

Normalmente a soldagem do ferro fundido ocorre em reparo ou manutenção, visto que o processamento de componentes de ferro fundido * é necessariamente por fundição, usualmente da peça semi-acabada (com usinagem posterior) ou mesmo acabada. Como todo o tipo de **soldagem de manutenção**, esta soldagem apresenta grande complexidade devido às diferentes geometrias e tamanhos de componentes avariados, exigindo uma análise caso a caso para a determinação do procedimento mais adequado. Para auxiliar a determinação do procedimento de soldagem a ser adotado este artigo procura abordar as principais características do ferro fundido e quais os procedimentos usuais de soldagem para este tipo de material.

Annelise Zeemann

A Soldagem por Fusão para Reconstrução de Componentes de Ferro Fundido

Palavras-chave: Ferros fundidos, soldagem de construção, manutenção

Características Metalúrgicas do Ferro Fundido

Os ferros fundidos são ligas Fe-C que apresentam grande quantidade de carbono em sua composição química (sempre superior a 2%). Existem diversos tipos de ferros fundidos, com propriedades típicas apresentadas na tabela 1 (para os ferros fundidos não-ligados), cujas principais diferenças são relativas à composição química e aos tratamentos térmicos impostos em seu processamento.

O **ferro fundido branco** não é utilizado em qualquer aplicação estrutural pois apresenta grande quantidade de cementita (leia quadro) e é extrema-

mente frágil, trincando-se facilmente. Sua estrutura se forma sempre que existe o resfriamento rápido, a partir de elevada temperatura ou do líquido, de qualquer outro tipo de ferro fundido.

O **ferro fundido cinzento**, cujas especificações podem ser encontradas na norma ASTM A 48 nas classes 20 a 60 (relacionadas à resistência mecânica, em ksi), é muito utilizado em estruturas e componentes de máquinas. Apresenta o carbono livre, na forma de grafita em veios, devido à presença do silício que acelera a decomposição da cementita, de forma que reduz muito a quantidade deste constituinte frágil que é a cementita, formando um constituinte rico em carbono (a grafita) que no entanto é

Tabela 1 Características de diferentes tipos de ferros fundidos não-ligados.

Tipo de Ferro Fundido	Composição Química (% peso)					Propriedades Típicas		
	C	Si	Mn	P	S	Dureza (HB)	Limite de Resistência	Ductilidade
Branco	1,8	0,5	0,25	0,06	0,06	sem dados	sem dados	inexistente
	3,6	1,9	0,8	0,2	0,2			
Cinzento	2,5	1,0	0,2	0,002	0,02	máx. entre 180 a 260	20 a 60 ksi (130 a 410MPa)	muito baixa
	4,0	2,8	1,0	1,0	0,25			
Dúctil	3,0	1,8	0,1	0,01	0,01	entre 140 a 300 sem tratamento Até 550 com austêmpera	entre 20 a 200 ksi (130 a 1380MPa)	entre 3 a 20% de alongamento
	4,0	2,8	1,0	0,1	0,03			
Maleável	2,2	0,9	0,15	0,02	0,02	entre 140 a 300	entre 40 a 105 ksi (270 a 720MPa)	entre 1 a 20% de alongamento
	2,9	1,9	1,2	0,2	0,2			

* Este artigo não trata sobre ligas para resistência ao desgaste ou à corrosão

macio. Como o carbono se concentra nas grafitas o restante do material fica com menor carbono e sua composição passa a ser similar a de um aço, ou seja, este tipo de ferro fundido é como um aço que contém grafitas em veios, sendo que o aço (da matriz) pode ser ferrítico, ferrítico-perlítico ou perlítico dependendo da composição (principalmente do teor de manganês) da liga.

O **ferro fundido dúctil** apresenta enorme gama de aplicações devido à combinação de propriedades de resistência mecânica com tenacidade, usinabilidade e baixo custo, podendo ser especificado segundo diferentes normas, sendo citada a mais geral ASTM A 536. Utiliza-se em estruturas, tubulações e conexões fundidas, e até em eixos e engrenagens (normalmente com tratamento térmico). Sua estrutura é parecida com a do ferro fundido cinzento, com a diferença que as grafitas se apresentam na forma de nódulos pois durante a solidificação foi utilizado o elemento magnésio ou o cério para nodularizar a grafita. O fato da grafita se apresentar com a morfologia esférica faz com que este "compósito" de aço com nódulos de grafita apresente maior ductilidade.

O **ferro fundido maleável** é parecido com o ferro fundido dúctil, sendo que a formação da grafita, em "cachos", ocorre por tratamento térmico, e não por adição de magnésio ou cério, o que encarece um pouco o produto, largamente utilizado na indústria automotiva em eixos de compressor, engrenagens de transmissão, juntas universais, entre outras aplicações. Algumas especificações são: ASTM A 47 (matriz ferrítica); ASTM A 220 (matriz perlítica) e ASTM A 602 (indústria automotiva).

Depois de apresentadas as características principais dos ferros fundidos cabe comentar que existem ferros fundidos com resistência mecânica tão boa quanto à dos aços estruturais **apesar de possuírem %C pelo menos 10 x superior** (o que faz com que o *carbono equivalente* da liga se situe na ordem de 3,0 a 5,0%) o que com certeza é um fator complicador na soldagem de qualquer tipo de ferro fundido.

Outra constatação importante diz respeito ao alongamento do material (medida de sua ductilidade) que varia dependendo do tipo de ferro fundido, mas que é sempre muito menor do que a de um aço.

Os **ferros fundidos dúcteis** e maleáveis são aqueles que apresentam **a maior capacidade de acomodar tensões**, e por isso são os que evidenciam menor risco de trincamento na soldagem.

Transformações que a Soldagem Promove nos Ferros Fundidos

Existem duas preocupações básicas na soldagem do ferro fundido, que são:

- *as alterações sofridas nas regiões aquecidas* (zona termicamente afetada - ZTA), visto que (como mencionado anteriormente) qualquer ferro fundido quando resfriado rapidamente pode se tornar um ferro fundido branco extremamente frágil ou um aço temperado (dependendo da temperatura atingida); e
- *o quanto se introduz de carbono do ferro fundido na poça de fusão*, cuja composição depende do tipo de consumível a ser adotado.

Para melhor exemplificar quais as preocupações na soldagem do ferro fundido está ilustrada na figura 1 a região de cordão de solda depositado sobre um componente de ferro fundido nodular de matriz ferrítica (que é o ferro fundido de maior ductilidade) utilizando um eletrodo tipo AWS E 6013 (e portanto de aço baixo carbono) e preaquecimento na ordem de 150°C (que seria um procedimento típico para um componente de aço ao carbono de dimensões significativas).

Constata-se que:

- o metal de solda (MS) se apresenta totalmente martensítico com dureza na ordem de 60 HRc com trincas mesmo sem ter sido solicitado mecanicamente, devido ao tensionamento residual e ao de transformação martensítica;
- existe uma larga região no metal de solda próxima à zona de ligação (ZL) que é uma região de alta diluição (AD) onde a estrutura é similar a de um ferro fundido branco, e portanto frágil.
- existe uma região da ZTA com uma faixa martensítica típica de um aço temperado e não revenido, muito frágil e susceptível ao trincamento a frio.

Os efeitos deste procedimento de soldagem demonstram ser um procedimento proibitivo para o componente em questão. Por quê ?

1. Mesmo que a soldagem seja realizada com baixa diluição (fundindo pouco o metal de base) a introdução de carbono do ferro fundido em um metal de solda de aço baixo carbono torna o aço extremamente temperável e é praticamente impossível evitar o endurecimento.

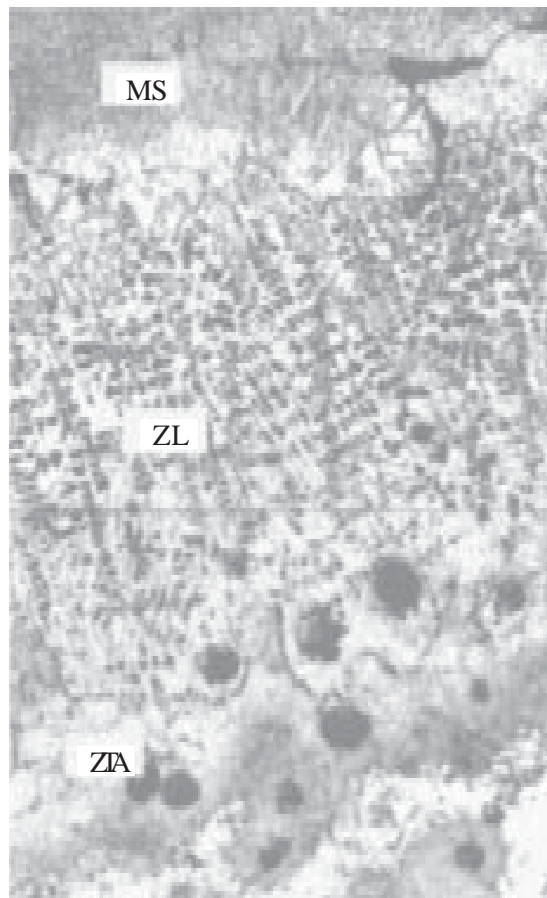


Figura 1 Aspecto metalográfico da região de ligação entre o ferro fundido e o metal de solda, de grandes dimensões, apresentando estruturas muito frágeis formadas na soldagem com preaquecimento e consumível de aço. Microscopia ótica. Ampliação original de 100x. Ataque de Nital.

2. Como o material sofreu um preaquecimento em uma temperatura intermediária (entre não ter preaquecimento e ter um preaquecimento em temperatura elevada) as regiões da ZL e da ZTA sofreram um resfriamento rápido o suficiente para reter a estrutura do ferro fundido branco na ZL e para formar martensita na ZTA e, por outro lado, foram largas o suficiente para interferir nas propriedades da junta (atingiram cerca de 3mm).

Como resolver estes problemas?

Existem dois tipos básicos de procedimento de soldagem para os ferros fundidos, aplicados nas condições de soldagem de **peças pequenas** ou de **peças grandes**, cuja aplicação está apresentada a seguir e cujo procedimento está resumido na tabela 2.

Para peças pequenas, onde se pode preaquecer o componente em elevadas temperaturas (de até 600°C) pode-se adotar a soldagem a quente realizada com consumível similar, de ferro fundido, tipo AWS E CI. Neste caso deve-se garantir um preaquecimento lento, e após a soldagem a permanência durante 1 hora por polegada de espessura seguida de resfriamento muito lento, para que o carbono na região da solda e ZL possa formar a grafita (macia), e não a cementita (dura e frágil).

Para peças de grande porte, onde é inviável aquecer todo o componente, deve-se soldar completa-

Tabela 2 Procedimentos de soldagem de reconstrução para os ferros fundidos.

Aplicação	Tipo	Consumível	Cuidados Especiais	Tratamentos Anteriores e Posteriores
Peças de pequena espessura	a quente	AWS E CI ferro fundido	• Evita restrições	<ul style="list-style-type: none"> • Preaquecimento em temperaturas na ordem de 400°C a 600 °C • Após a soldagem manter na temperatura de pré durante 1 hora/polegada de espessura • resfriamento lento
Peças de pequena espessura sujeitas a carregamento	a frio	AWS E CI (níquel) AWS E NiFe CI (níquel-ferro)	• Técnica de baixo de calor como eletrodo de pequena bitola, cordões curtos e estreitos, passe a ré	• Manutenção sempre a frio
Peças a serem apenas “maquiadas”	a frio	AWS E St (aço)	• Idem anterior	• Idem anterior

mente "frio", ou seja sem qualquer preaquecimento e com técnicas de manutenção da peça fria ou seja, deposição de cordões estreitos e curtos, passe a ré, sequência alternada, para garantir que a região aquecida, mesmo que frágil, seja muito pequena e não influencie nas propriedades do componente. Outra importante condição é de que se utilize um consumível muito macio, de liga de níquel (tipo AWS E Ni CI) ou níquel-ferro (AWS E NiFe-CI) caso seja necessária resistência mecânica no depósito.

A figura 2 apresenta o mesmo ferro fundido nodular soldado a frio com consumível de níquel, onde se pode verificar que as regiões frágeis (de cementita e martensita) estão misturadas com o níquel, que acomoda tensões e evita que estas regiões se trinquem.

Existe ainda um consumível de aço (AWS ESt) para a soldagem dos ferros fundidos, mas sua aplicação é limitada e deve ser muito cuidadosa. Somente se utiliza este consumível quando se pretende "maquiar" uma peça mas não se deseja realizar a soldagem a quente, pois como o níquel (usualmente utilizado na soldagem a frio) é inoxidável passa a existir uma descontinuidade no aspecto da superfície. Aplicado somente em regiões não solicitadas mecanicamente pois é difícil evitar o trincamento na soldagem .

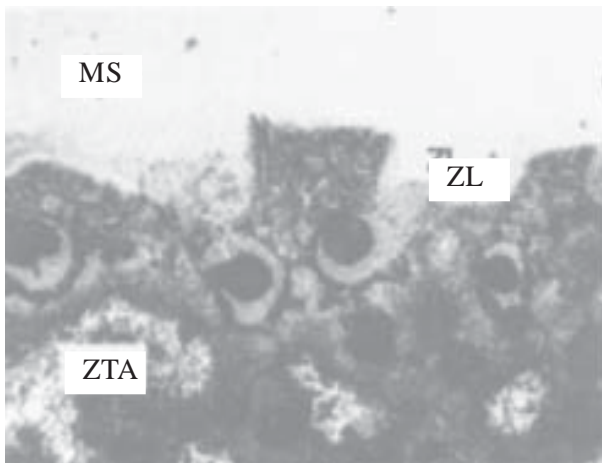


Figura 2 Aspecto metalográfico da região de ligação entre o ferro fundido e o metal de solda, de pequenas dimensões, apresentando estruturas muito frágeis restritas ao redor das grafitas e misturadas com a estrutura austenítica de níquel (macia) formadas na soldagem a frio com consumível de níquel. Microscopia ótica. Ampliação original de 100x. Ataque de Nital.

Constituintes das Ligas Ferro-Carbono

As principais fases presentes em ligas Fe-C são a **austenita** (que é macia, de resistência variável em função da composição química e que não se fragiliza), a **ferrita** (que também é macia, de baixa resistência mecânica e que se fragiliza com temperaturas baixas), a **cementita** (que é extremamente dura e se trinca facilmente), e a **martensita** (que apresenta alta resistência e sua fragilidade depende se é ela se apresenta aliviada ou não). Os demais microconstituintes (como a bainita e a perlita) são "agregados" formados pelas fases anteriormente apresentadas e suas propriedades dependem da quantidade e morfologia de cada fase presente.

A **grafita** é um constituinte somente presente nos ferros fundidos e consiste no carbono livre, decomposto da cementita por efeito de composição química ou tratamento térmico.

Algumas referências básicas para a consulta dos leitores que pretendem se aprofundar no assunto são:

ASM Handbook Volume 1 "Properties and Selection: Iron, Steel and High Performance Alloys" Capítulo Cast Irons páginas apresentando a metalurgia dos ferros fundidos;

ASM Handbook Volume 6 "Welding, Brazing and Soldering" Capítulo *Welding of Cast Irons* pp 708-721 apresentando a soldabilidade do ferro fundido.

