

# SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR SOLDADO PELO PROCESSO GMAW<sup>1</sup>

Ivan José de Santana<sup>2</sup>  
Elaine Carballo Siqueira Corrêa<sup>2</sup>  
Douglas Marçal Brito Ribeiro<sup>3</sup>  
Cláudio Turani Vaz<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho, as diferentes microestruturas, as propriedades mecânicas e a soldabilidade do ferro fundido nodular submetido ao processo de soldagem GMAW mecanizado com a aplicação de arame de Fe-Ni e proteção de Ar-25%CO<sub>2</sub> foram investigadas. Dentro deste contexto, após a realização de testes de soldagem, com e sem a aplicação de pré-aquecimento, utilizando diferentes parâmetros de soldagem, os cordões de solda foram avaliados por meio de imagens obtidas com a utilização de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, dos perfis de dureza e da composição química do arame e do material depositado. Foi possível avaliar o processo de soldagem, a influência dos diferentes parâmetros elétricos utilizados, a influência da utilização ou não de pré-aquecimento nas microestruturas geradas nas zonas fundidas, parcialmente fundidas e termicamente afetadas dos cordões obtidos e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas.

**Palavras-chave:** Soldagem de ferro fundido; Processo GMAW; Microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido.

## WELDABILITY OF THE NODULAR CAST IRON WELDED BY THE PROCESS GMAW

### Abstract

In this paper, the microstructure, the mechanical properties and the weldability of a ductile cast iron subjected to the mechanized GMAW process employing Fe-Ni solid wire and Ar-25%CO<sub>2</sub> mix as shield gas were evaluated. The experiments were carried out with and without a preheating stage, using several welding parameters. The results were analyzed through optical microscopy, scanning electron microscopy, microhardness and chemical composition tests. The influence of the electrical parameters and the preheating treatment on the microstructure and the mechanical properties of the fusion zone, partially fusion zone and heat affected zone was observed, as well as the whole process.

**Key words:** Welding of the cast iron; GMAW process; Microstructure and the mechanical properties of the cast iron.

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

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Dr., Professor do Depto. de Engenharia de Materiais, Cefet, MG, Brasil,

<sup>3</sup> Graduando, Curso de Engenharia de Materiais, Cefet, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. Metalúrgico, MSc. Professor do IFMG, Congonhas, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Comparando a soldagem dos ferros fundidos com a dos aços, os primeiros são mais difíceis de serem soldados,<sup>(1-4)</sup> mas com o entendimento da natureza do material e de suas especificidades, podem ser adotados alguns procedimentos com o objetivo de eliminar e ou contornar estas dificuldades.<sup>(4)</sup> De uma maneira geral, a dificuldade na soldagem dos ferros fundidos se origina nas seguintes características: (i) alto teor de carbono; (ii) baixa ductilidade; (iii) baixa condutividade térmica; e (iv) formação de carbonetos frágeis.<sup>(4,5)</sup> Além dessas características podem ocorrer na zona termicamente afetada (ZTA) a formação da martensita e na zona fundida (ZF) e zona parcialmente fundida (ZPF) o desenvolvimento de uma rede de carbonetos extremamente frágeis.<sup>(2,4)</sup> Para minimizar os problemas devido à formação dessas microestruturas frágeis na ZF, ZPF e ZTA, as técnicas mais utilizadas são o preaquecimento e o pós-aquecimento dos componentes soldados.<sup>(4,6)</sup> A necessidade de pré-aquecer as peças depende de seu tamanho e de sua forma geométrica, do grau de distorção aceitável, do tipo de ferro fundido e do metal de deposição.<sup>(4,7)</sup> A utilização desta técnica permite reduzir o gradiente térmico formado entre a região soldada, com picos de temperatura acima da temperatura de fusão, e as regiões adjacentes, que, em geral, permanecem com temperaturas próximas à ambiente. Desta forma, o preaquecimento pode prevenir a formação de trincas, reduzir as tensões residuais e distorções e diminuir as taxas de resfriamento. Por outro lado, pode possibilitar o aumento da zona fundida e da zona termicamente afetada.<sup>(4,7)</sup>

Os processos de soldagem a arco elétrico com a utilização de eletrodos revestidos (SMAW), a soldagem a arco elétrico com a utilização de arame e uma fonte externa de gás de proteção (GMAW - *Gas Metal Arc Welding*) e o processo de soldagem com chama oxiacetilênica (OFW) são, de acordo com a literatura, os mais aplicados a soldagem dos ferros fundidos.<sup>(4)</sup>

Contudo, alguns pesquisadores vêm avaliando os processos de soldagem por feixe de elétrons e por fricção.<sup>(8,9)</sup> Quando se solda ferro fundido utilizando o processo de soldagem GMAW aplica-se, basicamente, como material de deposição: (i) ligas de aços com médio e baixo teor de carbono; (ii) ligas de ferro fundido; e (iii) ligas de ferro-níquel ou níquel puro.<sup>(4,10)</sup>

O processo de soldagem GMAW é um dos mais utilizados industrialmente, tanto para a fabricação de peças como na montagem de conjuntos mecânicos, podendo ser aplicado em materiais ferrosos e não ferrosos. Isto se deve principalmente à sua versatilidade, produtividade relativamente elevada, confiabilidade e facilidade de utilização e automatização. Vários modos de transferência metálica, tais como curto-circuito, globular, globular repellido, controlado e spray (goticular) em diferentes formas podem ser obtidos pelo ajuste adequado das condições de operação e ou com a aplicação de fontes com controle eletrônico.<sup>(11-14)</sup>

Alguns dos principais parâmetros responsáveis pela definição do modo de transferência e condições operacionais são o nível de corrente elétrica e a sua polaridade, tensão, diâmetro e composição do arame, comprimento do arco, distancia entre o bico de contato e a peça (DBCP) e a composição do gás de proteção (referência).<sup>(11-14)</sup>

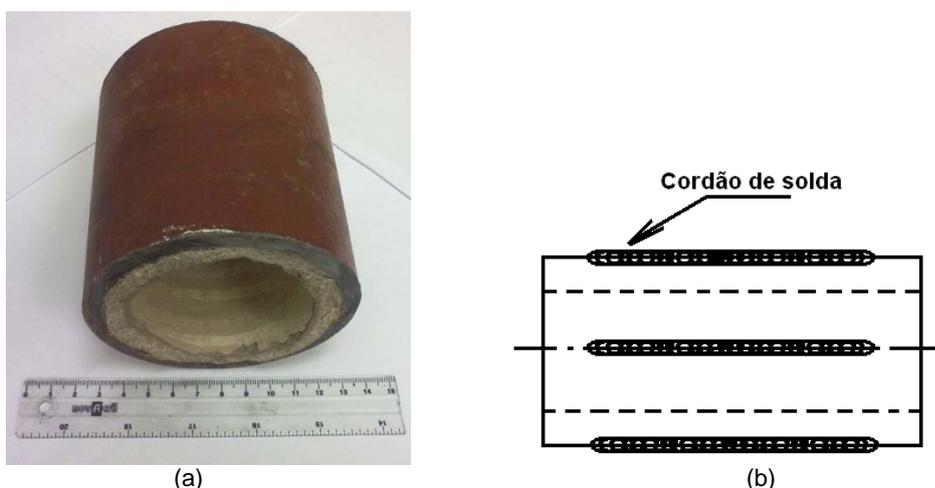
Neste trabalho, buscou-se avaliar as diferentes microestruturas e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas e a soldabilidade especificamente do ferro fundido nodular quando submetido ao processo de soldagem GMAW mecanizado com a aplicação de arame de Fe-Ni e proteção de Ar-25%CO<sub>2</sub>.

Nesse contexto, após a realização de testes de soldagem, com e sem a aplicação de pré-aquecimento, utilizando diferentes parâmetros de soldagem, avaliou-se os cordões de solda por meio de imagens obtidas com a utilização de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, dos perfis de dureza e da composição química do arame e do material depositado.

Foi possível avaliar o processo de soldagem, a influência dos diferentes parâmetros elétricos utilizados, a influência da utilização ou não de pré-aquecimento nas microestruturas geradas nas zonas fundidas, parcialmente fundidas e termicamente afetadas dos cordões obtidos e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados neste trabalho para a realização dos testes de soldagem (deposição de cordões sobre tubo) tubos de ferro fundido nodular centrifugado com revestimento interno de argamassa (Figura 1a). Esses tubos são aplicados, por exemplo, no escoamento de fluidos como rejeitos orgânicos. Quando submetidos à baixa pressão, os tubos mencionados são conectados por meio de rosca, porém para pressões maiores devem ser soldados para atender às normas específicas, daí a motivação para sua utilização no trabalho. Todos os corpos-de-prova foram inicialmente submetidos a um processo de usinagem (torneamento) para a retirada da tinta que recobre a superfície. Foram realizados quatro cordões (a 90° um do outro) em cada corpo-de-prova no sentido do eixo longitudinal do tubo (Figura 1b).



**Figura 1.** (a) Foto de um dos corpos-de-prova (tubo de ferro fundido nodular revestido com argamassa); e (b) desenho esquemático da localização dos cordões de solda.

Os testes de soldagem foram realizados de maneira mecanizada (Figura 2) com uma fonte de soldagem (VI 475 White Martins) de tensão constante aplicando corrente contínua com polaridade inversa.

Foram realizados dois tipos de experimentos para cada condição de soldagem e quatro testes para cada experimento: (i) testes de soldagem com os corpos-de-prova a temperatura ambiente; e (ii) testes de soldagem com os corpos-de-prova pré-aquecidos a 300°C. Os parâmetros de soldagem utilizados podem ser observados na Tabela 1.

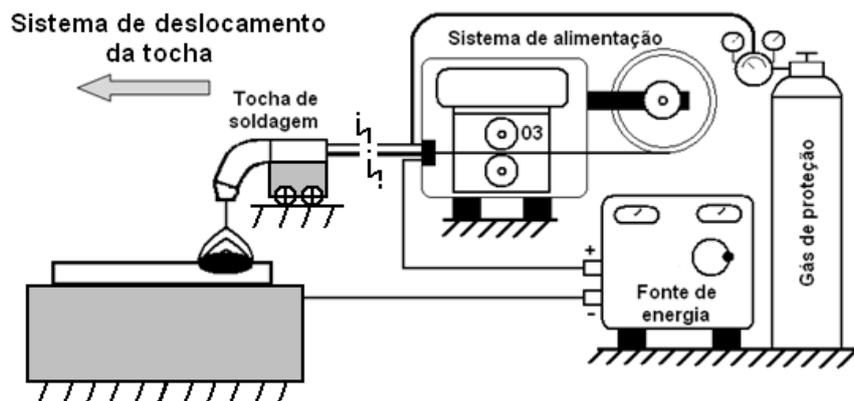


Figura 2. Desenho esquemático do procedimento/equipamento utilizados nos testes de soldagem.

Durantes os testes de soldagem buscou-se obter cordões com a mesma morfologia (altura e largura) no intuito de manter a mesma quantidade de material depositado entre os cordões, e para que este parâmetro não afetasse a diluição nos cordões depositados. Dessa maneira seria possível observar a influência do pré-aquecimento e dos parâmetros elétricos utilizados na diluição por meio de análise química.

As Tabelas 1 e 2 revelam os parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos com e sem pré-aquecimento. Estes foram escolhidos após se obter uma condição de soldagem que gerasse cordões depositados visualmente aceitáveis, condição 01SP, a partir do qual a tensão em vazio passou a ser o parâmetro avaliado (com incrementos de 1 Volts).

Tabela 1. Parâmetros elétricos utilizados nos testes de soldagem sem pré-aquecimento

Teste de Soldagem <b>sem</b> pré-aquecimento						
Teste	$V_d^1$ [mm/min]	$V_0^2$ [V]	$V_a^3$ [m/min]	DBCP <sup>4</sup> [mm]	Gás proteção <sup>5</sup> [L/min]	Corrente <sup>6</sup> [A]
01SP	0,175	30	3,25	15	15	145
02SP	0,175	31	3,25	15	15	145
03SP	0,175	32	3,25	15	15	140
04SP	0,175	33	3,25	15	15	140

Obs:  $V_d$  - Velocidade de deslocamento da tocha;  $V_0$  - tensão em vazio da fonte;  $V_a$  - velocidade de alimentação do arame; DBCP - Distância entre o bico de contato e a peça; (5) Ar25-CO<sub>2</sub> e (6) - corrente média de soldagem.

Tabela 2. Parâmetros elétricos utilizados nos testes de soldagem com pré-aquecimento

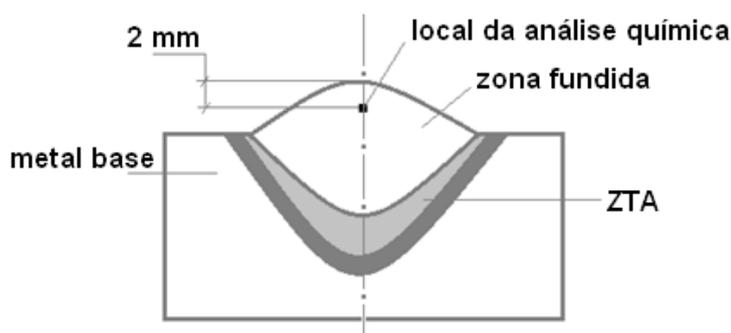
Teste de Soldagem <b>com</b> pré-aquecimento - 300°C						
Teste	$V_d$ [mm/min]	$V_0$ [V]	$V_a$ [m/min]	DBCP [mm]	Gás proteção [L/min]	Corrente [A]
01CP	0,175	30	3,25	15	15	130
02CP	0,175	31	3,25	15	15	145
03CP	0,175	32	3,25	15	15	140
04CP	0,175	33	3,25	15	15	150

A Tabela 3 revela as características do arame e os parâmetros operacionais recomendadas pelo fabricante.

Tabela 3. Características do arame (maciço) e parâmetros operacionais de soldagem recomendados

Arame	Diâmetro [mm]	Tensão [V]	Corrente [A]	DBCP [mm]	Gás de proteção 75% Ar + 25%CO <sub>2</sub>	Tranferência matálica
Ni -Fe	1,2	26 - 29	100 - 175	15 ± 3	12 - 16 l/min	Spray

Após a realização dos testes de soldagem, os corpos-de-prova foram cortados para o preparo das amostras destinadas aos ensaios metalográficos, microdureza e análise química. Para a análise microestrutural, as amostras foram preparadas por meio de corte com disco abrasivo, embutimento a frio com resina de poliéster, lixamento, polimento e ataque com reativo Nital 2% ou Nital 5%. Os valores de dureza foram obtidos por meio de ensaio de dureza Vickers e os perfis de dureza da ZF, ZPF e ZTA dos corpos-de-prova foram obtidos por meio do ensaio de microdureza Vickers (carga de 50 gf, tempo de aplicação de 15 s). A análise química semi-quantitativa dos eletrodos, assim como dos cordões de solda, foi realizada utilizando um equipamento de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX). Nos cordões depositados a análise química foi realizada próximo à extremidade dos cordões depositados (2 mm) (Figura 3). Tal procedimento foi arbitrariamente determinado para possibilitar uma análise da diluição observada nos cordão de solda. Este equipamento, em função do seu detector, não é capaz de identificar elementos químicos com tamanho de átomo reduzido, tal como o carbono. Portanto, os valores referentes ao teor de carbono não pode ser revelado, mas a análise se justifica uma vez que possibilitaria a identificação de elementos de liga importantes, tais como níquel, cromo, manganês etc.

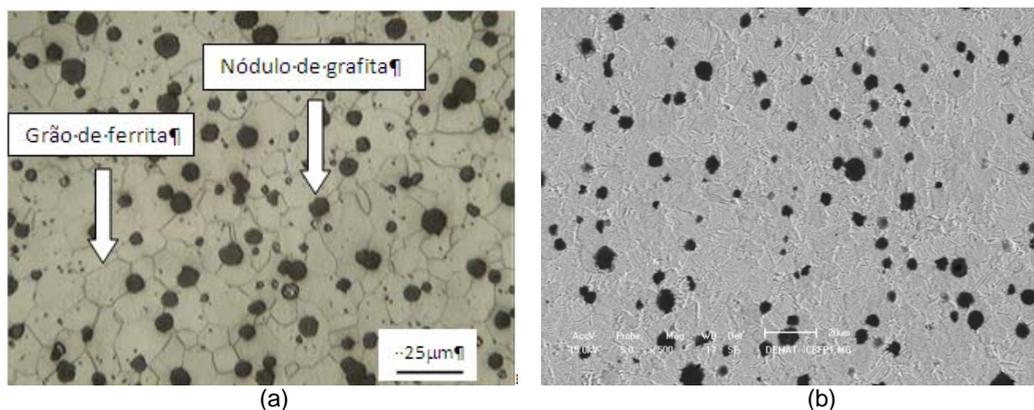


**Figura 3.** Desenho esquemático região onde foram realizadas as análises químicas nos cord dos cordões de solda.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 4a e 4b exibem imagens da microestrutura do material do tubo usado nos testes de soldagem obtidas por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), respectivamente. Pode-se observar que se trata de um ferro fundido nodular com matriz ferrítica,<sup>(1,2,4,5)</sup> o que confere ao material baixa dureza e, aliado à morfologia da grafita nessa situação, boa ductilidade, podendo chegar a algo próximo de 20% de alongamento em ensaios de tração.<sup>(5)</sup>

A Tabela 4 exhibe a composição química do material do tubo e, como pode ser observado, não foi possível identificar o teor de carbono em função das limitações do equipamento, como descrito na metodologia. Porém, essa análise permitiu verificar a inexistência de diferentes elementos de liga importantes, tal como o Níquel. Além disso, possibilitou a determinação dos valores aproximados de manganês e silício e a constatação de que se trata de uma liga de ferro fundido convencional e comercial.<sup>(2,5)</sup>



**Figura 4.** Imagens da microestrutura do material do tubo: (a) microscopia ótica; e (b) MEV. ataque nital 2%.

**Tabela 4.** Composição do tubo

Elemento (%)	Material do tubo
Ferro + Carbono*	97,98
Silício	2,57
Manganês	0,27
Fosforo	0,18

Obs: \* O carbono não é detectado pelo equipamento utilizado na análise, como relatado no item 2, e para fechar o balanço de massa a porcentagem de ferro é ajustada.

A Tabela 5 exibe os resultados referentes à composição química do arame utilizado como metal de deposição. Percebe-se que o níquel é o elemento predominante, o que se justifica pelo fato de ser um elemento gamagêneo, pela sua baixa condutividade térmica e ao seu baixo coeficiente de dilatação volumétrica, fatores que favorecem a soldabilidade dos ferros fundidos.<sup>(4)</sup>

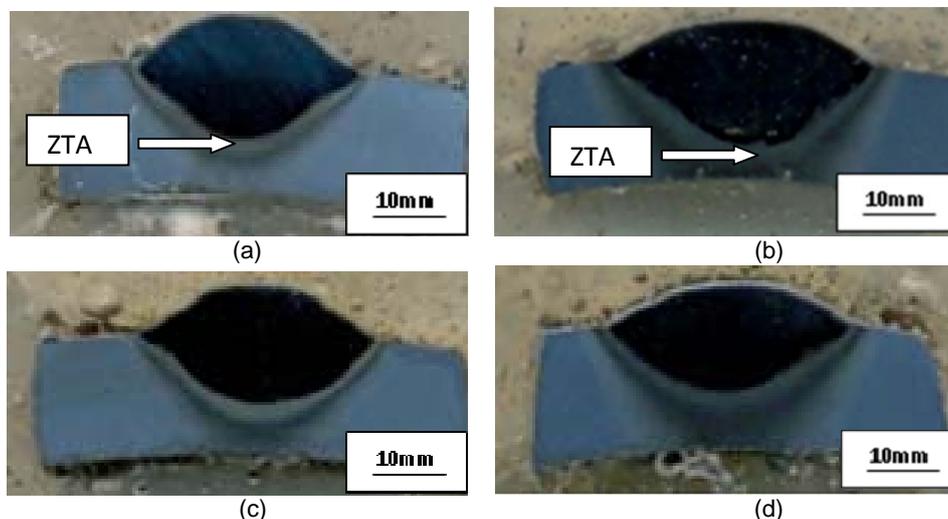
**Tabela 5.** Composição do arame

Elemento	Arame Eletrodo (%)
Ferro +Carbono	36,25
Níquel	60,83
Cromo	1,24
Manganês	0,97
Silício	0,71

A Figura 5 exibe exemplos de imagens obtidas a partir das macroestruturas geradas quando foram realizados testes 03SP, 03CP, 04SP e 04CP, respectivamente. Após avaliação visual, todos os cordões de solda obtidos foram considerados, de maneira qualitativa, como apropriados para compor uma junta soldada em relação ao aspecto visual e a morfologia. Em relação a aspectos que poderiam dar um enfoque quantitativo, nenhum cordão obtido apresentou descontinuidades, tais como mordedura, poros, inclusão de escória, trincas etc. Portanto, arbitrariamente, admitisse que os parâmetros de soldagem utilizados (transferência metálica por curtos-circuitos) nos diferentes testes podem ser considerados adequados para a obtenção de cordões de solda de qualidade.

Percebe-se que, em função da aplicação ou não do pré-aquecimento, a extensão da ZTA sofre grande variação. Os testes realizados sem pré-aquecimento (Figuras 5a e 5c), apresentam, uma extensão termicamente afetada muito menor (menos da metade) em comparação com os testes realizados com pré-aquecimento

(Figuras 5b e 5d). Isto se deve à ocorrência de temperaturas de pico acima da temperatura de recristalização em regiões mais afastadas do cordão, possibilitando, mudanças de fases, alteração na morfologia da grafita, crescimento ou refino de grão, que dependerá da posição em relação à poça de fusão.<sup>(1,2,4,5)</sup>



**Figura 5.** Imagens da macroestrutura dos cordões de soda: (a) teste “03SP”, sem pré-aquecimento, (b) teste “03CP”, com pré-aquecimento, (c) testes “04SP”, sem pré-aquecimento, e (d) Eletrodo “04CP”, com pré-aquecimento. Ataque Nital 5%.

As Tabelas 6 e 7 exibem os resultados referentes as análises químicas realizadas nos cordões de solda depositados. Percebesse que os valores dos elementos de liga diminuem em relação ao metal de deposição, sobretudo, os valores relativos ao níquel que cai drasticamente (de 60% (Tabela 5), para aproximadamente 28%) em função do efeito da diluição entre o arame e o metal base.

**Tabela 6.** Composição dos cordões depositados, testes *sem* pré-aquecimento

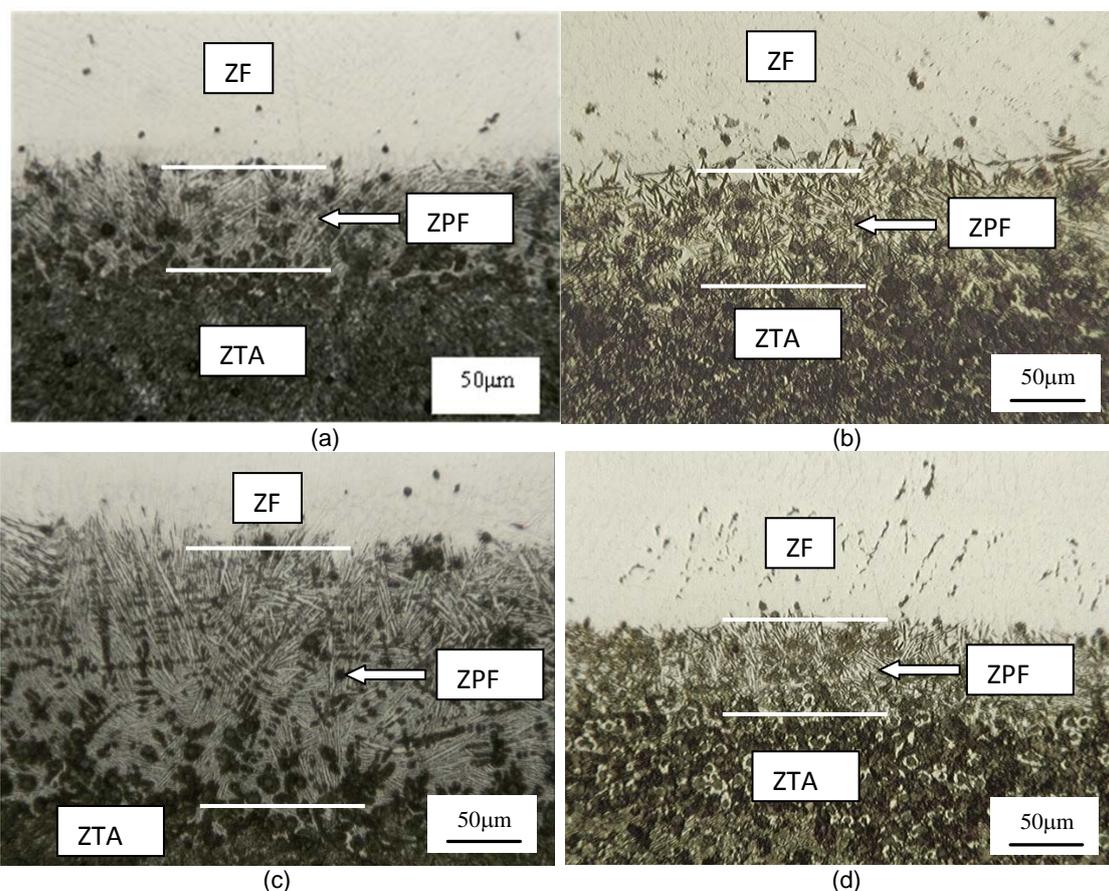
Elemento / Corpo de Prova	01SP 30V	02SP 31V	03SP 32V	04SP 33V
Ferro	69,3%	69,1%	70,1%	70%
Níquel	28,4%	28,5%	27,5%	26,8%
Silício	1,2%	1,0%	0,9%	1,4%
Manganês	0,4%	0,4%	0,5%	0,4%
Cromo	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%
Outros	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço

Verificasse uma tendência de uma maior diluição nos corpos-de-prova com pré-aquecimento, que pode ser constatada quando se compara os valores referentes aos teores de níquel. O níquel é um elemento gamagêneo, portanto tende a estabilizar a austenita na temperatura ambiente, o que, de certa forma pode favorecer a soldabilidade do ferro fundido uma vez que esta fase permite maior deformação plástica da zona fundida que possibilita uma absorção de tensões e dificulta a propagação de trincas.<sup>(1,2,5,6)</sup> O níquel, também, aumenta a tolerância ao enxofre e ao fósforo, o que aumenta a resistência a trinca a quente.<sup>(6)</sup>

**Tabela 7.** Composição dos cordões depositados, testes com pré-aquecimento

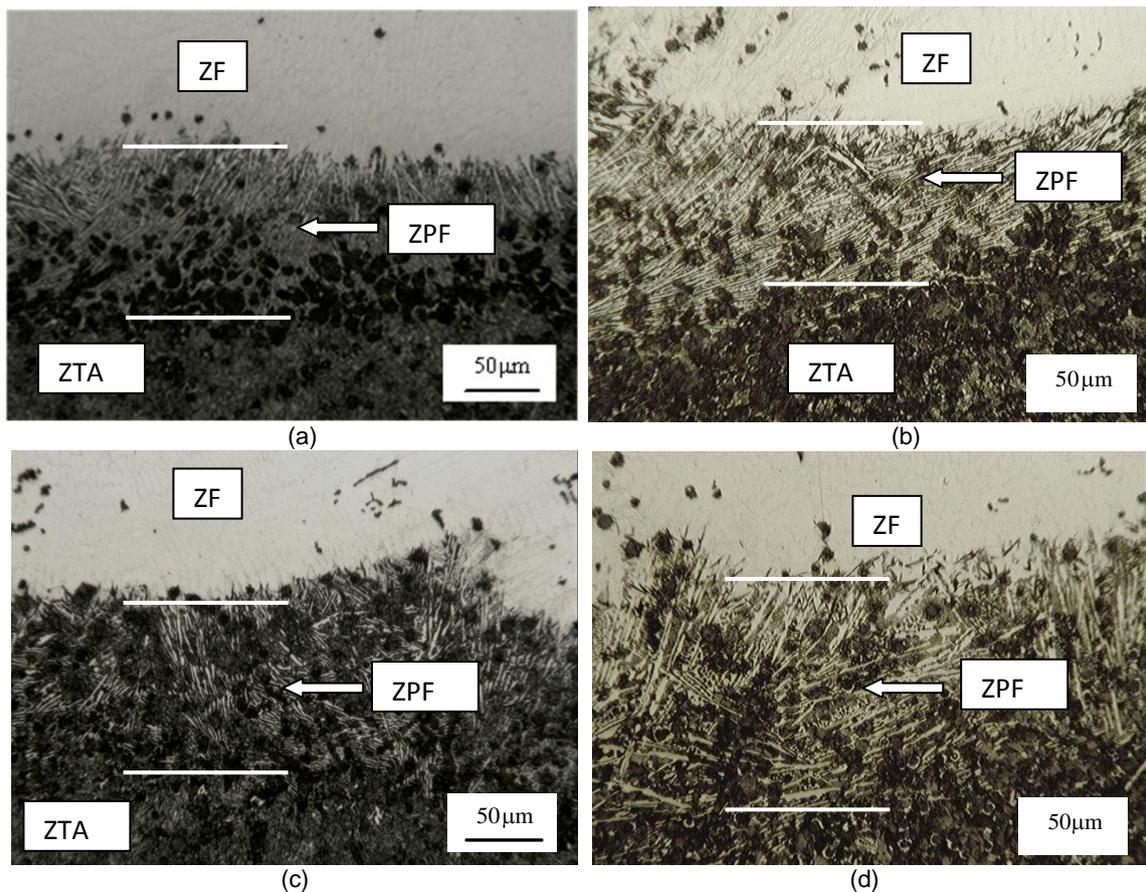
Elemento / Corpo de Prova	01CP 30V	02CP 31V	03CP 32V	04CP 33V
Ferro	71%	72,6%	70,1%	73,8%
<b>Níquel</b>	<b>26,4%</b>	<b>24,9%</b>	<b>27,5%</b>	<b>22,8%</b>
Silício	1,5%	1,5%	1,2%	1,3%
Manganês	0,5%	0,4%	0,4%	0,4%
Cromo	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
Outros	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço

As Figuras 6 e 7 exibem exemplos de imagens das microestruturas geradas nos cordões quando foram realizados testes 01SP; 01CP; 02SP, 02CP, 03SP, 03CP, 04SP e 04CP, respectivamente.



**Figura 6.** Fotomicrografia dos cordões de solda: (a) teste “01SP”, sem pré aquecimento; (b) teste 01CP, com pré-aquecimento; (c) teste 02SP, sem pré aquecimento; e (d) teste 02CP, com pré-aquecimento. Ataque Nital 2%. ZPF – Zona parcialmente fundida.

Todos os cordões obtidos apresentaram predominantemente uma estrutura austenítica com uma pequena quantidade de grafita esférica na ZF. Os cordões obtidos sem pré-aquecimento (Figuras 6a e 6c e Figuras 7a e 7c), de maneira geral apresentaram um pouco de ferro fundido branco na ZPF, com agulhas de cementita num fundo de ledeburita e grafita esférica<sup>(1,2,4-7)</sup> e, também, ferro fundido esférico com matriz martensítica no início da ZTA. Pode-se perceber que no cordão referente a condição 02SP (Figura 6c), que a ZPF apresenta uma quantidade ainda maior de ferro fundido branco em relação as condições 01SP, 03SP e 04SP, e que este apresenta uma quantidade maior de dendritas circundadas de ledeburita.<sup>(1,2,4,5)</sup>



**Figura 7.** Fotomicrografia dos cordões de solda: (a) teste 03SP<sup>o</sup>, sem pré aquecimento; (b) teste 02CP, com pré-aquecimento; (c) teste 04SP, sem pré aquecimento; e (d) teste 04CP, com pré-aquecimento. Ataque Nital 2%. ZPF – Zona parcialmente fundida. Fonte:

A Figura 8 exibe os perfis de dureza dos cordões obtidos nos testes 01SP; 02SP, 03SP, 04SP, sem pré-aquecimento de 300°C. Pode se observar que os cordões depositados nos testes 02SP e 03SP apresentaram os maiores valores de dureza, o que esta em consonância com as microestruturas observadas nas Figuras 6c e 7a, que revelam uma maior quantidade de ferro fundido branco contendo dendritas circundadas de ledeburita nas proximidades da linha de fusão.<sup>(2,11,12)</sup>

Nas proximidades da linha de fusão o valor de dureza média fica próximo de 700 HV, o que pode ser considerado um valor de dureza alto (similar a um aço AISI 1045 temperado) conferindo a essa região, conseqüentemente, alta fragilidade. Esta estrutura frágil aliada às tensões residuais, frequentemente geradas nos procedimentos de soldagem, podem levar ao aparecimento de trincas e até mesmo a fratura da junta, fato que contribui para a baixa soldabilidade atribuída aos ferros fundidos.

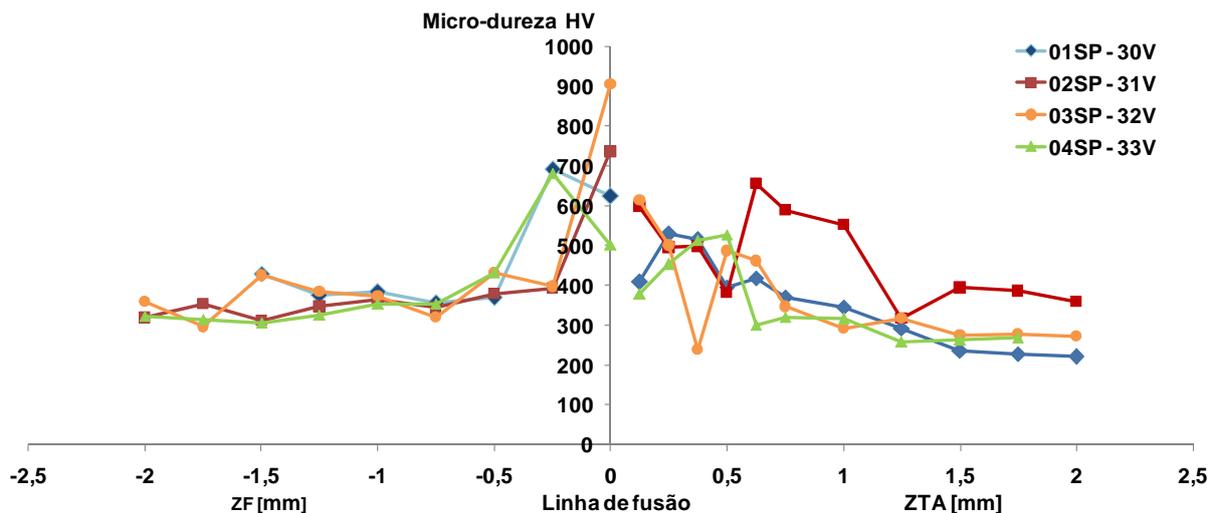


Figura 8. Perfil de dureza dos cordões depositados a partir da linha de fusão, sem pré-aquecimento.

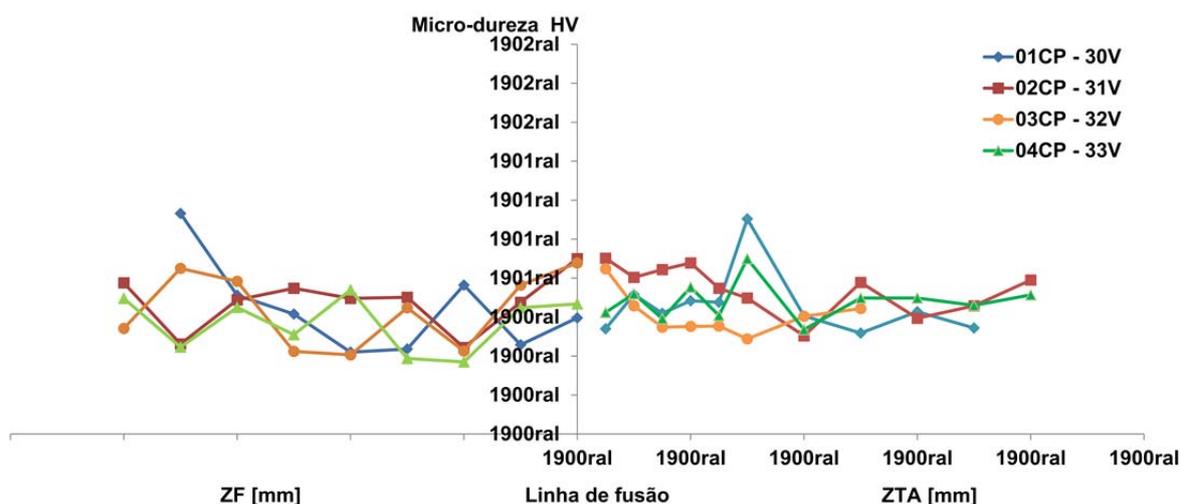


Figura 9. Perfil de dureza dos cordões depositados a partir da linha de fusão, com pré-aquecimento de 300°C.

Em relação à ZTA, o pré-aquecimento fez com que os valores de dureza em todos os cordões obtidos (diferentes parâmetros de soldagem) fossem menores em relação à situação sem pré-aquecimento, o que se deve, principalmente, ao fato deste impossibilitar o aparecimento de uma estrutura típica de ferro fundido branco e sim, predominantemente, ferro fundido cinzento com formação de martensita (Figuras 6c e 6d e Figuras 7c e 7d).<sup>(1,2,4,5,15)</sup>

Por fim, percebe-se que o processo GMAW é uma excepcional opção de processo para a soldagem de ferro fundido possibilitando, como para outros materiais, após a determinação dos parâmetros de soldagem adequados, repetibilidade, fácil mecanização ou automatização, e obtenção de cordões com morfologia e microestruturas que podem ser ajustadas às condições específicas. Com relação ao pré aquecimento de 300°C, este procedimento se mostra realmente relevante em relação à microestrutura formada nos cordões depositados quando se aplica o processo GMAW na soldagem do ferro fundido nodular, sobretudo na região da ZF e ZPF e em relação aos valores máximos de dureza.

## 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos conclui-se que:

- a estrutura do ferro fundido nodular, em função da adequação do processo de soldagem e consumíveis, pode favorecer a obtenção de cordões de solda sem a presença de trincas, uma vez que possui uma morfologia de grafita menos favorável à evolução de trincas e matrizes compostas, principalmente, de ferrita, fase com boa possibilidade de acomodar tensões residuais oriundas do ciclo térmico e não uniformidade estruturais;
- o processo GMAW é uma excepcional opção, também, para a soldagem de ferro fundido, possibilitando, como para outros materiais, após a determinação dos parâmetros de soldagem adequados, repetibilidade, fácil mecanização ou automatização, e obtenção de cordões com morfologia e microestruturas que podem ser ajustadas às condições específicas e desejadas;
- a aplicação de pré-aquecimento fez com que a extensão da ZTA aumentasse em função da ocorrência de temperaturas de pico acima da temperatura de recristalização em regiões mais afastadas do cordão, porém os valores máximos de dureza ficam bem menores em relação a condição de soldagem sem pré-aquecimento (aproximadamente 350 HV, com pré-aquecimento e aproximadamente 700 HV, sem pré-aquecimento);
- o pré-aquecimento a 300°C, também, possibilitou uma maior diluição entre o metal de deposição e o metal base, o que certamente contribuiu para a diminuição da dureza na ZPF, porém para algumas situações isto possa ser um descontinuidade relevante; e
- outra ponderação que pode ser feita diz respeito à maior facilidade de se eliminar a estrutura martensítica observada nos cordões de solda com pré-aquecimento, que pode ser mais facilmente eliminada em relação à estrutura típica de ferro fundido branco, com a aplicação, por exemplo, de tratamento térmico de normalização, por se tratar de uma fase metaestável.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio, assim como ao Departamento de Engenharia de Materiais (Demat - Cefet MG) pela possibilidade de utilização da infra-estrutura laboratorial e a Eutectic do Brasil pelo fornecimento dos arames empregados nos experimentos. Em particular os autores agradecem ao Prof. Alexandre Queiroz Bracarense pelo apoio e pela possibilidade de utilização da infra-estrutura do laboratório de Robótica Soldagem e Simulação (LRSS) do Demec/UFMG.

## REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.
- 2 COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.
- 3 ISHIZAKI, K.; MORA, J. G.; SALAS, M. M.; DAVILA, A.. **Simulation Study on Ductile Cast Iron Welding by Austenitic Filler Metal**. Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 15, Nº 2, p. 3-8, October 1984..
- 4 PARIS, A. A. F. **Tecnologia da soldagem de ferros fundidos**. Santa Maria: UFSM, 2003. 144p.

- 5 GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blücher, 2009. 344p.
- 6 POURANVARI, M. **On the weldability of gray cast iron using nickel based filler metal**. Materials and Desing. V. 31, p. 3253-3258, 2010.
- 7 El-Banna, E.M.. **Effect of preheat on welding of ductile cast iron**. Materials Letters V. 41, p. 20 – 26, 1999.
- 8 HATATE M, SHIOTA T, ABE N, AMANO M, TANAKA T. **Bonding characteristics of spheroidal graphite cast iron and mild steel using electron beam welding process**. Vacuum, v. 73, p. 667–71, 2003.
- 9 SAWADA Y. K.; NAKAMURA, M.. **Lapped friction stir welding between ductile cast irons and stainless steels**. Quart J Jpn Weld Soc, v. 27, p. 176–82, 2009.
- 10 EL-BANNA, E. M.; NAGEDA, M. S.; ABO EL-SAADAT, M.M. **Study of restoration by welding of perlitic ductile cast iron**. Materials Letters, v. 42, p. 311-320, 2000.
- 11 CARY, H. B.. **Modern welding technology**. 4 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.780p.
- 12 ASM. **Gas-metal arc welding**. Welding Handbook. 2.ed., v.6, 1994. p. 569-581.
- 13 SCOTTI, A; PONOMAREV, V.. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Editora Artliber, 2008. 284p.
- 14 MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.. **Soldagem - fundamentos e tecnologia**. 3. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362p.
- 15 BEHNAM, M. M. J.; DAVAMI, P.; VARAHRAM, N.. **Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties**. Mater. Sci. Eng. A. doi:10.1016/j.msea.2010.09.087, p. 1 - 6, 2010.