotmail.com¹

Cleiton de Quadros, cleiton_quadros@yahoo.com¹

Gabriel Costa Souza, gabrielcosta@ifsc.edu.br¹

Fernando Henrique Gruber Colaço, fernandogruber@ifsc.edu.br¹

¹ Instituto Federal de Santa Catarina, Rua dos Imigrantes 445, Bairro Rau – Jaraguá do Sul – CEP 89254-430.

Abstract: *The grey cast iron is broadly used on industry, however it presents difficulties on weldability. The techniques of pre and post heating help control the formation of brittle microstructures, resulting in improved weld. The shielded metal arc welding has been used for being the cheapest and most practical, using a filler metal E9258 (ENiFe-Cl). Eight different conditions of welding have been used, rating the microstructures, the microhardness and the shear stress resistance. The slow cooling has had more satisfactory results in relation to the studied aspect. the quality of the weld is related to the cooling type.*

Key-words: *Grey cast iron, shielded metal arc welding, weldability, slow cooling, pre-heating.*