

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA - IMT

**COMO ECONOMIZAR TEMPO DE MÁQUINA PARADA E DINHEIRO
RECUPERANDO PARTES EM FERRO FUNDIDO**

São Caetano do Sul

2012

SERGIO ROBERTO FERMINO DE OLIVEIRA

**COMO ECONOMIZAR TEMPO DE MÁQUINA PARADA E DINHEIRO
RECUPERANDO PARTES EM FERRO FUNDIDO**

Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem, da Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Engº Paulo Mesquita de Barros

São Caetano do Sul

2012

Oliveira , Sergio Roberto Fermino

Como economizar tempo de máquina parada e dinheiro recuperando partes em ferro fundido / Sergio Roberto Fermino de Oliveira. São Caetano do Sul, SP: 2012.

57p.

Monografia — Engenharia de Soldagem do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2012.

Orientador: Prof. Paulo Mesquita

1.Técnicas de soldagem dos ferros fundidos. 2.Considerações sobre os eletrodos de ferros fundidos. 3.Controle dos fatores de falhas na soldagem de ferro fundido. 4.Aplicações de soldagem de ferro fundido. 5. Aplicações de outros processos na recuperação de ferro fundido.

DEDICATÓRIA

A minha família, aos meus pais, aos meus antepassados como reconhecimento, reverência e gratidão.

AGRADECIMENTOS

A todos os professores do curso de ENGENHARIA DE SOLDAGEM, em especial aos professores Américo Scotti, Vlodymyr Ponomarov, Louriel Vilarinho, Paulo Mesquita, Marcelo Ferreira, Paulo Modenesi, Ricardo Fedele, Evandro Luís Nohara, Marcelo Salomão, Klebber Fernandes e a professora Neusa Alonso, pelas orientações, paciência e estímulo, e também ao Engenheiro Manoel Pires Monteiro e Prof. René Wasserman da Eutectic + Castolin, pela primeira grande oportunidade de conhecimento e interesse na área da Soldagem.

RESUMO

Os ferros fundidos encontram na indústria numerosas aplicações, devido às suas propriedades, tais como: alta fluidez favorecendo o vazamento; absorção importante de vibrações; boa usinabilidade e alta resistência à compressão, o que permite a sua utilização principalmente na construção de máquinas, ferramentas, peças de válvulas; na indústria de vidro; fundições; indústria automobilística e em outros numerosos ramos industriais. As peças em ferro fundido representam muitas vezes um grande valor material, podendo, em caso de avaria, serem reparadas com sucesso por soldagem, brasagem, aspensão térmica ou materiais compósitos. Muitas vezes, no entanto, peças de alto custo são trocadas por peças novas, enquanto que uma recuperação através dos processos mencionados poderia ser realizada com sucesso.

O foco principal deste trabalho será a soldagem de manutenção, especificamente na reparação de partes em ferro fundido, bem como a proposição de aplicação de outras técnicas de reparo para este tipo de material, cuja aplicação, dizem os especialistas, compõe perto de 60% das partes de máquinas e equipamentos da indústria de base.

Palavras-chave: Técnicas de soldagem dos ferros fundidos. Considerações sobre os eletrodos de ferros fundidos. Controle dos fatores de falhas na soldagem de ferro fundido. Aplicações de soldagem de ferro fundido. Aplicações de outros processos na recuperação de ferro fundido.

ABSTRACT

Cast irons have numerous applications in industry because of its properties, such as high fluidity favoring leakage; important absorption of vibrations, good machinability and high resistance to compression, which allows its use primarily in the construction of machines, tools, valve parts, the glass industry, foundries, automotive and many other industries. The cast iron parts often represent a great value material and may, in case of failure, be successfully repaired by welding, brazing, or thermal spraying and composites materials. However, often, expensive parts are exchanged with new parts, while a recovery through the mentioned processes could be performed successfully.

The main focus of this work will be welding maintenance, specifically in the repair of parts in cast iron, as well as the proposition of applying other techniques to repair this type of material, the application of which, experts say, makes up about 60% of parts of machines and equipments from base industry.

Keywords: Cast iron welding techniques. Considerations about cast iron welding shielded electrodes. Control of flaws factors in cast iron welding. Cast iron welding applications. Applications of others processes in cast iron recuperation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO.....	Erro! Indicador não definido. 2
1.1.1 Definição de ferro fundido	Erro! Indicador não definido. 2
1.1.2 Ferros fundidos cinzentos	15
1.1.2.1 Identificação e Soldabilidade.....	17
1.1.3 Ferros fundidos nodulares	17
1.1.3.1 Identificação e Soldabilidade.....	19
1.1.4 Ferro fundido ligado	19
1.1.4.1 Identificação e Soldabilidade.....	20
1.1.5 Ferro fundido branco.....	21
1.1.5.1 Identificação e Soldabilidade.....	21
1.1.6 Ferro fundido maleável	21
1.1.6.1 Identificação e Soldabilidade	23
1.1.7 Ferro fundido mesclado	23
2. APLICAÇÕES DOS FERROS FUNDIDOS.....	23
2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS	24
3 TÉCNICAS DE SOLDAGEM DOS FERROS FUNDIDOS.....	27
3.1 SOLDABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS.....	27
3.1.1 Aspectos metalúrgicos.....	27
3.1.2 Procedimento de soldagem.....	28
3.1.3 Aspecto físico.....	28
3.2. SOLDAGEM A FRIO.....	29
3.2.1 Limpeza.....	29
3.2.2 Teste de soldabilidade.....	29
3.2.3 Preparação do chanfro	31
3.2.4 Limitar a trinca	32
3.2.5 Chanfrar até as extremidades dos furos	32
3.2.6 Trinca central	33
3.2.7 Tamanhos do cordão e processo de deposição.....	33
3.2.8 Martelamento.....	33
3.2.9 Soldagem alternada.....	33

3.2.10 Controle de temperatura.....	34
3.2.11 Resfriamento lento.....	34
3.2.12 Considerações sobre a técnica anterior.....	34
3.3. SOLDAGEM A QUENTE.....	34
3.3.1 Situações para o emprego deste procedimento	34
3.3.2 - Soldagem a meia temperatura	35
3.4.1 Soldagem a alta temperatura (para processo oxi-acetilênico)	35
3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ELETRODOS DE FERROS FUNDIDOS	37
4 CONTROLE DOS FATORES DE FALHAS NA SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO. 43	
4.1 ZONA FUNDIDA	43
4.2 ZONA DE LIGAÇÃO	43
4.3 ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC)	43
4.4 TENSÕES	44
4.5 TRINCAS DE CRATERA	44
4.6 CONTAMINAÇÃO	44
4.7 POROSIDADE	44
4.8 APORTE DE CALOR NA SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO	45
4.9 CORDÕES ESTREITOS	45
4.11 RESFRIAMENTO	46
4.12 APLICAÇÕES DE SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO	46
4.12.1 Fundições novas	46
4.12.2 Fundições usadas	47
4.13 RECOMENDAÇÕES	47
4.13.1 Paciência	48
5 APLICAÇÕES DE OUTROS PROCESSOS NA RECUPERAÇÃO DE FERRO FUNDIDO	48
5.1 ASPERÇÃO TÉRMICA	48
5.1.2 Tipos de ligas	48
REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.
ANEXO A - Recuperação de barramento de torno em Ferro Fundido Nodular	52
ANEXO B - Recuperação de caracol de maromba em Ferro Fundido Nodular.....	53
ANEXO C -Recuperação de bloco de motor em Ferro Fundido Cinzento.....	54

ANEXO D - Recuperação de mancal de turbina hidroelétrica em Ferro Fundido Cinzento...	55
ANEXO E - Recuperação de carcaça de bomba em Ferro Fundido cinzento com material compósito.....	56
ANEXO F - Recuperação de grelha de Resfriador IKN em Ferro Fundido Branco	57
ANEXO G - Recuperação de estampo de prensa em Ferro Fundido Ligado.....	58
ANEXO H - Recuperação de molde de vidraria em Ferro Fundido Cinzento.....	59

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento de mercado global, com base em demandas de produção cada vez maiores em todos os segmentos tais como de infra-estrutura das cidades, petróleo, óleo & gás, papel & celulose, automotiva, mineração, e etc., a soldagem de manutenção ocupa um lugar importante na eficiência do processo produtivo.

É importante destacar que a lucratividade também se norteia por uma adequação de custos de produção com base num eficiente plano de manutenção e reparo na indústria de base, assim fazendo parte deste contexto a soldagem de manutenção e aplicações de ferros fundidos, e que serão os objetivos principais do presente trabalho.

Às máquinas e equipamentos que hoje estão presentes nas indústrias, muitos deles com alto valor agregado, são exigidos cada vez mais em suas capacidades nominais, ditando assim que o ritmo produtivo não pode ser quebrado; as paradas indesejáveis que contrariam os orçamentos, mesmo os mais bem planejados, devem ser evitadas a todo custo, pois muitas vezes pode se tratar de uma questão de sobrevivência.

Tudo isso leva a equipe de Engenharia de Manutenção e a Engenharia de Fábrica a viver sobre a pressão do imprevisto de uma máquina ou equipamento parado, e por sua vez a alta administração quer sempre uma solução rápida para uma quebra ou um defeito, em nome dos prazos acordados com seus clientes.

Os clientes, por sua vez requerem prazos cada vez mais curtos, e muitos assumem riscos sem mesmo compreender que muitas máquinas e equipamentos trabalham de forma ininterrupta, e que muitos são antigos, outros obsoletos e se dispõe de pouca ou nenhuma informação sobre os mesmos, além dos que operam sob intensos regimes de fadiga, em ambientes corrosivos, submetidos a impactos, temperatura e tantos outros mecanismos particulares de desgaste.

Conforme já mencionado, o foco principal deste trabalho será a soldagem de manutenção, especificamente na reparação de partes em ferro fundido, bem como a proposição de aplicação de outras técnicas de reparo para este tipo de material, cuja aplicação, dizem os especialistas, compõe perto de 60% das partes de máquinas e equipamentos da indústria de base.

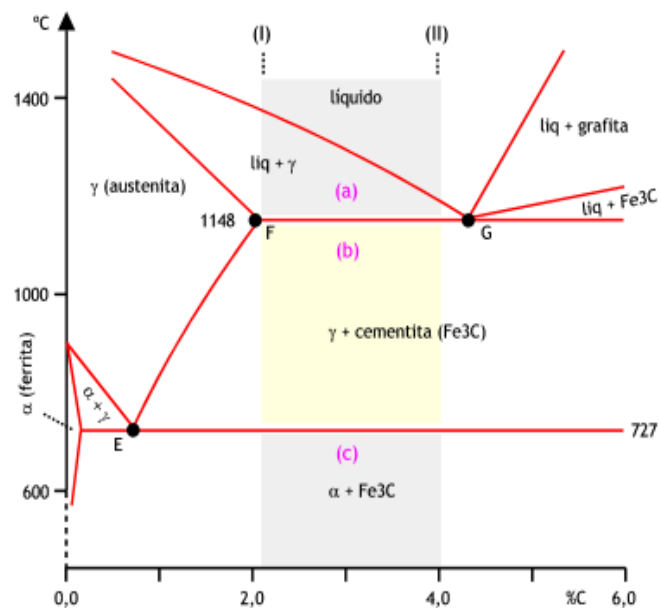
Um outro aspecto que se proprõe com este trabalho é tentar desmistificar as características principais dos ferros fundidos, através de estudos de casos, análise de aplicações, tipos de consumíveis, e outras técnicas de recuperação.

1.1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.1 Definição de ferro fundido

Segundo CHIAVERINI, Vicente, 1984 “ Ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2% em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita”. No entanto, na prática, a maioria dos ferros fundidos possuem entre 3 à 4,5% de carbono, silício de 0,5 a 3%, manganês de 0,2 a 1,3%, fósforo com 0,8% máximo e enxofre com 0,2% máximo e outros elementos de liga.

Figura 1 – Diagrama Ferro-Carbono.



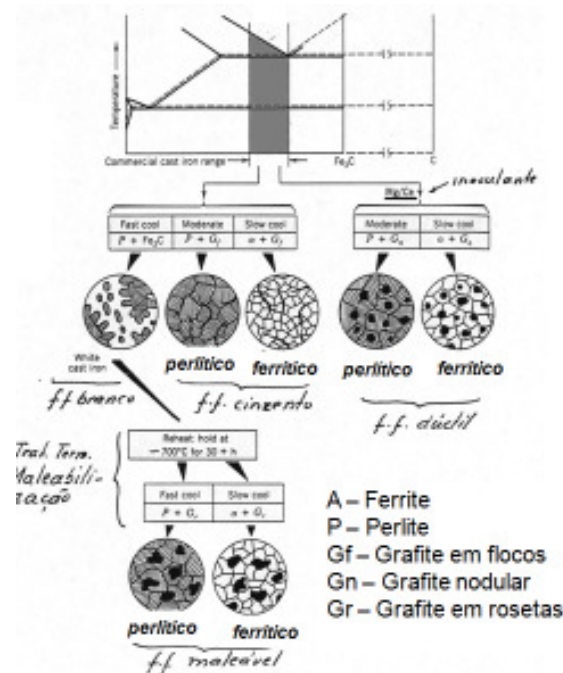
FONTE: Alves, Fabio – FBTS – Inspetor de Equipamentos-Materiais Metálicos, 2008

Assim para aumentar suas propriedades específicas, pode-se adicionar outros elementos como níquel, cromo, molibdênio ou cobre, dando lugar a uma grande gama de aplicações.

Um alto teor de carbono está presente no ferro fundido, seja como carbono livre (grafita), ou como carbono combinado (carboneto de ferro). A presença de um ou de outro depende em grande parte das velocidades de resfriamento das peças fundidas. Assim, baixas velocidades de resfriamento favorecem a precipitação de grafita. Enquanto altas velocidades geram fases duras de carbonetos.

Desta forma, as propriedades do ferro fundido, incluindo sua soldabilidade, estão intimamente ligadas tanto a quantidade total de carbono, como a quantidade relativa de grafita livre (sua forma, tamanho e distribuição), assim como as quantidades de carbonetos distribuídos na matriz da microestrutura.

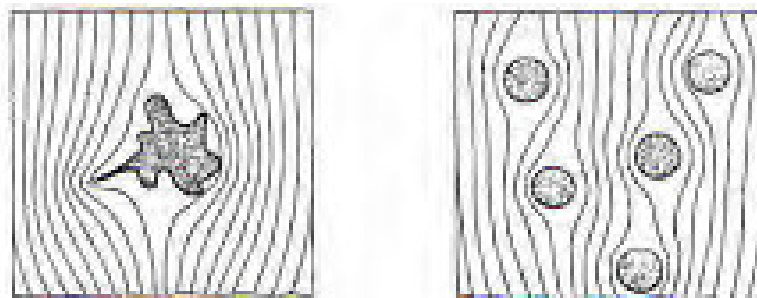
Figura 2 – Tipos básicos de ferros fundidos, consoante à sua composição, microestrutura e Processamento.



FONTE: Alves, Fabio – FBTS – Inspetor de Equipamentos-Materiais Metálicos, 2008

Portanto, quando a grafita se apresenta em forma de lamelas, estas tem um efeito potencializador de tensões geradoras de microfissuras, o que provoca fragilidade e baixa resistência da peça fundida. Em contra partida, quando a grafita se apresenta em forma de nódulos, a ductilidade melhora significativamente.

Figura 3 - Efeitos potencializadores de tensões de grafita lamelar e nodular.



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.56)

Como consequência destes fatores, o ferro fundido é mais difícil de soldar que o aço, considerando especialmente que a alta quantidade de carbono presente no mesmo,

proporciona também a formação de zonas afetadas termicamente (ZAT) de grande dureza e maior risco de fissuração. Isto indica que os processos, ligas e procedimentos de soldagem devem adequar-se cuidadosamente ao tipo de ferro fundido utilizado.

Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares são ligas de ferro-carbono-silício, com teores de carbono geralmente acima de 2,0 % em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar na formação de grafita na forma de veios (flocos) ou nódulos (esferas), apresentados nas figuras abaixo (fotografia 1).

A forma e a distribuição da grafita, bem como a estrutura da matriz, influenciam diretamente nas propriedades dos ferros fundidos, razão pela qual a escolha da classe de ferro fundido depende muito de sua aplicação.

Combinações de diferentes formas de grafita com diferentes estruturas de matriz, resultam em uma grande variedade de classes, onde, certamente, uma delas atenderá aos requisitos necessários de desempenho, segurança e qualidade.

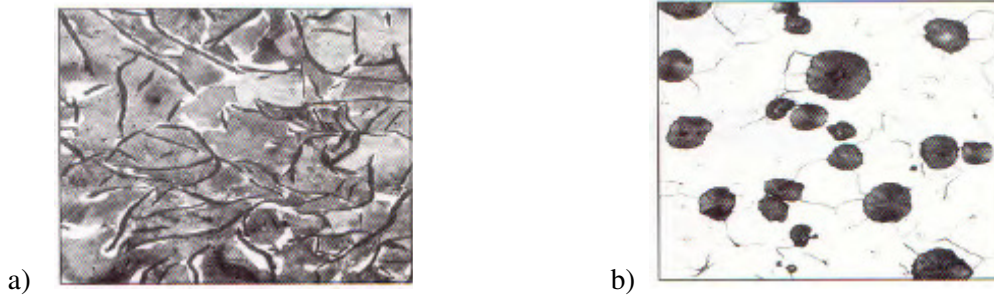
A constante evolução da tecnologia de fundição dos ferros fundidos está contribuindo cada vez mais para o desenvolvimento de novas aplicações, possibilitando, assim, alternativas mais econômicas para se obter produtos com qualidade.

Tabela 1 – Comparativo das propriedades dos ferros fundidos

Comparative properties of ferrous castings								
Material	Tensile ^a strength, ksi	Yield strength, ksi	Compressive ^a strength, ksi	Percent elongation %	Modulus ^b of elasticity, 10 ⁶ psi	HB ^c	Minimum ^d casting section, in. (mm)	Characteristics
Gray iron—ASTM A 48								
Class 20	20	—	95	Nil	12	175	0.125 (3.1)	Good for thin sections and low-strength castings
Class 35	35	—	135	Nil	16	200	0.187 (4.7)	For structural parts, pumps, pipes, bases, etc.
Class 40	40	—	135	Nil	18	210	0.250 (6.3)	For medium-strength castings; can be hardened
Ductile iron—ASTM A 536								
Grade 5								
60-45-18	60	45	120	18	25	175	0.187 (4.7)	Excellent mechanical properties; can tolerate bending
Grade 3								
80-55-06	80	60	160	6	25	235	0.187 (4.7)	High strength, some ductility; hardenable
Malleable iron								
ASTM A 47-77								
Grade 32510	50	32	208	10	26	125	0.125 (3.1)	Ferritic, free from casting strains
ASTM A 220-76								
Grade 60004	80	60	240	3	26	225	0.125 (3.1)	Pearlitic, free from casting strains; hardenable
White iron								
ASTM A 532								
Grade A, Nitr-HIC	45	—	—	Nil	25	550	0.250 (6.3)	Extreme abrasion resistance; grinding balls, slurry pumps, etc.
Steel castings								
ASTM A 27								
Grade 60-30	60	30	50	24	30	156	0.250 (6.3)	For high stiffness, shock loading, and for welded fabrications

^a1 ksi = 6.89 MPa. ^b1 psi = 6.89 kPa. ^cBrinell hardness. ^dIncreases for large castings.

Fotografia 1 – a) Ferro Fundido cinzento e b) Ferro fundido nodular



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.57)

1.1.2 Ferros fundidos cinzentos

Esta é a liga mais econômica e utilizada com maior profundidade devido a suas baixas temperaturas de fusão (1140°C - 1200°C), alta fluidez para moldes complexos e limitada contração durante a solidificação.

Sua liga contém até 0,8% de carbono combinado. O resto do carbono, até 4% do total, é grafita livre na matriz “ferro-carbono”.

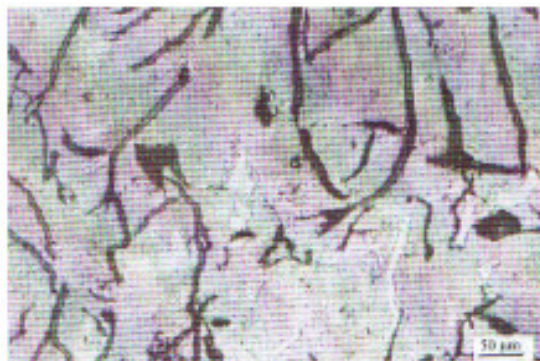
A grafita fornece uma cor acinzentada na superfície fraturada, por isso o nome ferro fundido cinzento.

As lâminas/veios de grafita se comportam como pequenas trincas internas, tornando pobres as propriedades mecânicas e de resistência ao impacto, com baixas ductilidade e capacidade de se deformar. Por outro lado, o ferro fundido cinzento é facilmente usinável, possuindo boa resistência ao desgaste e absorvendo bem as vibrações.

É utilizado em aplicações de engenharia de baixas cargas estáticas ou de cisalhamento, onde o peso da estrutura não é importante e onde se requer mínima vibração ou ruído.

A microestrutura típica dos ferros fundidos cinzentos é uma matriz perlítica ou ferrítica com veios de grafita dispersos.

Fotografia 2 – Microestrutura de um ferro fundido cinzento



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.58)

Os ferros fundidos cinzentos produzidos pelo processo de fundição contínua podem apresentar as seguintes características estruturais **ABNT NBR 6589** Classes FC 200/300 e **ASTM A 247** Tipo D.

- **Ferro Fundido Cinzento Perlítico / Ferrítico (FC 200)**
- **Ferro Fundido Cinzento Perlítico (FC 300)**
- **Ferro Fundido Cinzento com Grafita Refinada (ASTM A 247 Tipo D)**

Para requerimentos específicos, pode-se recorrer às tabelas seguintes:

Tabela 2 - **Resistência à tração e seções mínimas recomendadas para ferros fundidos cinzentos**

Classe ASTM	Resistência à tração		Espessura mínima
	ksi	MPa	mm
20	20	138	3,2
25	25	172	6,4
30	30	207	9,5
35	35	241	9,5
40	40	276	15,9
45	45	310	19,0
50	50	345	19,0
60	60	414	25,4

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.59)

Tabela 3 - **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos automotivos SAE J431**

Grau SAE	Dureza HB	Carga mínima, transversal, [kgf]	Deflexão mínima, [mm]	Resistência à tração mínima, [MPa]
G1800	187 máx.	780	3,6	118
G2500	170 a 229	910	4,3	173
G3000	187 a 241	1000	5,1	207
G3500	207 a 255	1110	6,1	241
G4000	217 a 269	1180	6,9	276

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.59)

Tabela 4 – Composições químicas típicas para ferros fundidos cinzentos SAE J431

Grau SAE	C(a)	Mn	Si	P	S
G1800(b)	3,40 – 3,70	0,5 – 0,8	2,8 – 2,3	0,15	0,15
G2500(b)	3,20 – 3,50	0,6 – 0,9	2,4 – 2,0	0,12	0,15
G3000(c)	3,10 – 3,40	0,6 – 0,9	2,3 – 1,9	0,10	0,15
G3500(c)	3,00 – 3,30	0,6 – 0,9	2,2 – 1,8	0,08	0,15
G4000(c)	3,00 – 3,30	0,7 – 1,0	2,1 – 1,8	0,07	0,

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.59)

Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos SAE J431 para aplicações em altas solicitações

Grau SAE	Dureza, HB	Carga mínima transversal, kg	Deflexão mínima, mm	Resistência à tração mínima, MPa
G2500a	170 - 229	910	4,3	173
G3500b	207 - 255	1090	6,1	241
G3500c	207 - 255	1090	6,1	241
G4000d	241 - 321	1180	6,9	276

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.59)

1.1.2.1 Identificação e Soldabilidade

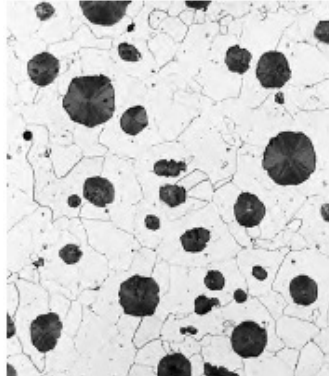
- Fácil de usar.
- Ao passar o dedo pela superfície recém-limada, se produzem intensas manchas cinzas.
- As superfícies da fratura são escuras, frágeis e sem deformações.
- Os golpes de martelo geram ruídos com pouca ressonância.
- As fundições são muito magnéticas.
- Endurecíveis em contato com a água, com alto risco de fissuração.
- As seções mais grossas são normalmente mais fáceis de soldar graças ao menor conteúdo de fósforo.
- O corte oxi-acetilênico é difícil.
- As fundições são projetadas para trabalhar a compressão e altas tensões de tração.

1.1.3 Ferros fundidos nodulares

As propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento podem aumentar significativamente modificando-se a forma, tamanho e distribuição da grafita durante a fase de solidificação.

Isto se consegue incluindo na liga elementos como o Mg (0,03 a 0,05%) ou o Ce (0,005 a 0,02%), o que esferoidiza a grafita livre e reduz o efeito de entalhe dos veios de grafita.

Fotografia 3 – Microestrutura de um ferro fundido nodular



FONTE: JR, Willian D. Callister - Materials Science and Engineering (2007, p.367)

Os ferros fundidos nodulares cuja característica estrutural dominante é apresentar carbono na forma de nódulos (esferas) de grafita, podem ser encontrados nas classes **ABNT NBR 6916** Classes FE 38017, FE 42012, FE 50007 e FE 70002 e **ASTM A 536**.

- Ferro Fundido Nodular Ferrítico (FE 38017)
- Ferro Fundido Nodular Ferrítico / Perlítico (FE 42012)
- Ferro Fundido Nodular Perlítico / Ferrítico (FE 50007)
- Ferro Fundido Nodular Perlítico (FE 70002)

Tabela 6 – Composição química para ferros fundidos nodulares padrão

Especificação	Composição química, %					
	Classe	C	Si	Mn	P	S
ASTM A395 (ASME SA395)	60-40-18	3,00 mín.	2,50 máx.	—	0,08 máx.	—
ASTM A476 (SAE AMS5316)	80-60-03	3,00 mín.	3,0 máx.	—	0,08 máx.	0,05 máx.
ASTM A536	60-40-18(a)					
	65-45-12(a)					
	80-55-06(a)					
	100-70-03(a)					
	120-90-02(a)					
SAE J434c	D4018(b)					
	D4512(b)					
	D5506(b)	3,20-4,10	1,80-3,00	0,10-1,00	0,015-0,10	0,005-0,035
	D7003(b)					
	DQ & T(b)					

(a) Composição subordinada às propriedades mecânicas; os limites de composições para qualquer elemento podem ser especificados de comum acordo entre a fundição e o cliente. (b) A composição geral fornecida para a classe D4018 é somente para referência. Tipicamente, as fundições produzirão limites mais estreitos do que aqueles mostrados e estabelecerão composições médias diferentes para as diferentes classes.

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.61)

Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares padrão

Especificação	Grau	Dureza, HB	Resistência à tração mín., MPa	Límite elástico, MPa	Alongamento em 50 mm mín., %
ASTM A395 (ASME SA395)	60-40-18	143-187	414	276	18
ASTM A476 (SAE AMS5316)	80-60-03	201 mín.	552	414	3
ASTM A536	60-40-18	-	414	276	18
	65-45-12	-	448	310	12
	80-55-06	-	552	379	6
	100-70-03	-	689	483	3
	120-90-02	-	827	621	2
SAE J434c	D4018	170 máx.	414	276	18
	D4512	156-217	448	310	12
	D5506	187-255	552	379	6
	D7003	241-302	689	483	3
	DQ & T	(a)	(b)	(b)	(b)

(a) Limite especificado mutuamente entre fundidor e cliente. (b) O valor deve ser compatível com a dureza mínima especificada para a produção das peças.

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.61)

1.1.3.1 Identificação e Soldabilidade

- Geralmente fácil de usinar, perfurar, limar ou serrar.
- Ao passar o dedo pela superfície recém-limada, se produzem intensas manchas cinzas apenas visíveis.
- As superfícies da fratura são cristalinas, com alguma deformação plástica visível.
- Os golpes de martelo geram ruídos com maior ressonância.
- As fundições SG ferríticas e perlíticas são magnéticas.
- Endurecíveis em contato com a água, com baixo risco de fissuração.
- O corte oxi-acetilênico é difícil.
- As fundições são projetadas para trabalhar com baixas cargas de serviço de compressão e tração.

Além dos Fofos Cinzento e Nodular podemos encontrar ainda os Ferros Fundidos Ligado, Branco, Maleável e Mesclado.

1.1.4 Ferro fundido ligado

Dá-se o nome de Ferro fundido ligado ao Ferro fundido cinzento que, devido à adição de Níquel, Cromo, ou Molibdênio, possui uma estrutura mais uniforme, melhor usinabilidade, maior resistência a temperaturas elevadas, ao desgaste, à fadiga e à corrosão.

Devido à presença destes elementos, a grafita se distribui com maior uniformidade durante a solidificação do metal, produzindo um Ferro Fundido com propriedades mecânicas superiores.

Níquel é o elemento mais utilizado nessas ligas, (teores de 0,25% a 1%), produzindo uma granulação mais uniforme, bem como uniformidade de resistência, dureza e usinabilidade em qualquer seção do Ferro fundido.

Cromo, com um teor entre 0,40% e 1%, é adicionado para dar maior resistência ao desgaste e maior dureza. Ferro fundido deste tipo tem menor tendência à porosidade e maior resistência à tração a temperaturas elevadas.

A combinação Níquel e Cromo são empregados na proporção de 2,5 para 1, não devendo o Cromo ultrapassar 3%.

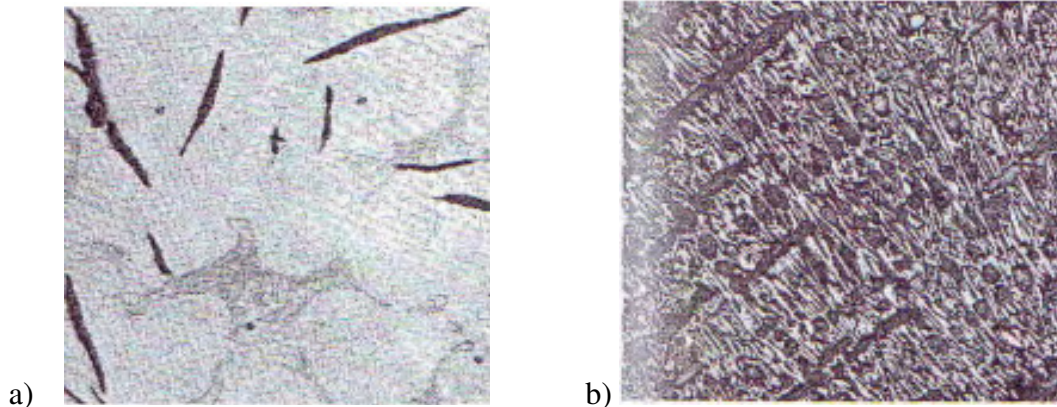
O Ferro fundido resultante tem uma estrutura mais refinada, com maior resistência e dureza, mas sem prejuízo da usinabilidade.

A combinação de 4,5% de Níquel e 1,5% de Cromo é empregada no Ferro fundido para dar a dureza máxima, bem como maior tenacidade e resistência.

Molibdênio, na proporção de 0,25%, também aumenta a resistência e a dureza.

Além destes elementos, pode conter ainda Cobre, Alumínio, Titânio e Zircônio.

Fotografia 4 – **Microestrutura de um ferro fundido: a) rico em níquel e b) rico em cromo**



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.63)

1.1.4.1 Identificação e Soldabilidade

- As peças grandes ou pequenas são projetadas para aplicações em situações severas, com altas temperaturas de operação, meios corrosivos ou materiais abrasivos.
- As qualidades austeníticas se reconhecem por ser não magnético e endurecem quando são submetidos a têmpera em água desde os 900°C.
- O corte oxi-acetilênico é difícil.

- As fundições com alto teor de cromo são muito propensas a fissuração em poucos segundos de arco aberto.

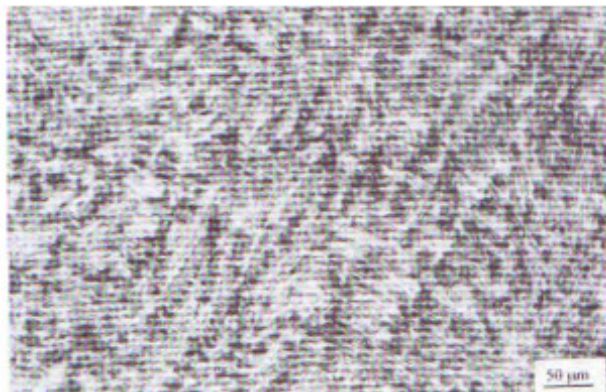
1.1.5 Ferro fundido branco

O ferro fundido branco tem como característica principal sua dureza extrema, produzida pelo resfriamento brusco em coquilhas, algumas vezes resfriadas com água.

A grafita apresenta-se sob forma combinada, sendo mantida na solução sólida como carboneto de ferro. Sua fratura é branca e prateada; apresenta-se como uma liga dura quebradiça e não magnética.

Seu uso é limitado, sendo de preferência empregado em combinação com o Ferro fundido cinzento. Neste caso, o núcleo é de Ferro fundido cinzento e as superfícies de Ferro fundido branco. Sua soldabilidade é quase impossível.

Fotografia 5 – **Microestrutura de um ferro fundido branco**



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.64)

1.1.5.1 Identificação e Soldabilidade

- Duro e não usinável com ferramentas de corte, limas e serras.
- Extremamente frágil e sem deformação.
- A superfície da fratura é branca brilhante, clara e lisa.
- Geralmente insoldável.
- As fundições são projetadas para trabalhar com baixas tensões e alta abrasão.

1.1.6 Ferro fundido maleável

Trata-se de um recozimento prolongado do ferro fundido branco.

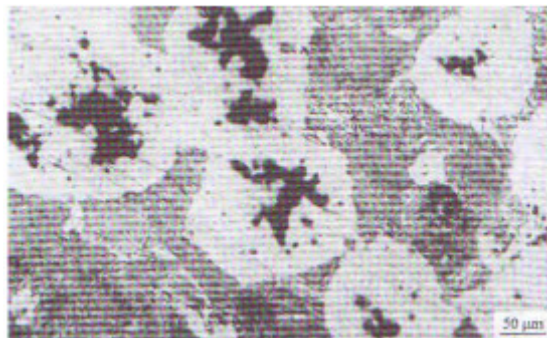
Aquecendo-se o Ferro fundido branco durante vários dias entre 820°C e 900°C, opera-se um processo de redução do Carbono da superfície, reduzindo o teor de Carbono de 2% a 4% para 1% a 1,5% (descarbonetação). Este processo diminui a fragilidade, aumentando a resistência à tração e o alongamento.

Este processo é de uso corrente na Alemanha, obtendo-se uma fundição maleável, chamada de “núcleo branco” e “superfície branca”, que se emprega na fabricação de peças finas, com espessura não superior a 12mm; é feita em recipientes cheios de óxido de Ferro finamente granulado e com alto teor de Oxigênio.

A fundição de “núcleo negro”, com superfície negra, não está reduzida, sendo recozida em areia neutra, sem qualquer ação redutora. O processo chama-se “Grafitização”. Toda a cementita é decomposta em ferrita e grafita em formato de nódulos.

Devido ao teor mais baixo de Carbono, a fundição maleável tem uma resistência maior do que a da fundição cinzenta (32 a 38 kg/mm²) e, dentro de certos limites, pode ser temperada, martelada e, algumas vezes, forjada. Apresenta excelente usinabilidade e significativa ductilidade, além de boa resistência ao choque.

Fotografia 6 – Microestrutura de um ferro fundido maleável



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.65)

Este tipo de fundição, usinável, é classificada conforme a tabela seguinte:

Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares padrão

Especificação	Classe	Resistência à tração, MPa	Limite de elasticidade MPa	Dureza, HB	Alongamento (a) %
Ferrítico ASTM A47, A338	32510	345	224	156 máx.	10
	35018	365	241	156 máx.	18
	-	276	207	156 máx.	5
ASTM A197 Perlítico e martensítico ASTM A220	40010	414	276	149-197	10
	45008	448	310	156-197	8
	45006	448	310	156-207	6
	50005	483	345	179-229	5
	60004	552	414	197-241	4
	70003	586	483	217-269	3
	80002	655	552	241-285	2
	90001	724	621	269-321	1
Automotivo ASTM A602, SAE J158	M3210(b)	345	224	156 máx.	10
	M4504(c)	448	310	163-217	4
	M5003(c)	517	345	187-241	3
	M5503(d)	517	379	187-241	3
	M7002(d)	621	483	229-269	2
	M8501(d)	724	586	269-302	1

(a) Mínimo em 50 mm. (b) Recozido. (c) Temperado no ar e revenido. (d) Temperado no líquido e revenido

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.65)

1.1.6.1 Identificação e Soldabilidade

- As espessuras das seções são geralmente delgadas.
- A superfície (1-2mm) dos de tipo “núcleo branco”, é suave e usinável.
- Extremamente tenaz e difícil de romper com martelo.
- As seções toleram e mostram uma dobra parcial antes da fratura (valores de ductilidade <5% e >5% para os de tipos “núcleo branco” e “núcleo negro” respectivamente).
- As peças pulam quando caem no solo.
- As superfícies são facilmente soldáveis com chama.

São utilizados freqüentemente para conectores de tubos e peças de válvulas.

1.1.7 Ferro fundido mesclado

Trata-se de um ferro fundido intermediário entre o cinzento e o branco, apresentando portanto característica mecânicas intermediárias.

2. APLICAÇÕES DOS FERROS FUNDIDOS

Os Ferros Fundidos são largamente utilizados em diversos segmentos e peças industriais, a tabela abaixo ilustra algumas das principais aplicações dessas ligas.

Quadro 1 – Segmentos de Mercado e seus principais componentes em ferro fundido

SEGMENTO DE MERCADO	COMPONENTES	SEGMENTO DE MERCADO	COMPONENTES
HIDRÁULICA E PNEUMÁTICA	Manifolds	AUTOPEÇAS	Capas de Mancal
	Êmbolos		Distanciadores
	Tampas de Cilindro		Êmbolos Pistão de Freio
	Cabeçotes de Cilindro		Anéis
Corpos de Válvula	Guias de Válvulas		
			Eixos Comandos
VIDRARIAS	Moldes	Sedes de Válvulas	
	Formas	OUTROS	Protetores de Termopar
	Pínos		Matrizes
	Punções		Retentores
	Neck Rings		Cones
	Machos		Plugs
	Placas de Válvulas		
MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	Polias		Rolos para Leito de Resfriamento
	Acoplamentos		Coquilhas
	Roldanas		
	Eixos		
	Reguas Guias		
	Buchas		
	Arruelas		
	Porcas		
	Engrenagens		
	Pínos		
	Contra Pesos		
	Mesas		
	Flanges		
Mancais			
Martelos			

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.67)

Tabela 9 – Designações **Propriedades Mecânicas mínimas, composições aproximadas e aplicações**

Grade	UNS Number	Composition (wt%)*	Matrix Structure	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
<i>Gray Iron</i>							
SAE G1800	F10004	3.40-3.7 C, 2.55 Si, 0.7 Mn	Ferrite + Pearlite	124 (18)	—	—	Miscellaneous soft iron castings in which strength is not a primary consideration
SAE G2500	F10005	3.2-3.5 C, 2.20 Si, 0.8 Mn	Ferrite + Pearlite	173 (25)	—	—	Small cylinder blocks, cylinder heads, pistons, clutch plates, transmission cases
SAE G4000	F10008	3.0-3.3 C, 2.0 Si, 0.8 Mn	Pearlite	276 (40)	—	—	Diesel engine castings, liners, cylinders, and pistons
<i>Ductile (Nodular) Iron</i>							
ASTM A536	F32800	3.5-3.8 C, 2.0-2.8 Si, 0.05 Mg, <0.20 Ni, <0.10 Mo	Ferrite	414 (60)	276 (40)	18	Pressure-containing parts such as valve and pump bodies
	F34800		Pearlite	689 (100)	483 (70)	3	High-strength gears and machine components
	F36200		Tempered martensite	827 (120)	621 (90)	2	Pistons, gears, rollers, slides
<i>Malleable Iron</i>							
	F22200	2.3-2.7 C, 1.0-1.75 Si, <0.55 Mn	Ferrite	345 (50)	224 (32)	10	General engineering service at normal and elevated temperatures
	F23131	2.4-2.7 C, 1.25-1.55 Si, <0.55 Mn	Ferrite + Pearlite	448 (65)	310 (45)	6	
<i>Compacted Graphite Iron</i>							
ASTM A842	Grade 250	3.1-4.0 C, 1.7-3.0 Si, 0.015-0.035 Mg, 0.06-0.13 Ti	Ferrite	250 (36)	175 (25)	3	Diesel engine blocks, exhaust manifolds, brake discs for high-speed trains
	Grade 450		Pearlite	450 (65)	315 (46)	1	

* The balance of the composition is iron.

FONTE: JR, Willian D. Callister - Materials Science and Engineering (2007, p.369) *apud* ASM Handbook, vol. 1, Propriedades e Seleção: Ferros, Aços e ligas de alto rendimento, 1990.

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS

Os Ferros Fundidos são obtidos a partir da fusão de Ferro-Gusa, Sucatas e Ferros – Liga podendo também ser incluídos outros elementos de ligas (Cromo, Níquel, Cobre Manganês, Silício, Titânio e Magnésio) dependendo da composição química e das propriedades necessárias para cada liga.

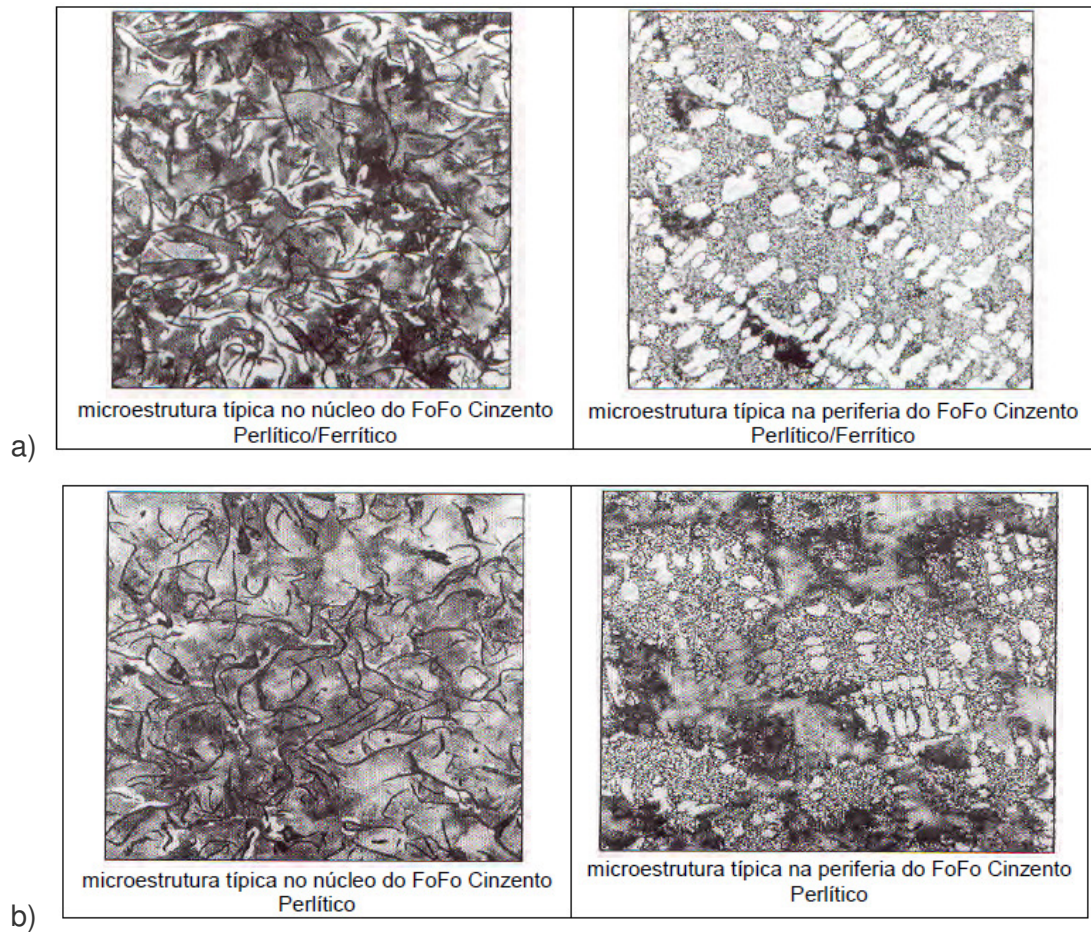
Essas ligas são geralmente moldadas em coquilhas ou processos manuais, (Moldagem à verde) e automáticas (Shell molding).

Os principais problemas na fabricação dos Ferros Fundidos são as porosidades, junta fria e rechupes, sendo esses defeitos corrigidos na maioria das vezes por acertos na Umidade do molde, composição química, modificação nas temperaturas e no sentido de alimentação da peça, (alteração nos canais e massalotes) , substituição dos machos, tintas e outros insumos existentes, em cada processo de fabricação.

A classificação dos Ferros Fundidos, pode atender as normas ASTM (Americana)

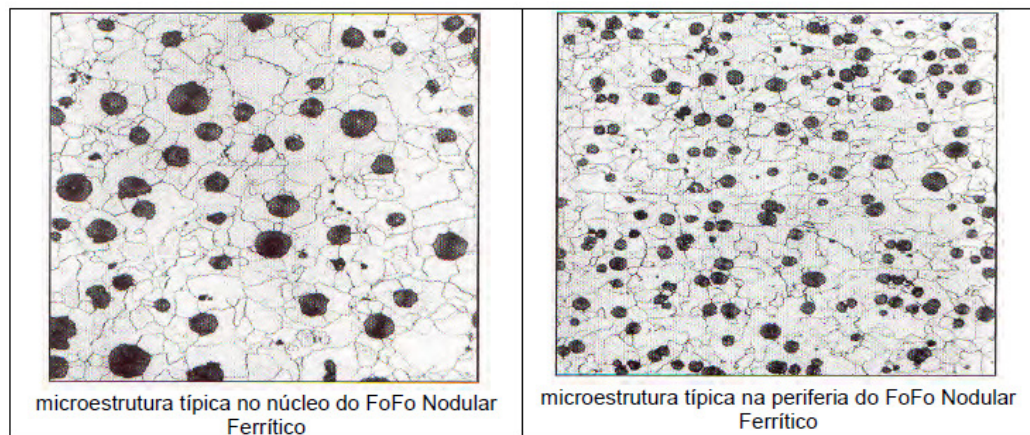
DIN (Alemã) e ABNT (Brasileira) NBR 6589 (Fofa Cinzento) e 6916 (Fofa Nodular).

Fotografia 8 (a – b) – **Microestrutura típicas dos ferros fundidos cinzentos**



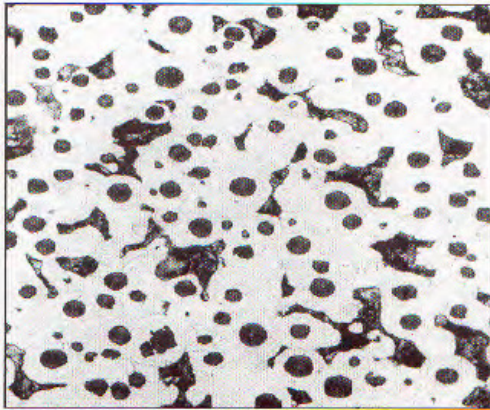
FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.70)

Fotografia 9a – **Microestrutura típicas dos ferros fundidos nodulares**

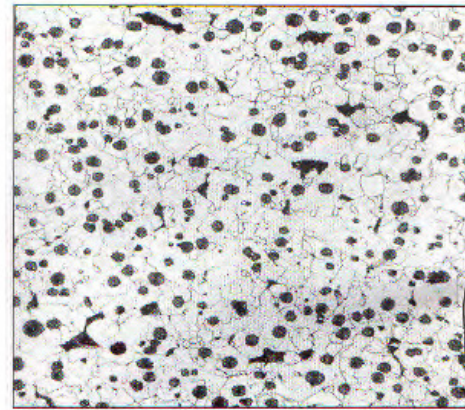


FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.71)

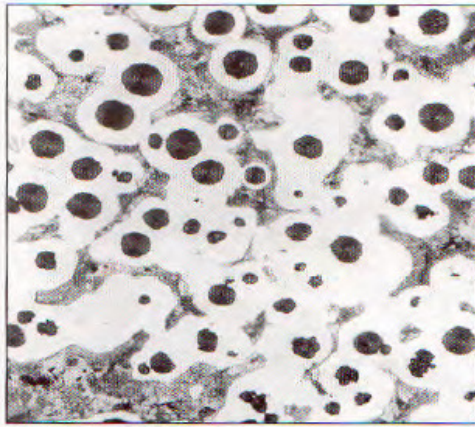
Fotografia 9b,c e d – Microestrutura típicas dos ferros fundidos nodulares



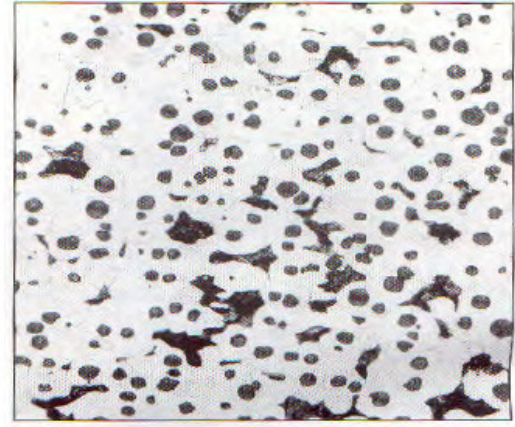
b) microestrutura típica no núcleo do FoFo Nodular
Ferrítico/Perlítico



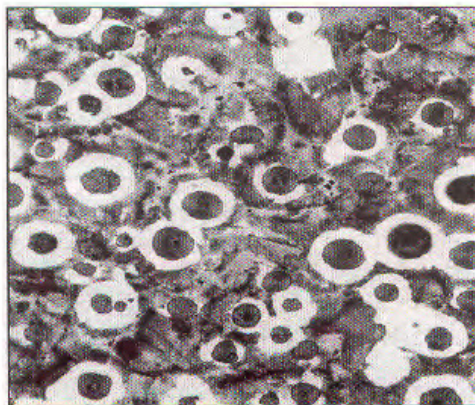
microestrutura típica na periferia do FoFo Nodular
Ferrítico/Perlítico



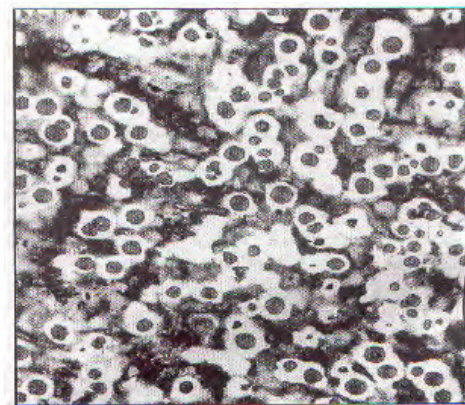
c) microestrutura típica no núcleo do FoFo Nodular
Perlítico/Ferrítico



microestrutura típica na periferia do FoFo Nodular
Perlítico/Ferrítico







d) microestrutura típica no núcleo do FoFo Nodular
Perlítico



microestrutura típica na periferia do FoFo Nodular
Perlítico

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.71)

Tabela 10 – Propriedades mecânicas, tipos de estruturas e normas de referência dos ferros fundidos cinzentos e nodulares

		FERRO FUNDIDO CINZENTO		FERRO FUNDIDO NODULAR	
Normas	ABNT NBR 6589	FC 200	FC 300	-	-
	ABNT NBR 6916	-	-	FE 42012	FE 50007
	ASTM A 159	G3000	G4000	-	-
	ASTM A 536	-	-	65-45-12	80-55-06
Estrutura	F = Ferrita P = Perlita				
Propriedades Mecânicas	Tração (MPa)	200(*)	300(*)	450	550
	Alongamento (%)	-	-	12	6
	Dureza (HB)	163-207	179-285	131-217	197-269
	Obs.: (*) Os valores de resistência à tração das classes FC 200 e FC 300, referem-se a ensaios realizados em corpos de prova obtidos a partir de barras com 30mm de diâmetro fundidas separadamente da peça.				

FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.72)

3 TÉCNICAS DE SOLDAGEM DOS FERROS FUNDIDOS

3.1 SOLDABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS

Na soldagem dos ferros fundidos, levam-se em consideração três aspectos fundamentais:

- Aspectos Metalúrgicos
- Procedimento de Soldagem
- Aspecto físico

3.1.1 Aspectos metalúrgicos

O fato do ferro fundido ter na sua composição química alto teor de carbono e silício, dificulta a soldagem, pois formará na zona afetada pelo calor (ZAC), uma “zona de transição. Regiões que apresentam tendência a elevada dureza é explicada pelo aparecimento de uma fase tipo cementita (Fe_3C), como aparece no ferro fundido branco ou pela estrutura martensítica conforme a velocidade de resfriamento.

Estas regiões explicam por que o ferro fundido trinca durante a soldagem, desde que não se tomem alguns cuidados.

Em princípio recomenda-se que a soldagem do ferro fundido seja feita (quando se utilizar o processo arco elétrico com eletrodos revestidos) com ligas a base de níquel, pelos seguintes motivos:

- O níquel apresenta fase austenítica, sendo dúctil o que favorece as dilatações e contrações que no ferro fundido são baixas;
- O níquel não combina com o carbono para formar carbonetos duros;
- O níquel em contato com o carbono do ferro fundido, apresenta uma estrutura de grãos refinados, o que favorece a região soldada.

Entretanto existem outras ligas para soldagem dos ferros fundidos, dependendo da aplicação, tais como Bronze-alumínio, Níquel-Cobre e eletrodos ferrosos isentos de níquel, bem como os arames tubulares.

3.1.2 Procedimento de soldagem

Alguns fatores deverão ser observados para elaborarmos um procedimento de soldagem:

- Tamanho da peça;
- Formato da peça;
- Condições de serviço da peça e;
- Se houver quebra ou desgaste.

Peças grandes e de formato complicado deverão ser soldadas com “técnica a frio”, pois é quase sempre impossível pré e pós aquecimento.

Peças de pequeno tamanho e formato simples deverão ser soldadas “a quente”, pois a frio exigiria mais tempo devido ao controle do calor (por ter pouca massa é mais complicado).

É importante avaliarmos em que condições trabalha a peça, se em contato com lubrificantes, meios corrosivos, calor, friccionando outra peça, pois com o tempo de trabalho haverá a impregnação da estrutura do ferro fundido e isto demandará limpeza criteriosa ou tratamento adequado.

No caso de peça quebrada, o cuidado quando soldar, será de preservar uma junta com características mecânicas compatíveis com o metal base; se houve desgaste, a proteção será também de revestir a área com material que tenha resistência superior à peça original.

3.1.3 Aspecto físico

O ferro fundido é como já mencionado anteriormente uma liga ferrosa com baixo alongamento, o que dificulta enormemente a sua soldagem.

Isto explica porque durante a soldagem podem ocorrer trincas ao longo da junta soldada, que aparecem como resultado das variações de temperatura provocando tensões diferenciais, face as dilatações e contrações na peça.

Durante a soldagem, para evitar o acima exposto, deve-se controlar a temperatura, se a frio, preservar o mais frio possível e, se a quente, manter a temperatura de interpasse e pós-aquecimento seguido de um resfriamento lento.

Nunca soldar ferro fundido em locais onde haja correntes de ar para evitar choque térmico e trincas.

A maioria dos insucessos na soldagem do ferro fundido vem do fato dos profissionais não conhecerem a correta técnica de soldagem, pois, sempre se baseando nos aços de baixo carbono, que possuem elevada ductilidade, aplicam a mesma forma de soldar e não se atentam ao fato que são materiais diferentes.

Outro grande erro que ocorria no passado: quando se tentava soldar ferro fundido, por exemplo, a frio, se o resultado não era bom, dava-se um pré-aquecimento que resolvia. Se perguntássemos ao profissional qual era a temperatura dada como pré-aquecimento, ele respondia: “um calorzinho”. Então concluiu-se que, em muitos casos, um pré-aquecimento pode favorecer uma soldagem, principalmente quando o ferro fundido estiver muito contaminado; porém, que “calorzinho”?

Baseados na composição química do ferro fundido e no tamanho e formato das peças, desenvolveu-se três formas de soldar:

- Soldagem a frio – processo a arco elétrico
- Soldagem a “meio” quente – processo a arco elétrico
- Soldagem a quente – processo oxiacetilênico

3.2. SOLDAGEM A FRIO

Este procedimento é recomendado para as aplicações em que:

- As peças e componentes não toleram a distorção ou deformação pós-soldagem.
- A peça é demasiadamente grande, de forma que se torna difícil de pré-aquecer.
- As instalações e equipamentos destinados ao pré-aquecimento são impróprias ou nulas.

3.2.1 Limpeza

Remover graxas ou óleos com Tricloretileno ou Tetracloreto de Carbono, ou quando possível aplicar uma calor na faixa de 150°C para queimar óleo ou graxa remanescente.

Remover áreas fatigadas ou inclusões de areia.

Avaliar e região através de exame visual ou líquido penetrante se há micro-fissuras, caso haja retirá-las também, e posteriormente remover o penetrante para evitar porosidades.

3.2.2 Teste de soldabilidade

Antes de se iniciar o teste de soldabilidade, identificar o material avaliando sempre em função das características, uso da peça e aspecto do cavaco. Obviamente que os recursos técnicos, como laboratório, seriam ideais, porém nem sempre estão disponíveis.

Ao se iniciar uma soldagem de ferro fundido propriamente dito, sempre que for desejável, fazer um reconhecimento rápido de qual o melhor eletrodo para este determinado tipo de ferro fundido, pode-se proceder da seguinte maneira:

Colocar sobre a peça (de preferência próximo ao local da solda), de topo, uma pequena barra de aço doce de 4cm a 5cm de comprimento, 2,5cm a 3cm de largura e 6mm de espessura.

Com o eletrodo que se pretende usar, depositar um filete de solda unindo a barra ao ferro fundido.

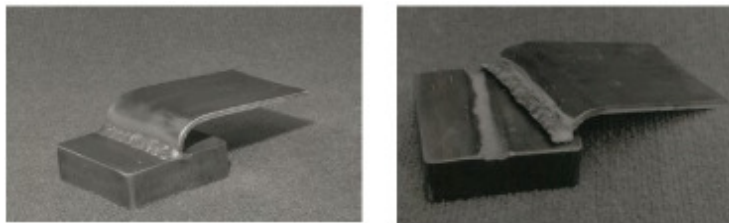
Depois do resfriamento normal, martelar a barra para separá-la do ferro fundido.

Examinar então a zona de ruptura, que forçosamente estará localizada entre a solda e a peça.

Se a solda trouxer uma parte do metal base, significa que houve fusão e está aprovada.

Se a solda tiver se soltado completamente, sem trazer parte do metal base, significa que não houve fusão adequada. Deve-se então repetir a experiência com outro tipo de eletrodo.

Fotografia 9 – Exemplo de teste de soldabilidade



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.73)

Tabela 11 – Composição química para eletrodos revestidos e arames tubulares aplicados pelos processos a arco elétrico segundo normas (SMAW e FCAW)

CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR UNDILUTED WELD METAL FOR SHIELDED METAL ARC AND FLUX CORED ARC WELDING ELECTRODES												
Weight Percent ^{(1) (2) (3)}												
AWS Classification ⁽⁴⁾	UNS Number ⁽⁵⁾	C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni ⁽⁶⁾	Mo	Cu ⁽⁷⁾	Al	Other Elements, Total
Shielded Metal Arc Welding Electrodes												
ENI-CI	W82001	2.0	2.5	4.0	...	0.03	8.0	85 min.	...	2.5	1.0	1.0
ENI-CI-A	W82003	2.0	2.5	4.0	...	0.03	8.0	85 min.	...	2.5	1.0-3.0	1.0
ENI-Fe-CI	W82002	2.0	2.5	4.0	...	0.03	Rem.	45-60	...	2.5	1.0	1.0
ENI-Fe-CI-A	W82004	2.0	2.5	4.0	...	0.03	Rem.	45-60	...	2.5	1.0-3.0	1.0
ENI-FeMn-CI	W82006	2.0	10-14	1.0	...	0.03	Rem.	35-45	...	2.5	1.0	1.0
ENICu-A	W84001	0.35-0.55	2.3	0.75	...	0.025	3.0-6.0	50-60	...	35-45	...	1.0
ENICu-B	W84002	0.35-0.55	2.3	0.75	...	0.025	3.0-6.0	60-70	...	25-35	...	1.0
Flux Cored Arc Welding Electrodes												
ENI-FeT3-CI ⁽⁸⁾	W82032	2.0	3.0-5.0	1.0	...	0.03	Rem.	45-60	...	2.5	1.0	1.0

FONTE: ASME seção II parte C- SFA 5.15, 2007 (2012, p.346)

Tabela 12 – Composição química para eletrodos revestidos aplicados pelos processos a arco elétrico segundo normas (SMAW)

CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR CORE WIRE FOR SHIELDED METAL ARC WELDING ELECTRODES												
AWS Classification ⁽⁵⁾	UNS Number ⁽⁵⁾	Weight Percent ⁽⁵⁾										Other Elements, Total
		C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni	Mo	Cu	Al	
Shielded Metal Arc Welding Electrodes												
Est	K01520	0.15	0.60	0.15	0.04	0.04	Rem.	...	...	...	...	...

FONTE: ASME seção II parte C- SFA 5.15, 2007 (2012, p.346)

Algumas das principais características do eletrodos encontrados no mercado:

- Depósitos usináveis.
- Resistentes a pressões e máxima resistência a trincas.
- Mínima penetração e diluição no metal base. Ideal para enchimento.
- Com revestimento especial, o qual pode ser aplicado em peças contaminadas. Também pode ser utilizado em contato com a peça, pois seu revestimento não é condutor.
- Máxima taxa de deposição com mínimo aporte de calor na peça, o que evita o endurecimento na ZAC. Soldagem em todas as posições.
- Eletrodo ferroso isento de Níquel. Depósitos não usináveis. Para ser usado como almofada e camada tampão em ferros fundidos de difícil soldabilidade.

3.2.3 Preparação do chanfro

Toma-se como referência o seguinte:

- Espessuras até 4 mm – soldar sem chanfro;
- Espessuras de 4 a 12 mm – soldar com chanfro simples e
- Espessuras acima de 12 mm – soldar com chanfro duplo.

Chanfrar a peça com eletrodos de chanfro, processos mecânicos ou esmeril. Quando este último for necessário, limar a superfície a ser soldada ou queimá-la com uma chama fraca e levemente oxidante de um maçarico oxi-acetilênico, antes da operação de soldagem.

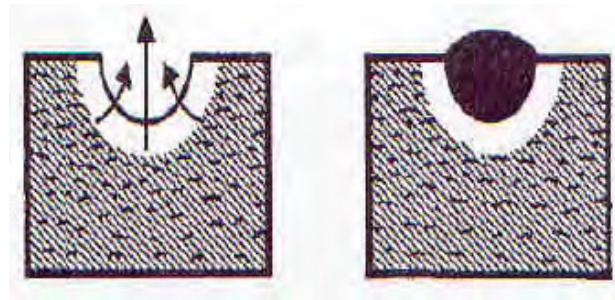
A utilização do eletrodo de chanfro eliminará os problemas de porosidade e má adesão provocados pelos contaminantes, gerando um substrato metalurgicamente limpo para a soldagem. A forma em “U” dos chanfros feitos com eletrodos metálicos geram menos tensões devido ao formato arredondado, porém os resíduos de carvão, quando for o caso, devem ser também removidos por meios mecânicos. Evitar o uso de talhadeiras.

Figura 9 – Chanfro executado com eletrodo metálico



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.74)

Figura 4 – Chanfro em “U” com eletrodo metálico para menor concentração de tensões e facilitar a saída de impurezas

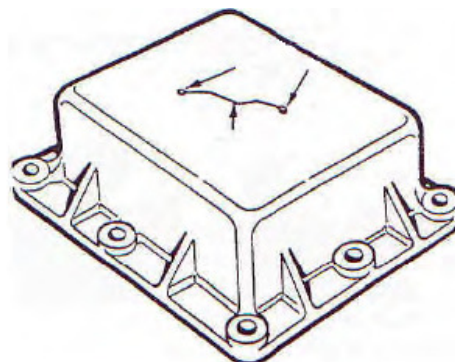


FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.74)

3.2.4 Limitar a trinca

Marcar cerca de 3cm além das extremidades da trinca e abrir um furo redondo, de diâmetro proporcional à espessura da peça.

Figura 5 – Furo redondo além da extremidade da trinca



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.75)

3.2.5 Chanfrar até as extremidades dos furos

Chanfrar de furo a furo, eliminando toda a trinca em sua profundidade. Quando a trinca avançar de um lado externo para o centro da peça, soldar do centro para o lado externo.

3.2.6 Trinca central

Quando a trinca for central, iniciar e avançar a soldagem simultaneamente nas duas extremidades.

3.2.7 Tamanhos do cordão e processo de deposição

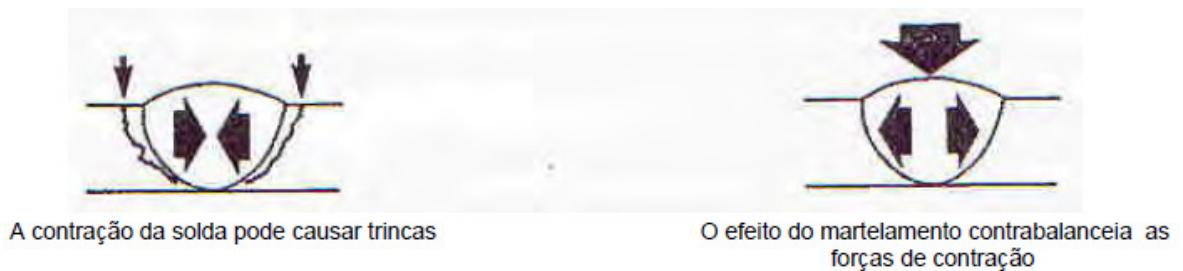
Soldar em pequenos cordões de 50 mm de máximo de comprimento, sem “tecimento” (oscilação do eletrodo de um lado ao outro do chanfro).

Soldar com arco curto, mantendo a distância do arco máximo de 2 a 5 mm, e preencher a cratera retrocedendo o eletrodo sobre o final do cordão.

3.2.8 Martelamento

Remover a escória verificando visualmente possíveis defeitos para cada cordão depositado, principalmente o passe de raiz, e em seguida martelar suavemente cada um, ainda quente, toda a vez que o arco for interrompido (martelo de bola). O martelamento regular dos cordões para alívio localizado de tensões é essencial durante o resfriamento, quando não se pode pré-aquecer.

Figura 6 – Efeito do martelamento



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.75)

3.2.9 Soldagem alternada

Soldar pelo sistema de retrocesso e cordões alternados. A alternância de deposição pode ser ainda mais benéfica quando a mesma é feita em caminhamento contrário, ou seja, ambos terminam no mesmo lugar. Assim forças contrárias se anulam. Este procedimento limita consideravelmente o aporte térmico e conseqüentemente reduz o risco de distorção da peça e as concentrações de tensões provocadas pela contração nas proximidades da ZAC, diminuindo desta forma a possibilidade de trinca. Atentar para necessidade ou não de se fazer a “unha” antes da deposição para emenda dos cordões.

3.2.10 Controle de temperatura

Manter a temperatura do metal adjacente de tal forma a permitir manter a mão sobre o cordão depositado, ou controlar a temperatura na região em torno de 60°C com lápis térmico ou pirômetro de contato.

3.2.11 Resfriamento lento

Deixar a solda resfriar lentamente, em local abrigado podendo se utilizar cal, mantas térmicas, dentro de um forno, e etc..

3.2.12 Considerações sobre a técnica anterior

- Não se requer um custoso processo de pré-aquecimento; a radiação térmica não provoca moléstias ao soldador.
- Não se requerem custosas operações de desmontagem/montagem. O processo pode ser realizado “in situ”.
- Ausência praticamente total de distorção ou deformação.
- Entretanto, o tempo de soldagem é grande.
- Pode haver a formação de uma ZAC dura e fina entre o cordão e o metal base, o que pode provocar dificuldades de usinagem pós-soldagem.
- As peças sujeitas a meios agressivos tais como vapor, agentes corrosivos ou lubrificantes, são mais difíceis de soldar. Podem aparecer porosidades ou falta de fusão entre o cordão e o metal base. Aplicar um calor “quebra-gelo” (100°C – 150°C) quando possível, antes da soldagem pode ajudar a evitar estes problemas, principalmente em dias frios ou que a umidade relativa do ar esteja alta.
- Registrar cada sequência utilizada com intuito de transformar o procedimento adotado num documento, que poderá ser útil futuramente para manter o que foi positivo como histórico, corrigir ou implementar possíveis detalhes para melhoria do processo.

3.3. SOLDAGEM A QUENTE

3.3.1 Situações para o emprego deste procedimento

- Quando as propriedades mecânicas após-usinagem e a cor da solda devem coincidir com a estrutura original do ferro fundido.
- Quando se pode posicionar e soldar a peça dentro de um forno.
- Quando é tolerável um certo grau de distorção, deformação ou oxidação superficial pós-soldadura.

3.3.2 - Soldagem a meia temperatura

- Limpeza conforme técnica anterior
- Teste de soldabilidade utilizando-se os mesmos consumíveis da técnica anterior
- Repetir os itens 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5 e 3.2.6 da técnica anterior
- Colocar a peça em um forno ou estufa e aquecê-la a 250°C-380°C.
- Manter esta temperatura durante a soldagem (maçaricos-chuveiro).
- Soldar em cordões contínuos e sem martelamento.
- Pós-aquecer a peça 50°C acima da temperatura de pré-aquecimento (400°C – 450°C)
- Resfriar lentamente no próprio forno ou em meio isolante como cal, cinza, etc., colocado próximo ao forno e, preferivelmente, com ligeiro aquecimento.
- Quando for empregado um forno improvisado, cobrir a solda terminada com um material isolante qualquer.

3.4.1 Soldagem a alta temperatura (para processo oxi-acetilênico)

Indicado para soldagens que devam apresentar a mesma tonalidade do metal base ou que devam receber um acabamento como esmaltagem, em peças de pequenas dimensões, e etc..

- Limpeza
- Empregar varetas de ferro fundido e também utilizar fluxo compatível.

Tabela 13 – Composição química das varetas e arame maciço aplicados pelos processos à chama (OFW -oxiacetilênico) segundo normas.

CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR RODS AND BARE ELECTRODES														
AWS Classification ⁽⁴⁾	UNS Number ⁽⁵⁾	Weight Percent ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾												Other Elements, Total
		C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni ⁽⁶⁾	Mo	Cu ⁽⁷⁾	Mg	Al	Ce	
Cast Iron Welding Rods for OFW														
RCI	F10090	3.2–3.5	0.60–0.75	2.7–3.0	0.50–0.75	0.10	Rem.	Trace	Trace	...	...	...	...	...
RCI-A	F10091	3.2–3.5	0.50–0.70	2.0–2.5	0.20–0.40	0.10	Rem.	1.2–1.6	0.25–0.45	...	...	...	...	...
RCI-B	F10092	3.2–4.0	0.10–0.40	3.2–3.8	0.05	0.015	Rem.	0.50	...	...	0.04–0.10	...	0.20	...
Electrodes for Gas Metal Arc Welding														
ERNI-CI	N02215	1.0	2.5	0.75	...	0.03	4.0	90 min.	...	4.0	...	...	...	1.0
ERNiFeMn-CI	N02216	0.50	10–14	1.0	...	0.03	Rem.	35–45	...	2.5	...	1.0	...	1.0

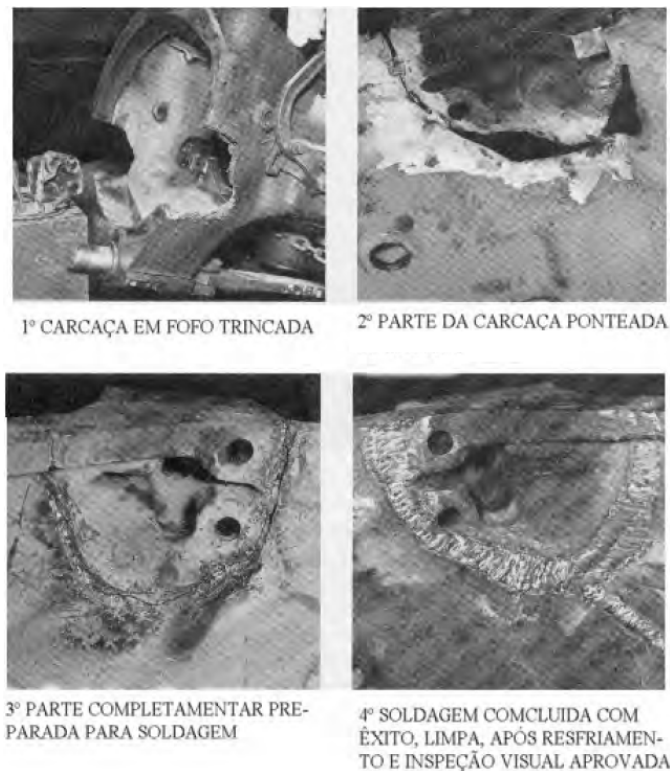
NOTES:

- (1) The weld metal, core wire, or the filler metal, as specified, shall be analyzed for the specific elements for which values are shown in this table. If the presence of other elements is indicated, in the course of this work, the amount of those elements shall be determined to ensure that their total does not exceed the limit specified for "Other Elements, Total" in the last column of the table.
- (2) Single values shown are maximum, unless otherwise noted.
- (3) "Rem." stands for Remainder.
- (4) Copper-base filler metals frequently used in the braze welding of cast irons are no longer included in this specification. For information pertaining to these materials see A7.6.
- (5) SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys.
- (6) Nickel plus incidental cobalt.
- (7) Copper plus incidental silver.
- (8) No shielding gas shall be used for classification ENiFeT3-CI.

FONTE: ASME seção II parte C- SFA 5.15, 2007 (2012, p.347)

- Preparação do chanfro repetir o item 3.2.3
- Limitar a trinca repetir o item 3.2.4
- Chanfrar até as extremidades dos furos repetir o item 3.2.5
- Trinca central repetir o item 3.2.6
- Colocar a peça em um forno ou estufa e aquecê-la entre 550 a 700°C.
- Manter a temperatura durante a soldagem (maçaricos-chuveiro).
- Durante a operação de soldagem por fusão utilizar fluxo e selecionar o bico do maçarico correspondente a espessura que se vai soldar, regulando a chama neutra, levemente carburante.
- Peças de grande porte poderão ser exigidas roupas apropriadas contra temperatura para o soldador.
- Alívio de tensões – aquecer a peça dentro do forno de 600 a 660°C e deixá-la resfriar até a temperatura de 100°C, quando então o forno poderá ser aberto.
- Registrar cada seqüência utilizada com intuito de transformar o procedimento adotado num documento, que poderá ser útil futuramente para manter o que foi positivo como histórico, corrigir ou implementar possíveis detalhes para melhoria do processo.

Fotografia 10 – Exemplo de uma soldagem bem sucedida



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.77)

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ELETRODOS DE FERROS FUNDIDOS

No que tange a soldagem dos ferros fundidos, os processos mais utilizados na prática são a soldagem com maçarico oxi-acetilênico e a soldagem com arco elétrico manual, embora o processo com arames tubulares hoje esteja sendo largamente empregado.

A soldagem com maçarico oxi-acetilênico, é uma soldagem a quente. O pré-aquecimento deve ser efetuado em função da forma e das dimensões da peça.

As vantagens do processo são: a fácil transmissão de calor e a sua difusão nas peças de pequenas dimensões. Se queremos soldar peças grandes, com o processo oxi-acetilênico, é indispensável manter a temperatura de pré-aquecimento durante a soldagem, o que torna necessária a construção de fornos de tijolos refratários, adaptados a cada peça.

A sequência da soldagem é ditada pela natureza da recuperação e a soldagem deve ser efetuada sem interrupção.

A soldagem com arco elétrico manual ou semi-automático, em especial a soldagem com as ligas de adição de natureza diferente da do ferro fundido, sem pré-aquecimento ou com ligeiro pré-aquecimento é, dependendo do caso, mais econômica.

Com estes processos, contrariamente à soldagem a quente com liga cuja composição é a da mesma natureza do ferro fundido, o problema da mudança de estrutura do metal de base é maior, por causa do resfriamento relativamente rápido da peça.

Sabe-se que as ligas de ferro com alto teor de carbono, entre os quais estão classificados os ferros fundidos, possuem à temperatura ambiente, uma estrutura que depende grandemente das condições de resfriamento.

No caso de um resfriamento rápido, constituintes duros e quebradiços podem aparecer na zona de transição e da ZAC, diminuindo assim a resistência às trincas e a facilidade de usinagem.

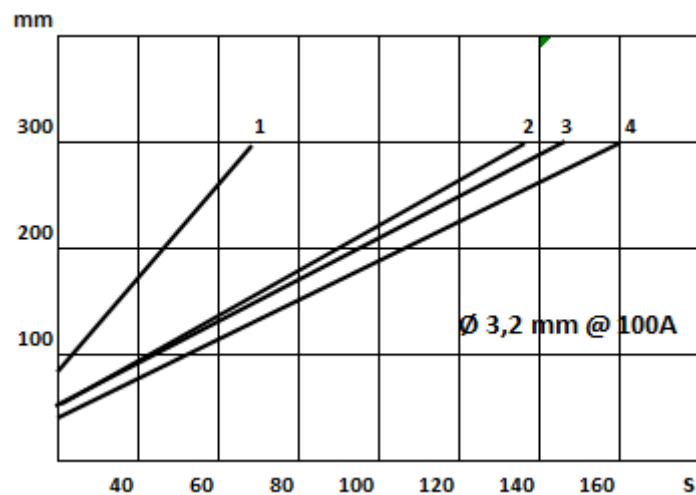
Neste caso, as propriedades próprias do ferro fundido são perdidas e suas possibilidades de utilização são muito restritas.

Os processos de soldagem exigindo um pré-aquecimento ao vermelho escuro, não necessitam nenhuma precaução particular a não ser assegurar à peça um resfriamento lento. No caso de soldagem a arco elétrico, sem pré-aquecimento ou com ligeiro pré-aquecimento, é preciso tomar todas as precauções necessárias para que a zona afetada pelo calor (ZAC) onde podem aparecer as modificações da estrutura, seja a menor possível.

A soldagem especificamente com eletrodos revestidos deve ser realizada utilizando uma baixa intensidade de corrente, um eletrodo de pequeno diâmetro, depositando cordões muito curtos, com freqüentes interrupções de maneira que esta transmissão de calor e as contrações sejam reduzidas o máximo possível. Sabe-se que o depósito de solda apresenta sempre uma estrutura de ferro fundido específica, determinada pelo balanceamento da energia resultante do ciclo de fusão e seu resfriamento. É neste balanceamento, pondo de lado a condutividade do arame e as dimensões da peça, que se encontra definida, que temos a influência do revestimento e as características de solda, variáveis para cada eletrodo, uma vez que a fusão metálica, no momento da solidificação, é caracterizada por um transporte de calor e de matéria.

O exemplo seguinte, onde são utilizados eletrodos diferentes com almas idênticas, mostra em que proporções os diversos componentes do revestimento podem agir sobre a qualidade e soldabilidade do depósito. A quantidade de energia necessária para soldagem, fornecida por uma fonte de corrente e tensão com características determinadas podem ter uma resistência aumentada pela distância do arco, o que acarreta uma absorção de energia mais elevada.

Gráfico 1 – Velocidade de soldagem de alguns eletrodos de ferro fundido



FONTE: WASSERMAN, Dr Rene – notas (1989)

Estas diferenças de velocidade determinam as várias possibilidades de utilização destes eletrodos. Graças ao revestimento e utilizando a mesma alma, quer ela seja de níquel ou ligas de níquel, são obtidos resultados fundamentalmente diferentes, embora esses eletrodos, pela composição química, possam ser classificados como equivalentes dentro da mesma norma. Em algumas situações portanto, a norma leva em conta, não a composição química do depósito, mas sim a composição química do arame.

Todavia estas indicações não são suficientes para definir um eletrodo. Esta definição depende grandemente no que diz respeito: a alma, a pureza e aos processos de fabricação do material utilizado. Inclusões ou eventuais películas de óxidos que existam na superfície da alma, podem ter uma influência desfavorável nas características de soldagem e possibilitam o aparecimento de poros ou projeções. No caso de uma alma de níquel, a regularidade de fusão é função dos elementos desoxidantes utilizados.

Todavia, a composição do revestimento, como já mencionamos acima, tem uma influência considerável sobre as características mecânicas e tecnológicas de um eletrodo e na sua soldabilidade.

Os constituintes ionizantes, não tem somente um papel preponderante na abertura e manutenção do arco, mas eles introduzem igualmente elementos de liga no material depositado. Favorecem as reações de desoxidação e as funções de escória, de maneira semelhante a fusão do aço. Além disso, recobrando o depósito, a escória protege-o contra reações contra atmosfera e modifica as condições de resfriamento.

As numerosas combinações entre diversos componentes do revestimento permitem, além da velocidade de deposição, do controle de arrefecimento e da transmissão de energia, adaptar o eletrodo às necessidades das diversas aplicações encontradas na prática. Assim graças à composição do revestimento, foi possível a indústria de consumíveis especiais desenvolver um tipo de eletrodo para ferro fundido cinzento, produzindo uma zona de transição macia que assegura uma boa usinabilidade. O arco é estável e a transferência do metal se faz por finas gotas. A espessura do revestimento é determinada de modo a que os eletrodos possam soldar em todas as posições, tanto para união como para revestimentos de proteção anti-desgaste. Um outro tipo de eletrodo foi também desenvolvido, partindo da mesma alma, com revestimento mais espesso, para permitir a reconstrução de partes gastas e em peças que apresentam defeitos de fundição, conferindo ao depósito uma elevada resistência a trincas. Este eletrodo aproxima-se dos eletrodos de alto rendimento.

Outra vantagem, os elementos da liga escolhida, permite dar ao depósito uma cor próxima à do ferro fundido.

Um terceiro tipo de eletrodo que faremos menção no presente trabalho foi também desenvolvido com a mesma alma dos anteriores, com algumas modificações nos componentes do revestimento, permitindo a obtenção de uma transferência retardada das gotas com maior penetração e uma boa ligação no metal de base. Graças ao arrefecimento mais lento do banho,

as impurezas têm tempo, através do metal líquido, de chegar à superfície, o que permite obter um depósito isento de porosidades, mesmo sobre ferro fundido velho e embebido de óleo.

O teor básico do revestimento é neste caso aumentado, para absorver quantidades maiores de fósforo e enxofre.

A utilização de tais eletrodos é sempre decidida em ensaios práticos, a fim determinar qual o eletrodo que melhor ligação apresenta no metal base, muitas vezes desconhecido.

Quando o processo se aplica sem pré-aquecimento, os eletrodos são depositados em cordões curtos e alternados, de modo a que a peça mantenha sempre uma temperatura que se possa tocar com a mão, entre cada cordão.

A sequência de soldagem é normalmente ditada pela natureza da reparação.

Se são peças rígidas, deve-se proceder a um pré-aquecimento e soldar sem interrupção. Limita-se assim os perigos de trincas, ocasionadas pela aparição de zonas duras na zona de transição, entre o metal depositado e o metal base.

Existem no mercado ainda alguns eletrodos especiais de ligas de níquel que apresentam de mesmo modo, características diferentes de soldagem, de acordo com a composição do revestimento.

Isto se traduz por diferenças de sensibilidade à porosidade, resistência ao desgaste e a fissuração do depósito.

A semelhança de cor com o metal de base é superior a dos eletrodos com alto teor de níquel. A dureza do depósito puro situa-se entre 150 a 230 HB.

A resistência a tração é cerca de 50 kp/mm² e o alongamento até 25%.

O estudo aprofundado da influência dos diversos constituintes do revestimento e dos elementos constituintes do revestimento e dos elementos de liga, numa liga de níquel, sobre modificações da estrutura, assim como, sobre a precipitação da grafita na zona de transição e no depósito, deu origem a um eletrodo que apresenta um mínimo de martensita de níquel, no seu depósito.

A estrutura do seu depósito é austenítica, com inclusões de grafita esferoidal, a qual confere uma boa resistência a trincas, ao contrário dos eletrodos de alto teor em níquel, nos quais a grafita se encontra na forma de lamelas.

A forma esferoidal do carbono enfraquece menos a estrutura metálica e confere-lhe maior resistência mecânica. As trincas que aparecem no depósito são na sua maioria trincas a quente e que podem ter diferentes origens. Assim, pela aparição de trincas a quente no cordão de solda, pode-se admitir uma formação de camadas líquidas intermetálicas entre os cristais em forma ramificada, sob a influência da segregação dendrítica, no final da solidificação do metal fundido.

Neste líquido, as impurezas se acumulam muitas vezes, como é o caso, por exemplo, do sulfeto de níquel, formando com o níquel um eutético de ponto de fusão mais baixo, o qual, em se precipitando diminui a resistência da estrutura nos contornos de grãos. Uma adição de manganês diminui este risco, mas não elimina o fato de que o carbono, agora dissolvido no líquido, se separe no momento da solidificação, sob a forma de grafita nos contornos de grãos. Num depósito de níquel puro ou de uma liga de níquel, o teor de carbono é geralmente de 0,5 a 1,5%, o que é de fato mais elevado que a solubilidade do carbono no níquel à temperatura ambiente. Por esta razão, o carbono se separa sobre forma de grafita do depósito.

Nas ligas de alto teor de níquel, a grafita se forma muitas vezes como uma rede e constitui assim o começo das trincas a quente, porque as tensões que se criam durante o processo de arrefecimento são mais fortes que a resistência da liga.

Por outro lado, nas ligas de alto teor de níquel, a formação de dendritas grosseiras durante a solidificação, favorece as trincas a quente. Pela adição de elementos apropriados no metal de adição ou no revestimento, existe a possibilidade de agir sobre a formação de grafita durante a solidificação. Graças a formação de grafita esferoidal, a aparição de uma rede coerente de grafita nos contornos de grãos pode ser evitada e assim, o risco de aparecimento de trincas a quente pode ser diminuído.

Os elementos que como o fósforo, o silício, o oxigênio, e etc., contribuem para trincas a quente e podem ser reconduzidas a fracas porcentagens por meio do revestimento. Sabemos que as ligas a base de níquel fundido apresentam uma alta solubilidade para os gases como azoto e hidrogênio. É por isso que se deve evitar os produtos que forma tais gases (os ligantes orgânicos, por exemplo) e na armazenagem manter os eletrodos, uma vez secos, ao abrigo da umidade.

Pelos ensaios realizados com diferentes elementos de adição nas ligas a base níquel aumentou-se, no momento da solidificação, o número de nucleantes na liga, obtendo-se assim uma estrutura fina com formação de grafita esferoidal.

Além disso, os elementos das ligas tem um efeito grafitizante sobre a liga. Eles evitam o aparecimento de ledeburita na zona de transição. A fraquíssima tensão do arco, assim como a possibilidade de soldar com baixas intensidades de corrente, permitem reduzir a zona fundida do metal de base e reduzir a zona afetada pelo calor (ZAC). Ensaio realizado no ferro fundido cinzento do tipo GG 18 e no ferro fundido de grafita esferoidal do tipo GGG 42 mostram zonas de transição praticamente sem ledeburita. Na zona de transição, pode-se descobrir regiões muito estreitas, parcialmente interrompidas por martensita de níquel. Não se distinguem traços de ledeburita. Nesses cordões, as medidas de dureza na zona de ligação, não ultrapassam 320HV10 para o ferro fundido GGG 42. Com isso podemos deduzir que usinabilidade é boa e não apresenta nenhuma dificuldade especial.

Diminuindo o calor fornecido e alterando os elementos de liga, as modificações de estrutura podem praticamente evitar as regiões duras na zona de transição.

A soldagem de máquinas, médias ou grandes, submetidas a esforços dinâmicos, constituem igualmente um bom exemplo. No momento da moldagem, por causa das condições desfavoráveis ou porque, depois de vários anos sob efeito de cargas excessivas ou outras causas, podem aparecer certos defeitos. Trata-se de os eliminar a todo custo, sob pena de ter que sucatear a peça ou arcar com perdas importantes devido a paradas de produção.

Para a reparação deste gênero de peças, há todo o interesse em que não se produza nenhuma trinca ou microtrinca por fadiga e se propague às zonas vizinhas da soldagem. A utilização de um eletrodo de liga de níquel apresentando as qualidades já mencionadas, tais como: alta resistência à trincas a quente, bom alongamento, grão fino com formação de grafita esferoidal e zona de transição macia sem ledeburita, é uma necessidade.

No caso de peças complicadas com paredes finas, aparecem tensões internas inevitáveis no momento da fundição, as quais se podem juntar durante a soldagem às tensões suplementares, que pelo desenvolvimento de um calor irregular, dão início a trincas ainda mais ramificadas.

Por estas razões, devemos dar a maior atenção a sequência de soldagem, às condições de temperatura e a realização do cordão.

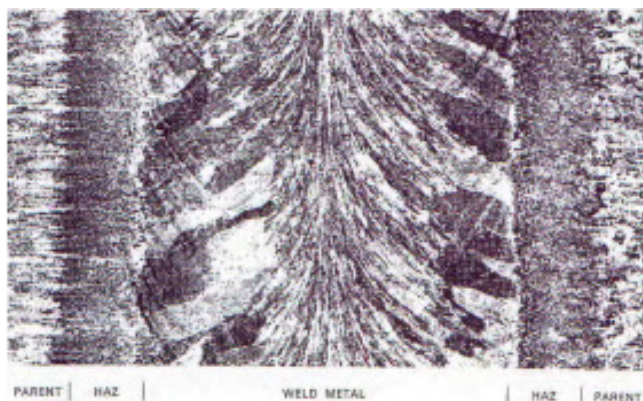
Devemos também dar uma importância primordial a preparação da junta a fim de que seção inicial de soldagem e a zona de ligação estejam absolutamente isentas de trincas.

As possibilidades de soldagem dos ferros fundidos sem trincas e facilmente usináveis, foram examinadas e comparadas com a constituição dos eletrodos de soldagem.

4 CONTROLE DOS FATORES DE FALHAS NA SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO

Os seguintes parágrafos descrevem alguns dos fatores que podem provocar falhas na soldagem e alguns métodos para controlar sua influência.

Fotografia 11 – **Seção transversal das zonas da estrutura soldada**



FONTE: Soldagem de Manutenção – Eutectic + Castolin (2012, p.79)

4.1 ZONA FUNDIDA

A zona fundida é composta do metal base (ferro fundido) e do metal de adição (consumível) que se misturam (diluição).

Normalmente a fundição desta zona soldada não tem tempo suficiente para precipitar grafita livre, e forma em seu lugar carboneto de ferro, frágil, que pode fissurar-se ou formar pontos duros impossíveis de se usar.

A quantidade de carbonetos e sua dispersão pode reduzir-se graças a determinados elementos de ligação na soldagem, empregando para isso ligas, procedimentos e processos de baixo aporte de calor com o fim de trabalhar com diluição mínima.

4.2 ZONA DE LIGAÇÃO

Esta zona se situa próxima a linha de fusão entre material fundido e parcialmente fundido que não se misturou com a zona fundida e que conseqüentemente pode gerar problemas de fragilização e formação de carbonetos.

As ligas, procedimentos e processos de baixo aporte de calor pode limitar a largura e amplitude da zona de ligação.

4.3 ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC)

Esta zona, situada nas vizinhanças da solda, alcança temperaturas que provocam transformações metalúrgicas sem se fundir. A grafita livre existente não se altera normalmente pode provocar surgimento de carbonetos mas a matriz se transforma facilmente em estruturas martensíticas, duras e frágeis ao se resfriar rapidamente.

A fragilização da ZAC pode controlar-se utilizando os níveis de pré-aquecimento correspondentes, velocidades de resfriamento menores e tratamento térmico pós-soldagem (pós-aquecimento).

4.4 TENSÕES

As forças de dilatação e contração durante a soldagem provocam naturalmente um certo grau de distorção ou tensões residuais. As fundições de baixa ductilidade podem conseqüentemente fissurar-se na zona de ligação ou na ZAC endurecida.

Os níveis de tensões podem limitar-se mediante um controle adequado dos níveis de pré-aquecimento, aporte térmico, procedimentos de soldagem, distribuição dos cordões e pós-aquecimento.

4.5 TRINCAS DE CRATERA

As pequenas trincas na cratera são comuns no extremo do cordão de soldagem quando se corta rapidamente o arco formando um repuxo pouco profundo. Se não eliminar as trincas, estas podem aumentar facilmente durante o processo de soldagem ou depois do mesmo, até se transformar em longas trincas longitudinais.

A melhor maneira de evitar o aparecimento destas trincas de cratera consiste em reencher a mesma, antes de interromper o arco e afastar o eletrodo.

4.6 CONTAMINAÇÃO

A superfície da maioria dos ferros fundidos apresenta freqüentemente uma excessiva concentração de enxofre e fósforo, inclusões de areia e escória que devem ser removidos antes de se executar a soldagem.

Para “purificar” o metal base e conseqüentemente proporcionar uma melhor ligação, pode-se utilizar um eletrodo a base de ferro ou a base de níquel indicados para reparos de ferros fundidos contaminados. Com isso elimina-se os níveis excessivos destes contaminantes antes de se iniciar a soldagem.

4.7 POROSIDADE

Devido a natureza porosa do ferro fundido, as peças com um tempo prolongado de serviço e em contato com graxa, óleo, lubrificantes ou produtos químicos absorvem estes contaminantes, gerando emanações de gases que provocam porosidade ou defeitos por fusão incompleta durante a soldagem.

A porosidade pode também ser provocada pela umidade ou por excessivas velocidades de soldagem.

A maioria dos problemas de porosidade provocados por contaminantes e por presença de umidade, podem ser evitados, observando-se os procedimentos corretos de preparação da peça antes da soldagem.

4.8 APORTE DE CALOR NA SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO

A dimensão da ZAC em uma peça de ferro fundido soldada, depende do aporte térmico linear gerado pelo arco elétrico e da maneira como o mesmo é manipulado. Para se minimizar os efeitos de endurecimento da ZAC e o acúmulo de tensões residuais prejudiciais, a soldagem é realizada, com mais garantia, empregando-se uma combinação de processos, ligas e procedimentos de baixo aporte térmico.

4.9 CORDÕES ESTREITOS

Normalmente se recomenda a deposição de cordões estreitos e curtos para garantir um mínimo aporte térmico local a peça. Como referência pode-se considerar a largura do cordão proporcional a 3 vezes o diâmetro da alma do eletrodo utilizado.

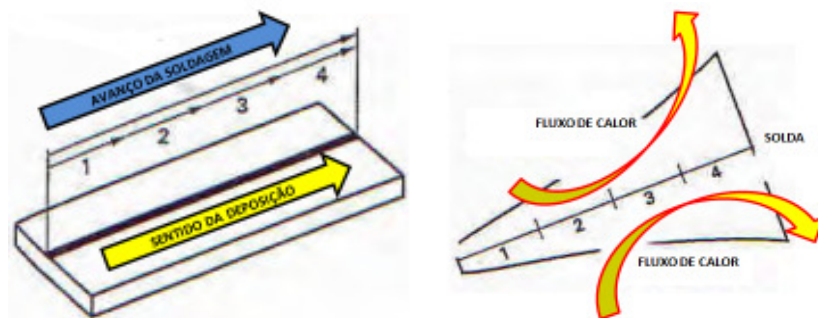
4.10 PROCEDIMENTO DO “PASSO PEREGRINO”

Este procedimento resulta muito eficaz para reduzir as perigosas tensões de contração da soldagem, graças a mudança da distribuição de calor acumulado na zona de soldagem.

A seqüência de passo peregrino supõe o aporte regular e com cordões curtos na direção prevista de progressão de soldagem. Cada cordão deve terminar no início do cordão anterior (vide figura seguinte), tomando-se os devidos cuidados para, ao final de cada cordão, evitar-se as trincas de cratera.

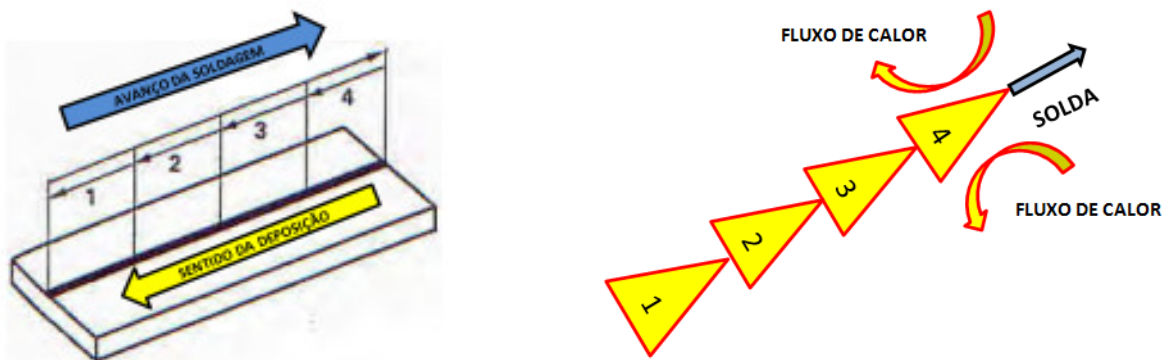
Este procedimento é muito útil tanto para soldagem de uma estrutura pesada de seções delgadas como para soldagens multi-passes de forma a se conseguir uma distribuição mais uniforme de calor na peça. Porém, quando as trincas a soldar são muito largas, recomenda-se utilizar a soldagem “intermitente” e deixar bastante espaço entre cada cordão, para se evitar a acumulação de calor e completar o trabalho mais rápido.

Figura 7 – Sequência convencional de soldagem



FONTE: O autor

Figura 8 – Sequência de soldagem “passo peregrino”



FONTE: O autor

4.11 RESFRIAMENTO

As tensões residuais finais presentes em uma peça de ferro fundido soldada estão também condicionadas pelas altas velocidades de resfriamento, que podem gerar problemas de fissuração.

A diminuição da velocidade de resfriamento cobrindo a peça com um isolante térmico, areia, cal, vermiculita ou introduzindo em um forno, minimizará os riscos de fissuração.

4.12 APLICAÇÕES DE SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO

Existem inúmeras razões que explicam a necessidade de utilização dos procedimentos de soldagem para os ferros fundidos.

4.12.1 Fundições novas

Defeitos de fundição - Provocados por porosidades, inclusões de areia, contrações ou fissuras. Podem ser normalmente reparados de forma econômica, especialmente quando se trata de peças grandes, complexas ou se aparecerem posteriormente falhas após a usinagem.

Erros de usinagem - As peças acidentalmente sobre-usinadas ou com orifícios perfurados mal alinhados, podem ser reparadas sempre que for possível depositar suficiente material de adição para evitar a reusinagem da ZAC.

União, montagem ou fabricação - Cada vez mais é utilizado ferro fundido em lugar de aço para as uniões dissimilares ou para a fabricação de peças novas devido ao seu menor custo, maior facilidade de usinagem e melhores propriedades de lubrificação ou amortecimento.

4.12.2 Fundições usadas

Peças fissuradas ou rompidas - O impacto, sobrecarga ou sobreaquecimento das peças de ferro fundido cinzento em serviço pode provocar a propagação de fissuras ou a ruptura

completa das mesmas. Sempre que se lida com metal base em boas condições e soldável, pode-se recuperar a peça ao invés de sucateá-la ou substituir por peças novas.

Peças desgastadas ou corroídas - As zonas da peça sujeitas a ação dos desgastes podem ser freqüentemente recuperadas sem problema em relação as suas tolerâncias físicas, além de melhorar significativamente suas propriedades químicas (Ex.: Resistência a corrosão).

Modificação no desenho das peças - Muitas ferramentas fabricadas em ferro fundido exigem modificações concretas de desenho ou alterações dimensionais que com freqüência são possíveis através dos processos, ligas e procedimentos de soldagem adequados.

4.13 RECOMENDAÇÕES

A escolha de um processo de reparação varia de caso para caso, segundo a técnica que se adota. É preciso ter em conta as exigências técnicas requeridas pelos esforços existentes, pela usabilidade do depósito, pela sua compatibilidade com a cor do metal base, pelas dimensões da peça e ainda pelas considerações de ordem econômica, tais como: o custo de reparação, as perdas de produção devido a paradas de máquinas, etc..

Para a soldagem de ferros fundidos, sem falar na qualidade do metal de adição, é preciso ter em conta um fator muito importante e que muitas vezes subestimamos: A EXPERIÊNCIA E OS CONHECIMENTOS DO SOLDADOR.

A decisão concernente ao desenvolvimento do processo, que melhor se adapta ao metal de adição correspondente, é desde logo, determinada pelos resultados da soldagem. Em vista dos numerosos parâmetros que podem ser levados em conta na soldagem de manutenção e reparo, é absolutamente necessário dar ao soldador a possibilidade de se aperfeiçoar no que diz respeito às suas qualificações, para poder escolher o produto que melhor se adapta ao trabalho a realizar. Para isto é aconselhável, que os soldadores possam seguir cursos de formação, tanto práticos como teóricos, para poderem se familiarizar com novas técnicas de aplicação e, de acordo com o caso de reparação, para que possa determinar com todo conhecimento de causa, os meios específicos a utilizar, tendo em conta as maiores exigências, sem ficarem limitados às análises e as propriedades mecânicas do metal de adição.

4.13.1 Paciência

A soldagem de ferro fundido além de um procedimento bem elaborado demanda muitas vezes de paciência. A pressa na soldagem de ferro fundido em qualquer fase, pode comprometer um longo e desgastante trabalho.

5 APLICAÇÕES DE OUTROS PROCESSOS NA RECUPERAÇÃO DE FERRO FUNDIDO

5.1 ASPERSÃO TÉRMICA

Também conhecida como “Metalização”, pode ser definida como “Grupo de processos onde um material metálico, cerâmico ou polímero, é depositado em estado fundido ou semi-fundido sobre uma superfície preparada, formando um depósito.”

Para uma perfeita ligação da liga com a peça, faz-se necessário após a limpeza química da mesma, o jateamento com granalha de aço angular ou a geração de um rosqueamento no caso de peças cilíndricas, para que a peça fique bem rugosa, permitindo uma boa ancoragem e consequentemente, uma excelente ligação mecânica.

A peça pode ser usinada ou retificada, dependendo do tipo e dureza da liga depositada.

Figura 9 – Esquema simplificado da aplicação com ligas micropulverizadas



FONTE: Catálogo de Aspersão Térmica – Eutectic + Castolin (p.2)

5.1.2 Tipos de ligas

As ligas para Aspersão Térmica são fornecidas em pó ou arame e divididas de duas formas - a frio ou a quente.

As ligas a frio (pó ou arame) atingem no processo de aplicação no máximo 250°C. São utilizadas para revestir e recuperar peças que não podem ser aquecidas, como eixos, cilindros e chapas finas, pois estes podem se deformar com o calor ou sofrer alguma alteração metalúrgica. Neste processo a ligação se faz de forma mecânica, sem união metalúrgica.

Já as ligas a quente (pó) atingem temperaturas de 860 a 1100°C, dependendo do tipo de liga, e podem ser aplicadas em peças sem risco de deformação ou alteração metalúrgica. A ligação do pó fundido com a peça se faz por difusão (Processo Chama-Pó) e por fusão (Processo PTA), obtendo ligação metalúrgica com a peça.

Figura 10 – Processos de Aspersão Térmica e aplicações



FONTE: Catálogo de Aspersão Térmica – Eutectic + Castolin (p.2)

Figura 11 – Ilustração dos Processos de Aspersão Térmica

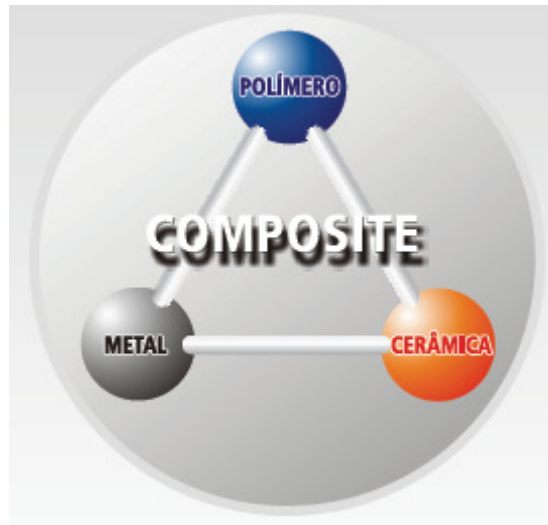


FONTE: Catálogo de Aspersão Térmica – Eutectic + Castolin (p.1)

5.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos, ou em Inglês **“Composite”**, é a união de 2 ou mais materiais que pertencem aos 3 grupos bases: metais, cerâmicos e polímeros. O material “Composite” faz com a sua estrutura tridimensional reticulada, uma forte ligação com o material de base através de uma reação físico-química de superfície.

Figura 12 – Ilustração esquemática de materiais compósitos



FONTE: Catálogo de Aspersão Térmica – Eutectic + Castolin (p.1)

A maioria dos materiais tipo “**Composite**”, encontrados no mercado tem como característica ser em forma de pasta que endurece após a mistura com o catalisador, proporcionando a recuperação dimensional de peças e revestimento anti-desgaste.

São geralmente aplicados com uma espátula e possuem diferentes tipos para os diferentes mecanismos de desgastes, e como se trata de um processo a frio possuem um relevante campo de aplicações em ferros fundidos submetidos a corrosão, abrasão, falhas de fundição, reconstrução, vedação de vazamentos, e etc.

Figura 13 – Ilustração esquemática de aplicação de materiais compósitos



FONTE: Catálogo do Mecatec – Eutectic + Castolin (p.1)

REFERÊNCIAS

CHIAVERINI, Vicente: **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1985, 518 p.

ALVES, Fabio: **FBTS: Inspetor de Equipamentos-Materiais Metálicos**. 2008: apresentação, 124 slides.

CASTOLIN, Eutectic +: **Curso Técnico Soldagem de Manutenção**. São Paulo, 2012, 124 p.

JR, Willian D. Callister – **Materials Science and Engineering**. 2007, 975 p.

_____. **ASME Section II part C : SFA 5.15**. 2007, 18 p.

WASSERMAN, Rene: **Notas**. 1989, 18p.




CASTOLIN, Eutectic +: **Catálogo de Aspersão Térmica**. São Paulo, 2012. 8 p.

CASTOLIN, Eutectic +: **Catálogo Geral Mecatec**. São Paulo, 2012. 2 p.

CASTOLIN, Eutectic +: **Bando de Dados TEROLINK**. São Paulo, 2012

FATEC: **Revista do Departamento de Mecânica da Faculdade de Tecnologia de São Paulo – Nº 1**. São Paulo: 1988-1989, 22 P.

ANEXO A – Recuperação de barramento de torno em Ferro Fundido Nodular

Equipamento	Torno CNC	Peça	Barramento	Metal Base	Ferro Fundido Nodular
Processo de recuperação	Aspersão Térmica	Tipo de consumível	Liga micropulverizada	Tipo de liga	Liga de níquel
Custo da peça nova	2381 USD	Custo do processo	24 USD	Economia anual	2357 USD
Descrição do problema	Falhas na superfície da peça ocasionadas durante o processo de fabricação.				
Solução	Limpar as áreas com falhas de fundição através de um processo mecânico (rebolo ou jateamento com granalha de aço). Aplicar a liga micropulverizada através de equipamento de aspersão térmica. Retificar.				
Vantagens	Recuperação da superfície da peça. Sem depreciação da qualidade evitando sucateamento da mesma. Baixo custo da solução.				
Solução anterior	Sucateamento da peça. Fabricação de uma peça nova.				
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO					
					
Barramento do torno a ser revestido.		Barramento sendo metalizado.		Liga sendo fundida após aplicação.	
OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual quando se manuseia equipamentos de aspersão térmica					


FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_0222 (2012)

ANEXO B – Recuperação de caracol de maromba em Ferro Fundido Nodular

Equipamento	Maromba Bonfanti	Peça	Caracol de Maromba	Metal Base	Ferro Fundido Nodular
Processo de recuperação	Arame tubular	Tipo de consumível	Resistente à abrasão	Tipo de liga	Composição química não informada pelo fabricante
Custo da peça nova	9220 USD	Custo do processo	4337 USD	Economia anual	4883 USD
Descrição do problema	O caracol tem a função de promover a mistura final da argila bem como empurrar esse material contra a forma provocando a extrusão do mesmo.				
Solução	A abrasão provocada pela argila combinada com a alta pressão provoca o desgaste do caracol. Aplicação de revestimento protetivo através de eletrodo contínuo tubular.				
Vantagens	Aceleração considerável do processo de produção, o que resulta em redução de custo de fabricação e melhora o aspecto visual da peça pronta.				
Solução anterior	Aplicação de revestimento protetivo através de eletrodo revestido.				
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO					
					
Orientação para execução do tipo revestimento		Soldagem		Resultado da soldagem	
OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual quando se manuseia equipamentos de soldagem.					




FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_0599 (2012)

ANEXO C – Recuperação de bloco de motor em Ferro Fundido Cinzento

Equipamento	Motor de automóvel	Peça	Cabeçotes e Blocos de Motores	Metal Base	Ferro Fundido Cinzento
Processo de recuperação	Eletrodo revestido	Tipo de consumível	Eletrodo revestido	Tipo de liga	Liga a base de níquel com revestimento especial que permite a dissolução de óxidos.
Custo da peça nova	2100 USD	Custo do processo	150 USD	Economia anual	0 USD
Descrição do problema	Motor sofreu impacto com a quebra da base de fixação de parafuso.				
Solução	Recuperação com eletrodo de ferro fundido a base de níquel para aplicações em ferros fundidos contaminados com óleo, e enchimento e acabamento com eletrodo a base de níquel cuja coloração é semelhante ao ferro fundido.				
Vantagens	Recuperação sem pré aquecer, com ótima soldabilidade, sem porosidade e depósito de fácil usinagem.				
Solução anterior	Recuperação com eletrodos de ferros fundidos inadequados à aplicação por apresentarem porosidade e baixa usinabilidade.				
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO					
					
Depósito do primeiro passe com eletrodo para FeFe contaminado		Segundo passe e demais com depósito		Martelamento com martelo de bola para alívio de tensões.	
OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual quando se manuseia equipamentos de soldagem.					




FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_5292 (2012)

ANEXO D – Recuperação de mancal de turbina hidroelétrica em Ferro Fundido Cinzento

Equipamento	Turbina Hidroelétrica Peça	Caixa do Mancal	Metal Base	Ferro Fundido Cinzento
Processo de recuperação	Eletrodo revestido	Tipo de consumível Eletrodo revestido	Tipo de liga	Eletrodo ferrítico para FeFo de difícil soldabilidade na base e enchimento com eletrodo de alto teor de níquel.
Custo da peça nova	8600 USD	Custo do processo	650 USD	Economia anual 0 USD
Descrição do problema	Mancal desgastado teve que ser recuperado com preenchimento de solda para receber acoplamento exterior			
Solução	Aplicação de eletrodo a base de ferro como camada tampão e posterior enchimento e acabamento com eletrodo com alto teor de níquel e depósito usinável.			
Vantagens	Camada de almofada isenta de trincas feita sem pré aquecimento, e aplicação posterior de depósito de boa usinabilidade			
Solução anterior	No mancal externo de fixação colocava-se sistas de bronze aumentando custo.			
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO				
				
Depósito do primeiro passe como camada tampão	Segundo passe e demais com depósito	Mancal retificado após usinagem.		
OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual quando se manuseia equipamentos de soldagem.				


FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_5328 (2012)

ANEXO E- Recuperação de carcaça de bomba em Ferro Fundido cinzento com material compósito.

Equipamento	Bomba de polpa	Peça	Carcaça	Metal Base	Ferro Fundido Cinzento
Processo de recuperação	Processo a frio	Tipo de consumível	Material compósito	Tipo de liga	Matriz com carboneto de silício e óxido de alumínio, reforçado com fibras de Kevlar®, níquel.
Custo da peça nova	4450 USD	Custo do processo	480 USD	Economia anual	3970 USD
Descrição do problema	Bomba de polpa da FURAJE sofreu cavitação e perdeu material estrutural.				
Solução	Revestimento das partes danificadas com material compósito contra abrasão, aplicado a frio com uma espátula, após a preparação com disco rotativo.				
Vantagens	Aumento da vida útil de 1220 para 1800 horas, aplicação a frio sem alterar a micro estrutura do metal base e menor número de paradas para manutenção.				
Solução anterior	A peça era sucateada.				
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO					
					
Carcaça desgastada por cavitação		Aplicação a frio de material compósito com espátula		Saída da bomba revestida	
OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual quando se manuseia produtos químicos					



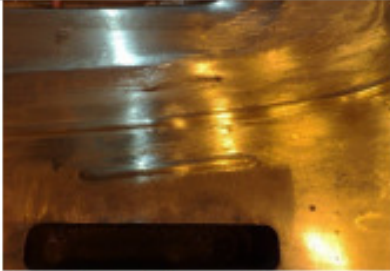
FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_34147 (2012)

ANEXO F – Recuperação de grelha de Resfriador IKN em Ferro Fundido Branco

Equipamento	Grelha	Peça	Resfriador IKN	Metal Base	Ferro Fundido Branco
Processo de recuperação	Arc Spray	Tipo de consumível	Arame Tubular	Tipo de liga	Liga FeCrB de alta dureza com resistência ao desgaste por erosão, abrasão e temperaturas de até 650°C.
Custo da peça nova	400 USD	Custo do processo	150 USD	Economia anual	75000 USD
Descrição do problema	Durante o processo de fabricação a mistura de minerais é elevada a temperaturas altíssimas no forno chegando a ficar no estado líquido. No final deste processo inicia-se o resfriamento e conseqüente quebra dos grandes blocos o que provoca o surgimento de pedras de aproximadamente 60 mm de diâmetro, o clínquer. Estas pedras são precipitadas do forno com aproximadamente 500° C para o resfriador onde posteriormente deverão sair com uma temperatura inferior a 60 graus chegando ao britador.				
Solução	Durante a passagem pelo resfriador os desgates ocorrem tanto por temperatura como por abrasão. Revestimento das partes danificadas com arame tubular especial aplicado com processo de asperção térmica Arc Spray.				
Vantagens	Aumento da vida útil em 100% nas 300 peças substituídas por ano. Redução do tempo de parada para manutenção.				
Solução anterior	A aplicação em In Situ possibilita ao pessoal de manutenção não efetuar as trocas da grelhas que é bastante demorada. Substituição/sucateamento das grelhas.				
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO					
					
Aplicação do Arc Spray		Inspeção do depósito		Camada entre 0,4 e 0,6mm de liga de FeCrB.	
<p>OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual e procedimentos especiais quando se manuseia processos a Arc Spray em espaços confinados.</p>					




FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_34165 (2012)

ANEXO G – Recuperação de estampo de prensa em Ferro Fundido Ligado.

Equipamento	Prensa	Peça	Estampo de Dobra	Metal Base	Ferro Fundido Ligado
Processo de recuperação	Eletrodo revestido + TIG	Tipo de consumível	Eletrodo revestido+ Vareta TIG	Tipo de liga	Liga de níquel para peças contaminadas na base, liga complexa para aços ferramenta e vareta DIN8555 WSG6-60 GTZ
Custo da peça nova	2.500.000 USD	Custo do processo	10.426 USD	Economia anual	2.489.574 USD
Descrição do problema	Ferramental apresentava desgaste nos esticadores, e pelo fato da dobra ser profunda os riscos causados pelo esticador marcam a peça. Estas marcas ficam mais aparentes após a pintura.				
Solução	Rebaixar os locais onde se encontravam os esticadores deixando um rebaixo de 3mm e iniciar o trabalho de soldagem com o eletrodo para ferro fundido contaminado para volatilizar o óleo e concluir a soldagem com o eletrodo de aço ferramenta aplicado em peças submetidas a choques e atrito, deixando sobre metal para a usinagem posterior. Após a usinagem eliminar eventuais marcas com a vareta DIN8555 WSG6-60 GTZ.				
Vantagens	Redução de tempo para a recuperação do esticador e evitar a possibilidade de criação de folga do inserto com o tempo em operação.				
Solução anterior	Recuperação com o eletrodo 8 Ni Cr 4 Kb				
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO					
					
Rebaixo de 3 mm para aplicação de eletrodo de FeFo		Em seguida aplicar eletrodo para aço ferramenta		Após a usinagem avaliar a superfície e em eventuais falhas aplicar a vareta TIG	
OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual adequados para soldagem a arco.					

FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_28454 (2012)

ANEXO H – Recuperação de molde de vidraria em Ferro Fundido Cinzento.

Equipamento	Máquina IS	Peça	Molde da Jarra	Metal Base	Ferro Fundido Cinzento
Processo de recuperação	Aspersão Térmica	Tipo de consumível	Liga micropulverizada	Tipo de liga	Liga a base de níquel
Custo da peça nova	2.000 USD	Custo do processo	250 USD	Economia anual	63.232 USD
Descrição do problema	O Molde trabalha abrindo e fechando e sofre desgaste por abrasão do vidro quente a 1200 °C e quebra de cantos por impacto ao abrir e fechar.				
Solução	Usar o processo de aspersão térmica para reconstrução e recuperação das áreas desgastadas e quebradas.				
Vantagens	<p>Diminui o número de peças em estoque</p> <p>Diminuição do estoque de matéria-prima para fabricar o molde.</p> <p>Aumento da vida útil da peça.</p>				
Solução anterior	O molde era sucateado.				
ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO					
					
Molde desgastado em com arestas quebradas.		Processo de aspersão térmica sendo aplicado		Molde sendo ajustado após a metalização.	
OBS: Utilizar sempre equipamentos de proteção individual adequados para aspersão térmica.					

FONTE: Terolink – Eutectic + Castolin - BR_M1_33731 (2012)