

Universidade Federal de Minas Gerais

Soldabilidade de Aços Hadfield

Matheus Baptista Albertoni

Belo Horizonte

Dezembro 2017

Matheus Baptista Albertoni

Soldabilidade de Aços Hadfield

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Soldagem.

Área de Concentração: Especialização em Engenharia de Soldagem

Orientador: Prof. Paulo Villani Marques

Belo Horizonte

Dezembro 2017

Matheus Baptista Albertoni

Soldabilidade de Aços Hadfield

Albertoni, Matheus Baptista

SOLDABILIDADE AÇOS HADFIELD / Matheus Baptista Albertoni
– 2017.

Orientador: Paulo Villani Marques
Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Minas
Gerais.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Soldagem. 2. Soldabilidade. 3. Aços Austenítico Manganês I, Marques, Paulo Villani. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

Belo Horizonte

Dezembro 2017

FOLHA DE APROVAÇÃO – FORNECIDO PELA UFMG

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo da soldabilidade de aços austeníticos ao manganês, propiciando um entendimento de suas propriedades, suas aplicações, seu processo de fabricação, sua metalurgia. São abordados aqueles aços mais comumente encontrados, seus respectivos comportamentos, suas variações e diferenças em composições químicas e a influência de seus elementos de liga. É feito também um estudo da soldagem desses materiais, abordando boas práticas operacionais, consumíveis adequados e os principais defeitos gerados nessa operação.

Palavras Chave: Soldabilidade; Aço Hadfield; Aço Austenítico, Aço Manganês, Fragilização, Reaquecimento, Descarbonetação, Carbonetos.

ABSTRACT

The present work presents a study of weldability of austenitic manganese steels, providing an understanding of its properties, its applications, its manufacturing process and its metallurgy. The most commonly encountered steels, their respective behavior, their variations and differences in chemical compositions and the influence of their alloying elements are discussed. A study is also made of welding of these materials, addressing good operating practices, adequate consumables and the main defects generated in this operation.

Keywords: Weldability, Hadfield Steels, Austenitic Steels, Manganese Steels, Embrittlement, Reheat, Decarburization, Carbides.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: TEMPERATURA ACM PARA AÇOS AUSTENÍTICO MANGANÊS COM 13%Mn (SUBRAMANYAM, 2005)	11
FIGURA 2: MICROESTRUTURA DESEJADA APÓS AUSTENITIZAÇÃO E TÊMPERA DE AÇO AUSTENÍTICO AO MANGANÊS (x100) (WELDING HANDBOOK, 2007)	12
FIGURA 3: MICROESTRUTURA DE AÇO AUSTENÍTICO AO MANGANÊS RESFRIADA LENTAMENTE APÓS AUSTENITIZAÇÃO (WELDING HANDBOOK, 2007)	13
FIGURA 4: MICROESTRUTURA DE AÇO AUSTENÍTICO MANGANÊS FUNDIDO (x100) (WELDING HANDBOOK, 2007)	14
FIGURA 5: MICROESTRUTURA DE AÇO AUSTENÍTICO MANGANÊS TEMPERADO E REVENIDO REAQUECIDO A 1000°F POR 2 HORAS (x250) (WELDING HANDBOOK, 2007)	16
FIGURA 6: EFEITO DA TEMPERATURA DE REAQUECIMENTO E TEMPO NA DUCTILIDADE DE AÇOS AUSTENÍTICOS MANGANÊS (1,2%C – 13%Mn – 0,5%Si) DEPOIS DE SOLUBILIZADO A 1090C POR 2 HORAS E TEMPERADO NA AGUA BASEADO EM EXAME METALOGRAFICO (WELDING HANDBOOK, 2007)	17
FIGURA 7: RELAÇÃO ENTRE COMPOSIÇÃO, TEMPERATURA DE REAQUECIMENTO, RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E DUCTILIDADE DE AÇOS AUSTENITICOS MANGANÊS (BARRAS DE 1 POLEGADA DE DIÂMETRO SOLUBILIZADAS, TEMPERADAS E REAQUECIDAS POR 48 HORAS) (WELDING HANDBOOK, 2007)	18
FIGURA 8: VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO DE AÇOS AUSTENÍTICO MANGANÊS COM 12,2 À 13.8% Mn. FUNDIDO DE MASSA DE 4,5 KG EM 25MM DE SEÇÃO TEMPERADO DE 1040 A 1095°C. (SUBRAMANYAM, 2005).....	20
FIGURA 9: VARIAÇÃO DE DUCTILIDADE EM FUNÇÃO DO TEOR DE MANGANÊS DE AÇO AUSTENÍTICO MANGANÊS COM 1,15% C. DADOS DE MATERIAL FUNDIDO DE MASSA DE 3,6 À 4.5 KG. E 25MM DE SEÇÃO TEMPERADO DE 1040 TO 1095 °C. (SUBRAMANYAM, 2005).....	22
FIGURA 10: CURVAS DE RESFRIAMENTO PARA AÇOS AUSTENÍTICOS AO MANGANÊS DE VARIADAS ESPESURAS. (SUBRAMANYAM, 2005).....	26
FIGURA 11: CLASSIFICAÇÃO DE CONSUMÍVEIS PARA REVESTIMENTO (DIN 8555, 1983).....	34
FIGURA 12: DIAGRAMA DE SCHAEFFLER - AMANTEIGAMENTO DE ASTM A128 Gr.A COM CONSUMÍVEL E307 OK 67.45 CONSIDERANDO 30% DE DILUIÇÃO	36
FIGURA 13: DIAGRAMA DE SCHAEFFLER - AMANTEIGAMENTO DE ASTM A128 Gr.A COM ASTM A36 CONSUMÍVEL E307 OK 67.45 CONSIDERANDO 30% DE DILUIÇÃO.....	37
FIGURA 14: DIAGRAMA DE SCHAEFFLER – PRIMEIRA CAMADA À DIRETA E SEGUNDA CAMADA À ESQUERDA EM UNIÃO DE ASTM A36 COM ASTM A128 Gr.A COM CONSUMÍVEL E309L OK 67.61 CONSIDERANDO 30% DE DILUIÇÃO.....	37
FIGURA 15: DIAGRAMA DE SCHAEFFLER – PRIMEIRO CAMADA EM DE UNIÃO DE ASTM A36 COM ASTM A128 Gr.A COM CONSUMÍVEL E309L OK 67.61 CONSIDERANDO 10% DE DILUIÇÃO.....	38
FIGURA 16: DIAGRAMA DE SCHAEFFLER – PRIMEIRA CAMADA À DIRETA E SEGUNDA CAMADA À ESQUERDA EM SOLDA DE ASTM A128 Gr.A COM CONSUMÍVEL E312 OK 68.84 CONSIDERANDO 30% DE DILUIÇÃO	39
FIGURA 17: DIAGRAMA DE SCHAEFFLER – PRIMEIRA CAMADA EM SOLDA DE ASTM A128 Gr.A COM CONSUMÍVEL E312 OK 68.84 CONSIDERANDO 10% DE DILUIÇÃO	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA (ASTM A128, 2003)	18
TABELA 2: PROPRIEDADES MECÂNICAS MEDIAS DE FUNDIDO 1,11%C – 12,7%Mn – 0,5%Si – 0,043%P TEMPERADO EM ÁGUA DE 1040°C (DAVIS, 1998).....	26
TABELA 3: PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS DE AÇOS AUSTENÍTICOS AO MANGANÊS (WELDING HANDBOOK, 2007)	28
TABELA 4: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE METAL DEPOSITADO COM ELETRODOS REVESTIDOS PARA REVESTIMENTO DE LIGAS DE FERRO (BOILER ASME CODE, 2010).	31
TABELA 5: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METAL DEPOSITADO, MICROESTRUTURA E APLICAÇÕES DE CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM DE AÇOS HADFIELD.	35

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
DESENVOLVIMENTO.....	10
Metalurgia dos Aços Austeníticos ao Manganês	10
Aços Austeníticos ao Manganês Fundidos.....	13
Descarbonetação.....	15
Fragilização ao Reaquecimento.....	15
Composição Química de Aços Hadfield e Influência dos Elementos de Liga	18
Aço Austenítico ao Manganês com Maior Teor de Manganês	24
Tratamento Térmico	24
Propriedades Mecânicas	27
Encruamento.....	28
Resistência ao desgaste.....	29
Soldagem dos Aços Hadfield	30
Consumíveis	30
Procedimento.....	32
Reparos por soldagem	34
CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

INTRODUÇÃO

O aço austenítico ao manganês foi inventado em 1882 por Robert Hadfield, originalmente com 1,2%C e 12%Mn. Tal aço possuía uma combinação de características que o tornava único, devido às suas altas tenacidade e ductilidade além da alta capacidade de endurecimento a frio e boa resistência ao desgaste. Suas aplicações são diversas até os dias atuais, sendo usado na fabricação de equipamentos para terraplenagem, mineração, perfuração, dragagem e os utilizados em pedreiras, siderurgias, ferrovias, fábricas de cimento e produtos de argila. Também é muito utilizado em cruzamentos ferroviários, rodas, engrenagens, correntes de transporte, placas de desgaste e sapatas, devido a sua alta resistência ao desgaste metal com metal.

Por outro lado, devido a algumas de suas características, como seu baixo limite de escoamento e sua baixa usinabilidade, seu uso pode ser restrito em aplicações em que se necessite alta resistência ao escoamento elástico ou que exigem componentes com pequena tolerância geométrica de usinagem, por exemplo (SUBRAMANYAM, 2005). Devida à baixa usinabilidade em função da alta dureza gerada pelo encruamento do aço nos pontos de contato com a ferramenta de corte, nesse tipo de operação são utilizadas pastilhas de corte de metal duro (carboneto de tungstênio sinterizado) ou de aço rápido ao cobalto, (CHIAVERINI, 1988).

Quanto à composição química, os teores de carbono variam entre 1,0% e 1,4% segundo Chiaverini, (1988) com tendência para 1,2% C e entre 0,7% e 1,4%C segundo Welding Handbook, (2007). Para o elemento manganês, o percentual varia normalmente entre 10 e 14%, com tendência para 12 a 13% manganês, segundo Chiaverini, (1988) e entre 11% e 14% pelo Welding Handbook (2007).

Os aços Hadfield são não magnéticos, pois a transformação da austenita que ocorre em aços baixo carbono e baixa liga é suprimida devido ao alto teor de manganês (Welding Handbook, 2007). Suas principais características são alta resistência mecânica, elevada ductilidade e resistência mecânica ao desgaste (CHIAVERINI, 1988).

Tem-se como objetivo nesse trabalho, apresentar os problemas mais frequentemente encontrados na soldagem de aços austenítico manganês, a previsão de microestrutura do metal depositado para diferentes simulações de aplicações bem como boas práticas para prevenção dos problemas.

DESENVOLVIMENTO

Metalurgia dos Aços Austeníticos ao Manganês

O manganês possui grande afinidade por oxigênio, enxofre e carbono e por isso age como desoxidante, reduz trincamento a quente e contribui para o endurecimento. Um teor alto de manganês irá suprimir a transformação da austenita, tornando-a estável à temperatura ambiente com resfriamento moderadamente rápido. Em geral, o aço Hadfield é austenitizado a elevadas temperaturas e então temperado em água para que mantenha uma estrutura austenítica estável à temperatura ambiente. A austenitização a alta temperatura, se faz necessária para garantir uma completa dissolução dos carbonetos, a qual depende do teor de carbono, sendo tanto maior quanto maiores os teores de carbono como mostra a figura 1.

As temperaturas usualmente empregadas para a austenitização estão entre 982°C e 1065°C, no entanto para aços com alto teor de carbono, uma temperatura ainda mais elevada é necessária (Welding Handbook, 2007). Para Chiaverini, (1988) a temperatura varia entre 1000°C e 1065°C. Para MENDEZ, (2004) a temperatura usual é 1050°C, a qual segue de

têmpera em água resultando em estrutura austenítica metaestável. A microestrutura típica de um aço Hadfield é mostrada na figura 2.

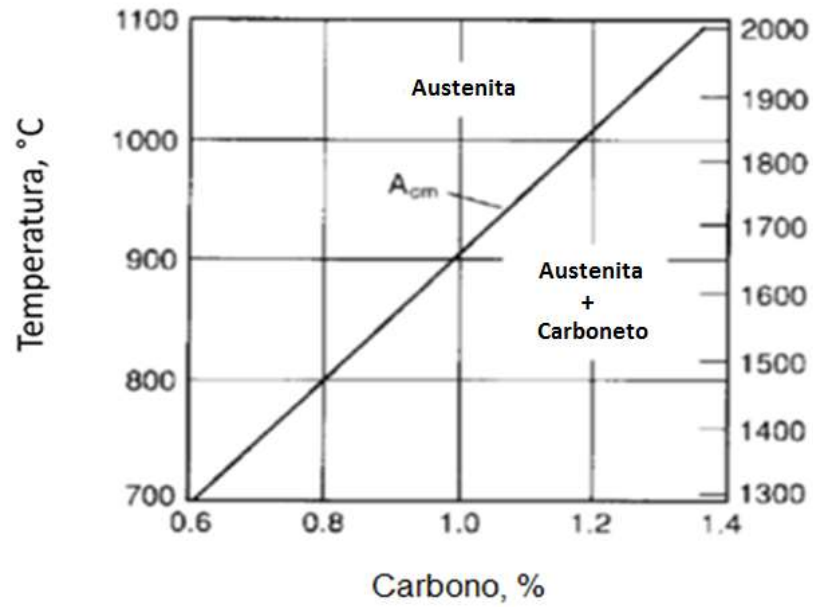


Figura 1: Temperatura A_{cm} para Aços austenítico manganês com 13%Mn (SUBRAMANYAM, 2005)

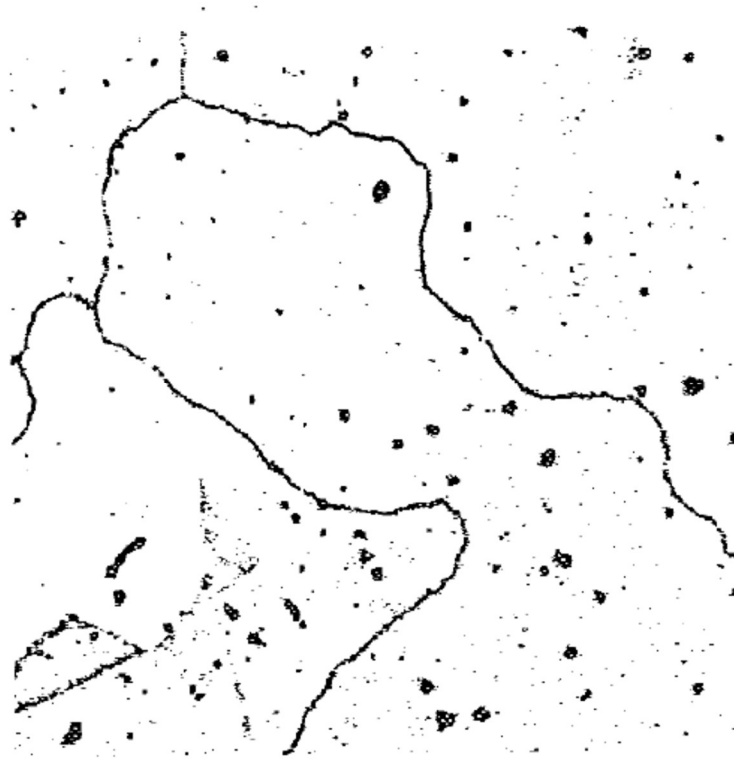


Figura 2: Microestrutura desejada após austenitização e têmpera de aço austenítico ao manganês (x100) (Welding Handbook, 2007)

A tenacidade será melhorada quanto maior for a dissolução de carbonetos. Tempos entre 20 e 30 minutos são provavelmente suficientes para austenitização acima de 1010°C, no entanto, para seções espessas é preciso atentar ao tempo necessário para que o centro da seção atinja a temperatura de austenitização.

As propriedades mecânicas são muito afetadas quando a austenitização não é realizada na temperatura adequada, por não se conseguir dissolver todos os carbonetos. Há precipitação de carbonetos quando o resfriamento é muito lento e essa é a causa principal de propriedades mecânicas não desejadas. Carbonetos podem aparecer nos contornos de grão de grandes seções quando a têmpera não for efetiva, pois esse aço tem baixa condutividade térmica. Aços de alto teor de carbono são muito sensíveis à formação de carbonetos. Devido a isso, fundidos tem espessura máxima de 6 polegadas (Welding Handbook, 2007). A figura 3 mostra a

microestrutura de uma seção espessa resfriada lentamente, com uma camada de carbonetos nos contornos de cada grão.

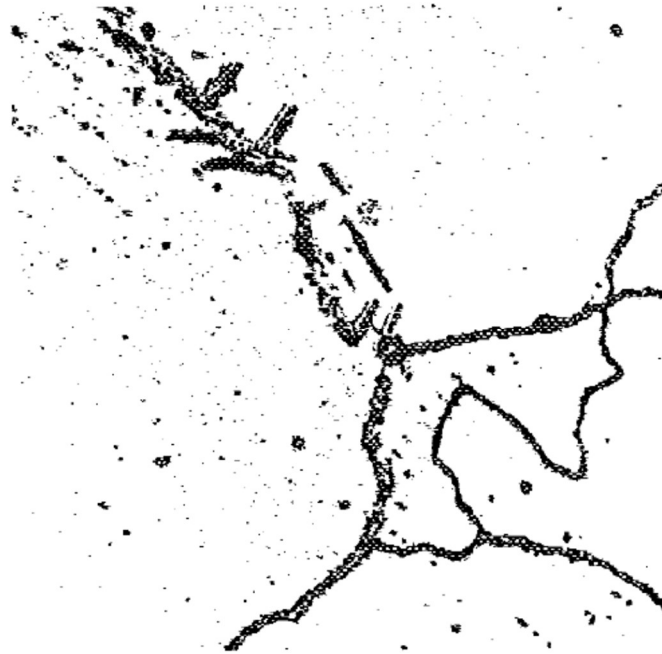


Figura 3: Microestrutura de aço austenítico ao manganês resfriada lentamente após austenitização (Welding Handbook, 2007)

Segundo Chiaverini, (1988), após o resfriamento em água esse aço se torna mais dúctil, com alongamento entre 30% e 60%, dureza Brinell entre 180 e 220, limite de escoamento de 290 a 410 MPa e limite de resistência a tração de 560 a 980 MPa.

Aços Austeníticos ao Manganês Fundidos

Aços austeníticos ao manganês na condição como fundidos normalmente são frágeis, no entanto, quando o teor de carbono é reduzido ou quando se adiciona 1,0%Mo ou 3,5%Ni, a ductilidade fica comercialmente aceitável para baixas e médias espessuras. Ajustes na composição química reduzem a possibilidade de trincas durante o resfriamento nos moldes.

Aços fundidos, além de mais baratos, não têm problemas de empenamento por tempera e podem ser utilizados quando não há maiores requerimentos de tenacidade ou ductilidade.

A taxa de resfriamento em seções espessas nos moldes é mais lenta e por isso há maior possibilidade de fragilização devido a maior precipitação de carbonetos. Nas temperaturas entre 705 e 850 °C precipitam-se somente carbonetos, principalmente como envelopes nos contornos de grãos austeníticos e como manchas lamelares entre os grãos. Abaixo de 705 e principalmente entre 550 e 650°C nódulos de perlita, nucleados por precipitação de carbonetos, crescem rapidamente. Carbonetos transgranulares aciculares podem nuclear a temperaturas mais baixas, como a temperaturas de apenas 300 °C (SUBRAMANYAM, 2005).

A estrutura desses aços fundidos possui grãos austeníticos circundados de carbonetos com manchas de perlita, dependendo da taxa de resfriamento e da composição. A estrutura é muito frágil e sensível a trincas até que seja tratada termicamente (Welding Handbook, 2007). A figura 4 mostra uma microestrutura típica do aço Hadfield fundido.



Figura 4: Microestrutura de aço austenítico manganês fundido (x100) (Welding Handbook, 2007)

Descarbonetação

A descarbonetação e a perda de manganês podem ocorrer devido a alta temperatura de austenitização combinada com alto teor de carbono. A superfície descarbonetada pode ser parcialmente martensítica e, portanto, mais frágil que o metal subjacente. Trincas podem então ocorrer na superfície posteriormente, durante o serviço, devido à deformação a frio da mesma (Welding Handbook, 2007). A superfície martensítica é magnética e para algumas aplicações que requerem aço não magnético, a mesma deve ser removida. A superfície parcialmente martensítica não é um problema crítico, visto que nas aplicações onde existe abrasão, tal superfície é removida pelo desgaste normal. As trincas normalmente avançam apenas até encontrar uma microestrutura resistente de austenita, exceto nos casos onde a têmpera não eficiente resulta em carbonetos contínuos nos contornos de grão. Tais aços apresentam boa performance em serviço, no entanto, peças, especialmente as de pequena espessura, submetidas a esforços cíclicos e sujeitas a fadiga, merecem especial atenção (SUBRAMANYAM, 2005). Superfícies descarbonetadas são um grande problema, visto que a camada empobrecida em carbono reduz a resistência ao desgaste possibilitando que as falhas por fadiga ocorram mais facilmente (VOORT, 2015). Para Briggs (1968), é claro o efeito prejudicial no comportamento de fadiga devido à descarbonetação. Para evitar isso, podem ser utilizadas adições de cromo ao aço, que minimiza a descarbonetação (SUBRAMANYAM, 2005).

Fragilização ao Reaquecimento

Aços austeníticos ao manganês temperados e revenidos expostos a reaquecimento abaixo de A_{c1} podem ter a ductilidade e a resistência mecânica muito afetadas, devido à

precipitação de carbonetos, dependendo da composição química do aço e da temperatura de reaquecimento (Welding Handbook, 2007).

A figura 5 apresenta a microestrutura desse aço reaquecido a 538°C, a qual houve a precipitação de carbonetos nos contornos de grãos.

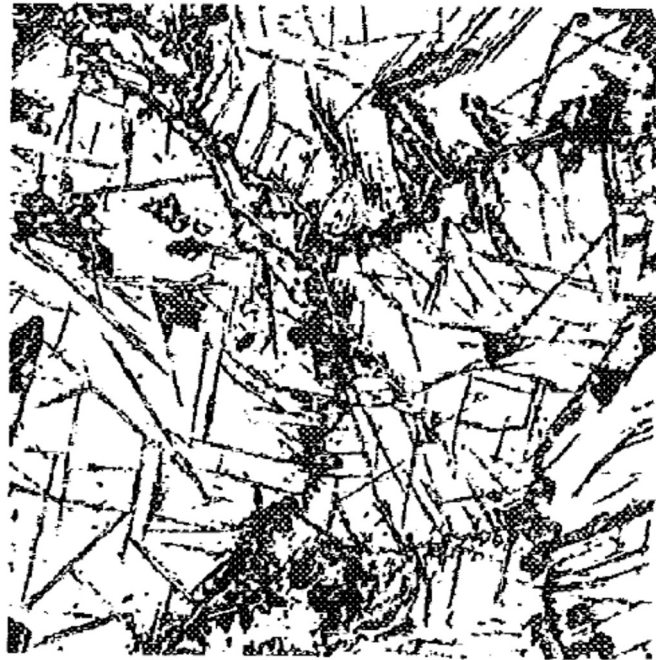


Figura 5: Microestrutura de aço austenítico manganês temperado e revenido reaquecido a 1000°F por 2 horas (x250) (Welding Handbook, 2007)

A figura 6 apresenta a relação entre temperatura e tempo de exposição necessário para se fragilizar um aço Hadfield 1,2%C – 13%Mn-0,5%Si.

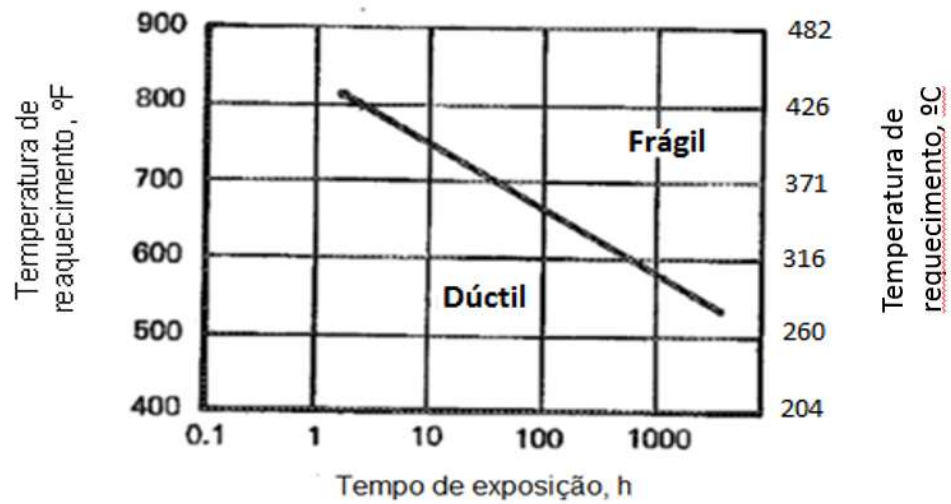


Figura 6: Efeito da temperatura de reaquecimento e tempo na ductilidade de aços austeníticos manganês (1,2%C – 13%Mn – 0,5%Si) depois de solubilizado a 1090C por 2 horas e temperado na água baseado em exame metalográfico (Welding Handbook, 2007)

A figura 7 apresenta a relação entre a exposição a elevadas temperaturas e a queda da resistência à tração e ductilidade para aços Hadfield de diferentes composições químicas.

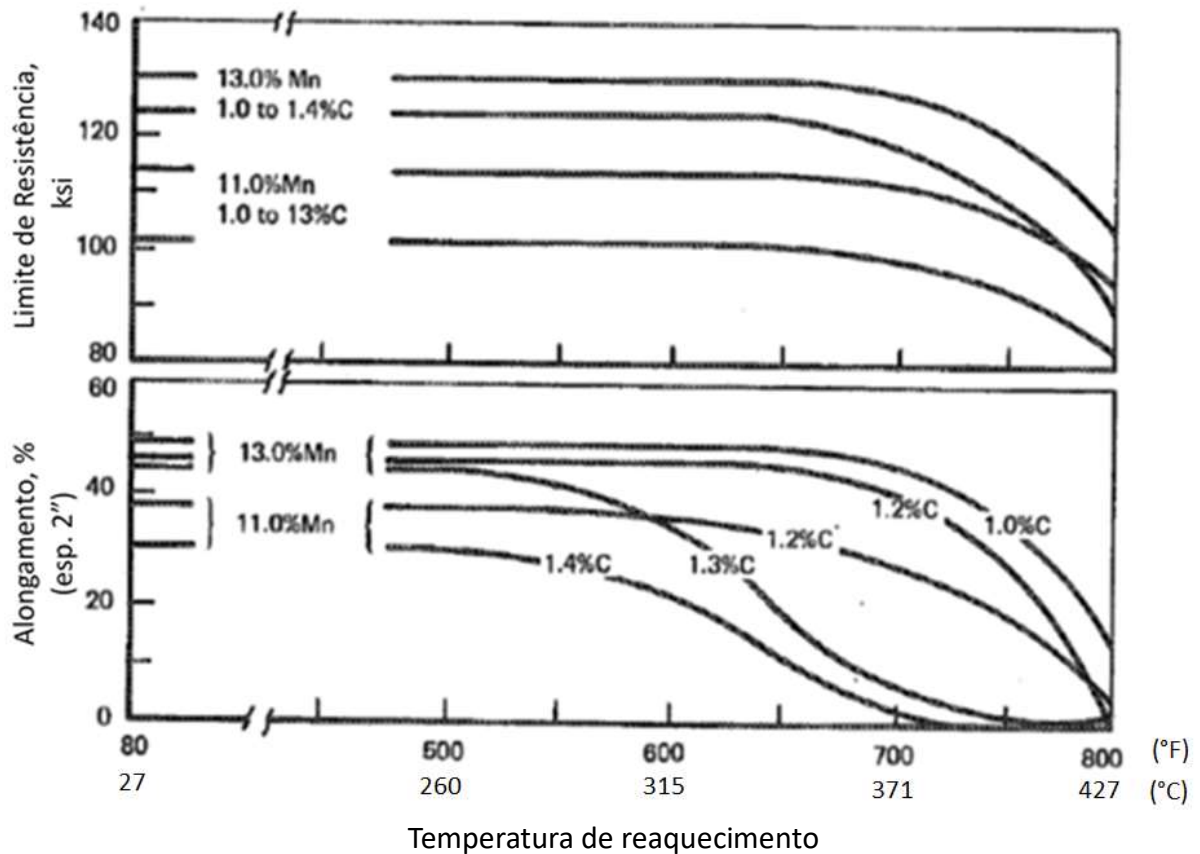


Figura 7: Relação entre composição, temperatura de reaquecimento, resistência a tração e ductilidade de aços austeníticos manganês (barras de 1 polegada de diâmetro solubilizadas, temperadas e reaquecidas por 48 horas) (Welding Handbook, 2007)

Para se evitar a fragilização por reaquecimento, os aços austeníticos ao manganês não devem sofrer tratamento térmico de alívio de tensão após serem temperados e revenidos ou após soldagem. De acordo com a AWS Welding Handbook, (2007), em geral não se deve aquecer esse material acima de 315°C, exceto por curto espaço de tempo em soldagem, a não ser que venha a sofrer têmpera e revenimento posterior. Já DAVIS, (1998), é mais conservador, e informa que a temperatura não deve ser superior a 260°C exceto em casos de solubilização seguido de tempera.

Composição Química de Aços Hadfield e Influência dos Elementos de Liga

Os aços austeníticos ao manganês mais comumente adotados são listados na norma ASTM A 128.

Tabela 1: Composição Química (ASTM A128, 2003)

Grau*	Composição, %						
	Carbono	Manganês	Cromo	Molibdênio	Níquel	Silício	Fósforo
A**	1,05 - 1,35	11,0 min	....	....	....	1,00 max	0,07 max
B-1	0,90 - 1,05	11,5 - 14,0	....	....	....	1,00 max	0,07 max
B-2	1,05 - 1,20	11,5 - 14,1	....	....	....	1,00 max	0,07 max
B-3	1,12 - 1,28	11,5 - 14,2	....	....	....	1,00 max	0,07 max
B-4	1,20 - 1,35	11,5 - 14,3	....	....	....	1,00 max	0,07 max
C	1,05 - 1,35	11,5 - 14,4	1,5 - 2,5	....	....	1,00 max	0,07 max
D	0,70 - 1,30	11,5 - 14,5	....	....	3,0 - 4,0	1,00 max	0,07 max
E-1	0,70 - 1,30	11,5 - 14,6	....	0,9 - 1,2	....	1,00 max	0,07 max
E-2	1,05 - 1,45	11,5 - 14,7	....	1,8 - 2,1	....	1,00 max	0,07 max
F (J91340)	1,05 - 1,35	6,0 - 8,0	....	0,9 - 1,2	....	1,00 max	0,07 max

*O tamanho da seção não permite a utilização de todas as classes e o fabricante deve ser consultado quanto aos graus para um determinado desenho ou modelo. A seleção final deve ser feita de comum acordo entre o fabricante e o comprador.
** Salvo indicação contrária, Grau A será fornecido.

Segundo a ASM (Metals Handbook, 1961), os aços Hadfield mais comumente utilizados são do tipo com 3,5%Ni, utilizados para aplicações não magnéticas, produtos forjados, eletrodos de soldagem e ocasionalmente para fundidos, os quais são mais resistentes à fragilização ao reaquecimento.

Os aços forjados geralmente possuem composição similar ao grau B-3. Lotes grandes normalmente são fornecidos na condição como forjado enquanto que lotes menores são mais facilmente trabalhados na condição como fundido (SUBRAMANYAM, 2005).

O aumento do teor de carbono resulta em aumento de limite de resistência a tração e limite de escoamento como observado na figura 8. Teores de carbono acima de 1,4% normalmente acabam por prejudicar a resistência a tração e a ductilidade, devido a dificuldade de se ter apenas carbono em solução sólida e, portanto, a existência de carbonetos nos contornos e grão. O aumento no teor de carbono também resulta em melhoria da resistência à abrasão, o que leva a uma preferência no uso de teores acima de 1,2%C, mesmo que haja alguma perda de ductilidade (SUBRAMANYAM, 2005).

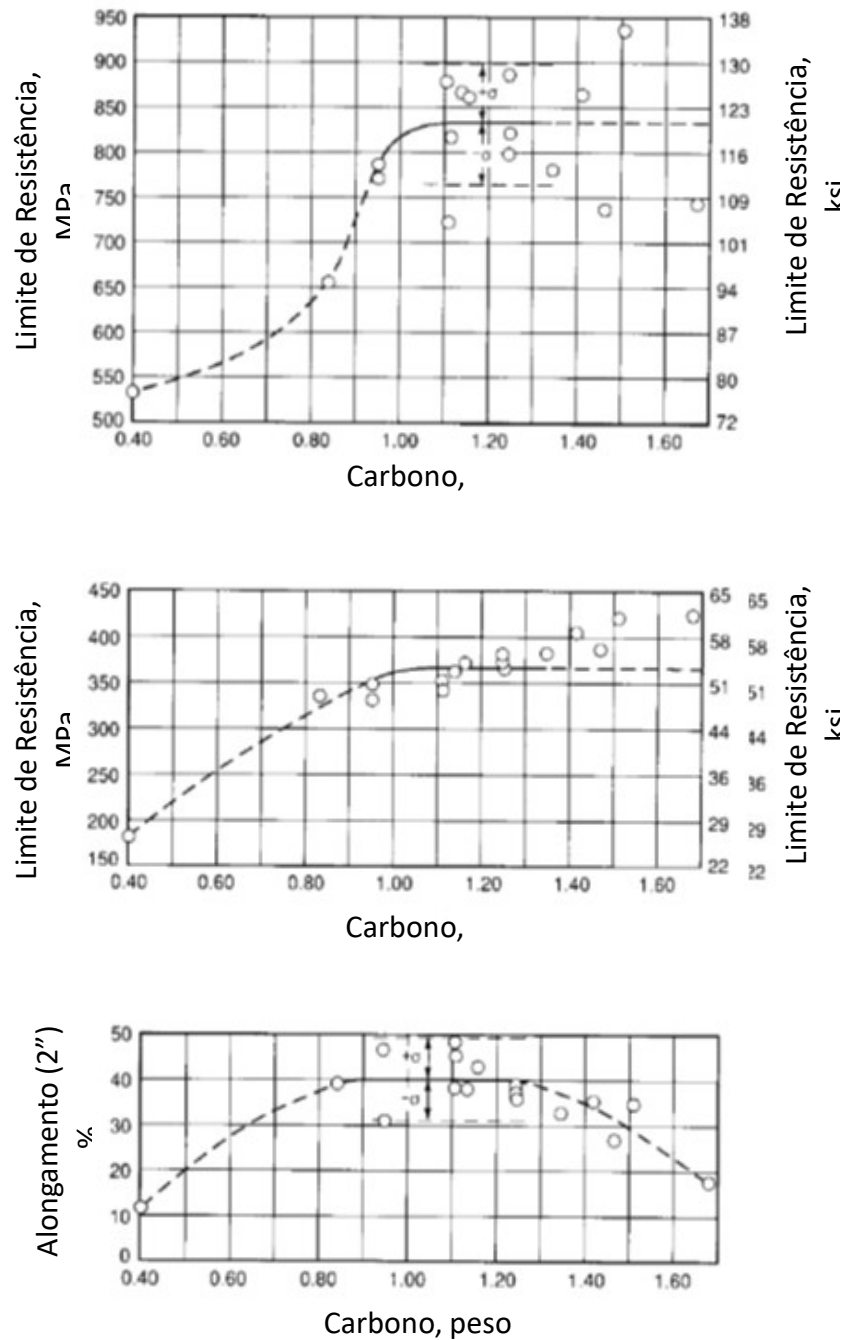


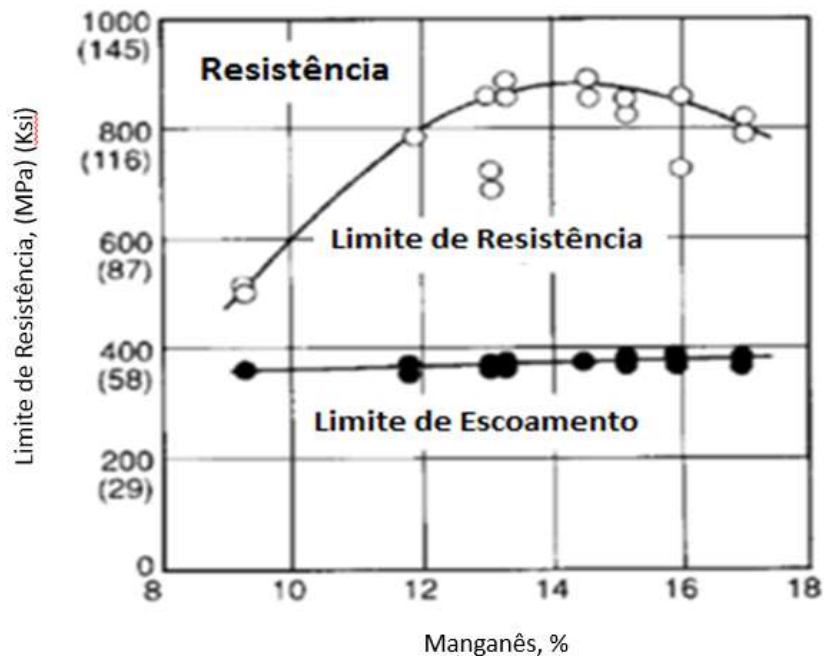
Figura 8: Variação de propriedades mecânicas em função do teor de carbono de aços austenítico manganês com 12,2 à 13,8% Mn. Fundido de massa de 4,5 kg em 25mm de seção temperado de 1040 a 1095°C. (SUBRAMANYAM, 2005)

Os aços dos graus D e E-1, com menor teor de carbono, podem ser usados em peças fundidas espessas ou partes a serem soldadas, para se minimizar a precipitação de carbonetos. Consumíveis de soldagem também são especificados com menor teor de carbono. Em praticamente todos os aços fundidos com teor de carbono acima de 1,0% haverá carbonetos,

independentemente da taxa de resfriamento. Carbonetos também se formam no aço em serviço ou em soldagem em temperaturas acima de 275 °C (SUBRAMANYAM, 2005).

O manganês estabiliza a austenita, retardando enormemente a sua transformação. Um aço baixo carbono contendo 1,1%Mn, inicia sua transformação isotérmica a 370 °C, 15 segundos após ser resfriado por têmpera até essa temperatura, enquanto que um aço contendo 13%Mn essa transformação só vem a ocorrer após 48horas. Para temperaturas abaixo de 260 °C, a precipitação de carbonetos e a transformação da austenita praticamente não existe para aços com teores acima de 10%Mn.

O manganês na faixa de composição dos aços Hadfield, pouco influencia no limite de escoamento, mas influencia muito no limite de resistência à tração e na ductilidade, como pode ser visto na figura 9 (SUBRAMANYAM, 2005).



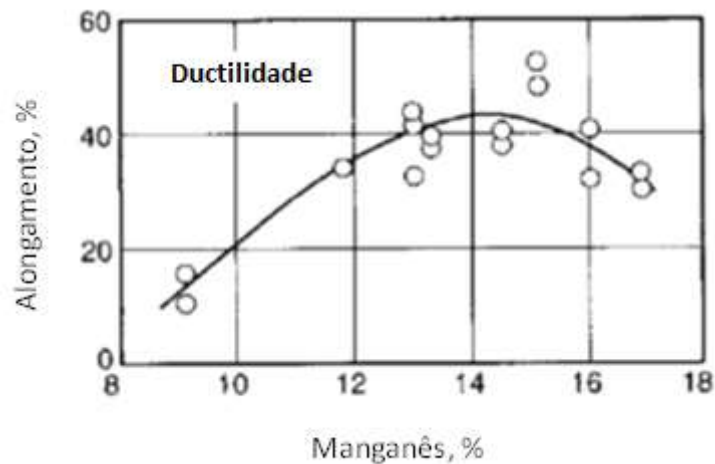


Figura 9: Variação de ductilidade em função do teor de manganês de aço austenítico manganês com 1,15% C. Dados de material fundido de massa de 3,6 à 4,5 kg. e 25mm de seção temperado de 1040 to 1095 °C. (SUBRAMANYAM, 2005)

O aço de grau F da ASTM A 128, com manganês entre 6 e 8%, resulta em uma austenita parcialmente estável. O resultado é um aço com maior capacidade de endurecimento a frio, quando comparado com um aço manganês contendo 13%Mn. Esse grau não é recomendado para elevadas espessuras ou para aplicações onde haverá reaquecimento acima de 315 °C, seja por soldagem ou em serviço, diferentemente das classificações D e E, com níquel e molibdênio.

Aços com teores abaixo de 0,10% de silício possuem baixa fluidez durante a fundição e acima de 2,2% há uma grande redução na resistência mecânica. Teores entre 1,0% e 2,0%Si podem ser adicionados com a finalidade de aumentar o limite de escoamento e a resistência a deformação plástica, de acordo com Subramanyam, (2005) e Chiaverini (1988), mas não é comum, por se preferir outros elementos químicos para isso (SUBRAMANYAM, 2005). Para eles a adição de silício normalmente é abaixo de 1,0%. Segundo Chiaverini (1988), a principal função do silício nesse aço é de desoxidação.

É interessante se ter o menor teor possível de fósforo, visto que o mesmo contribui para problemas como trincas de soldagem e perda de alongamento a altas temperaturas. A

norma ASTM A 128 permite até um máximo de 0,07% P. A boa prática é manter o fósforo abaixo de 0,04%. (SUBRAMANYAM, 2005). De acordo com Chiaverini (1988), seu teor máximo é de 0,1%, no entanto para contribuir para a boa soldabilidade, é interessante teores menores que 0,06%.

O cromo aumenta a resistência à corrosão atmosférica e em alguns casos à abrasão. Os aços com adição de cromo mais comuns são os da classe C da norma ASTM A 128, com aproximadamente 2% Cr. Pelo fato de aumentar o volume de carbonetos, seu uso pode ser crítico quando utilizado chapas espessas, por afetar diretamente a ductilidade e tenacidade. O cromo também eleva o limite de escoamento assim como reduz o limite de resistência à tração (SUBRAMANYAM, 2005). Para CHIAVERINI (1988), o cromo aumenta a dureza antes do encruamento, de 200 Brinell para 220 com 1,5%Cr e 280 com 2,0% cromo.

Adições de molibdênio têm por finalidade aumentar a tenacidade e resistência ao trincamento nos aços na condição fundida e aumentar o limite de escoamento de seções espessas. O molibdênio impede a precipitação de carbonetos e a formação de perlita, mesmo em temperaturas acima de 275 °C durante soldagem ou em serviço. O grau E-1 da norma ASTM A 128 com molibdênio em torno de 1% é aplicável nas situações onde há rea aquecimento acima de 275 °C, como em recuperação por soldagem e revestimentos de fundidos de alta espessura, como rolos e britadores, nas quais os aços de grau B não atendem satisfatoriamente.

O aço de grau E-2 da norma ASTM A 128 com molibdênio em torno de 2% é aplicável nas situações onde se requer alta resistência à abrasão, como em britadores. É observado um aumento significativo nos limite de resistência, limite de escoamento e alongamento de aços hadfield grau E-2 quando em serviço em britadores.

O uso do níquel permite aumentar a ductilidade, no entanto reduz a resistência a abrasão e sutilmente o limite de escoamento. O níquel suprime a precipitação de carbonetos entre 300 e 550 °C (SUBRAMANYAM, 2005).

O vanádio contribui enormemente para formação de carbonetos, resultando em um aço de elevado limite de escoamento e baixa ductilidade. Consegue-se aços com limite de escoamento acima de 700 MPa.

O cobre é utilizado para estabilizar a austenita. O bismuto contribui para uma melhor usinabilidade. O titânio reduz o teor de carbono na austenita, por formar carbonetos, assim como contribui para o refinamento de grão quando adicionado em pequenas quantidades. O enxofre é mantido em teores muito baixos devido ao seu potencial de nucleação de trincas de fadiga em operação (SUBRAMANYAM, 2005).

Aço Austenítico ao Manganês com Maior Teor de Manganês

Recentemente foram desenvolvidos aços tipo Hadfield com teores ainda maiores de manganês, acima de 15%. Esses aços possuem boa resistência e tenacidade a baixas temperaturas e baixa permeabilidade magnética. Normalmente a transformação induzida por deformação não é desejada, visto que o aço ganharia em permeabilidade magnética. Sua transição dúctil frágil é gradual e não abrupta. (SUBRAMANYAM, 2005).

Tratamento Térmico

Propriedades mecânicas desejáveis são atingidas através de solubilização seguida de tempera em água. Dessa forma obtêm-se microestrutura totalmente austenítica. Para seções espessas isso nem sempre é possível, assim como para aços com elementos formadores de carbonetos, como cromo, molibdênio, vanádio e titânio. A solubilização dos carbonetos em

geral é realizada com temperatura entre 30 e 50 °C acima da temperatura A_{cm} , em geral de 1010 a 1090 °C. Temperaturas acima de 1095 °C não são recomendadas devido à fusão de segregações de carbono e fósforo, e a ocorrência de descarbonetação. O material é aquecido lentamente e permanece por 1 a 2 horas na temperatura de patamar por cada 25mm de espessura, seguindo-se a têmpera em água agitada.

Um tratamento térmico diferenciado costuma ser utilizado para o aço grau E-2, o qual contém aproximadamente 2% de molibdênio. O aço é aquecido a uma temperatura de 595 °C, mantido nessa temperatura por 8 a 12 horas, em seguida sua temperatura é elevada para cerca de 980 °C, e por fim a tempera. Na faixa de 595 °C, grande quantidade de perlita é formada na microestrutura, e quando aquecido a 980 °C, essa perlita se transforma em austenita fina com pequenas partículas de carbonetos dispersas. Após a têmpera o aço apresentará elevado limite de escoamento, com elevada dureza e menor ductilidade. Esse tratamento térmico permite um teor maior de carbono, o qual contribuirá para uma maior resistência à abrasão.

A taxa de resfriamento na tempera, limitada pela condutividade térmica do metal e pela transferência de calor de superfície quente em água agitada, resulta em propriedades mecânicas inferiores no centro de seções espessas, visto que não se consegue prevenir o crescimento de grãos, e têm-se, portanto, grãos grosseiros (SUBRAMANYAM, 2005).

A figura 10 apresenta as curvas de resfriamento por têmpera em água de aços ao manganês de diferentes espessuras e percebe-se, portanto, o significativo aumento do tempo para aqueles de maiores espessuras.

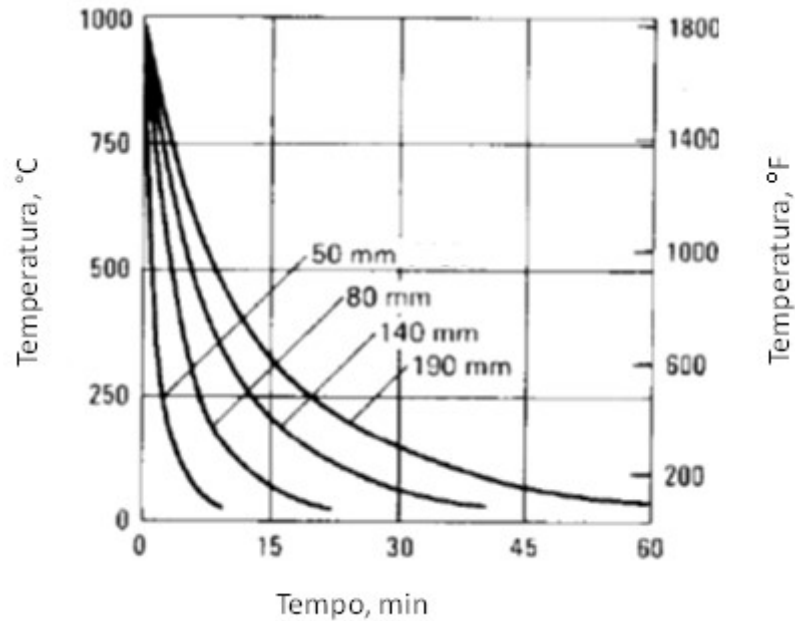


Figura 10: Curvas de resfriamento para aços austeníticos ao manganês de variadas espessuras. (SUBRAMANYAM, 2005)

A tabela 2 lista propriedades mecânicas típicas de aços austenítico manganês fundidos de composição química 1,11%C, 12,7%Mn, 0,5%Si, 0,043%P temperados em água a de 1040°C.

Tabela 2: Propriedades mecânicas medias de fundido 1,11%C – 12,7%Mn – 0,5%Si – 0,043%P temperado em água de 1040°C (DAVIS, 1998)

Espessura da chapa		Tipo de grão	Limite de escoamento		Limite de resistência		Alongamento* , %	Reduçã o em area, %	Izod V-notch Resistência ao Impacto	
mm	Pol.		Mpa	Ksi	Mpa	Ksi			J	pés*libra
50	2	Grosso	338	49	635	92	37,0	35,7	137	101
		Fino	365	53	820	119	45,5	37,4	134	99
83	3,25	Grosso	345	50	620	90	25,0	34,5	133	98
		Fino	359	52	765	111	36,0	33,0	115	85
140	5,5	Grosso	338	49	545	79	22,5	25,6	115	85
		Fino	352	51	705	102	32,0	28,3	100	74
190	7,5	Grosso	324	47	455	66	18,0	25,1	77	57
		Fino	359	52	725	105	33,5	29,2	66	49

Tensão residual em geral não é um problema crítico desses aços, devido à sua tenacidade inerente. Tamanho de grão geralmente é o que diferencia as propriedades mecânicas do aço fundido para o aço forjado. O forjado possui grãos mais finos (SUBRAMANYAM, 2005).

Propriedades Mecânicas

Aço austenítico ao manganês de composição padrão é praticamente imune a trincas induzidas por hidrogênio. O ponto de transição dúctil frágil não é bem definido por se ter uma curva gradual. Falhas catastróficas são pouco prováveis, visto que a progressão das trincas é relativamente lenta. A dureza e o limite de escoamento variam pouco conforme a espessura. A dureza quase sempre está próxima dos 200HB na condição recozida e temperada e aumenta muito e rapidamente com o encruamento. A deformação a frio também eleva significativamente o limite de escoamento (SUBRAMANYAM, 2005).

O aço Hadfield possui excepcional tenacidade, e baixo limite de escoamento. Seu limite de escoamento pode ser considerado temporário, visto que aumenta rápido com a deformação. O aço possui excelentes propriedades mecânicas entre -45 °C e 200 °C. Acima de 260 °C, aços de graus comuns não são recomendados, pois suas propriedades em temperaturas são ruins, quando comparadas com aços inoxidáveis austeníticos ao cromo níquel. Esse comportamento precisa ser levado em conta ao se estabelecer os procedimentos de soldagem (Welding Handbook, 2007).

Possivelmente devido à transformação parcial da austenita metaestável acima de 260°C, estes aços não podem ser utilizados acima dessa temperatura.

A resistência ao impacto do aço grau B-2 fica em torno de 120 a 150J a 24 °C e entre 60 a 90 J à -70 °C. Adicionando-se níquel, como no grau D, tem-se ainda melhores resultados a baixas temperaturas. Aços laminados terão resistência ao impacto maior, quando comparados com os fundidos. A tabela 3 apresenta valores típicos de propriedades de aços austeníticos ao manganês.

Tabela 3: Propriedades mecânicas típicas de aços austeníticos ao manganês (Welding Handbook, 2007)

Propriedades mecânicas típicas de aços austeníticos ao manganês													
Tipo	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Diam. ou esp., pol.	Condição*	LR, Ksi	LE, Ksi	Along., %	Dureza, HB	
C-Mn	1,0 - 1,4	11 - 14	0,2 - 1,0	----	----	----	1 D	F, TR	100 - 145	50 - 57	30 - 65	185 - 210	
	1,11	12,7	0,54	----	----	----	1 D	F	65	52	4		
							4 t	F, TR	90	52	25		
							8 t	F, TR	66	47	18		
1,1 - 1,4	11 - 14	0,2 - 0,6	----	----	----	1 D	L, TR	131 - 158	43 - 67	40 - 63	170 - 200		
C-Mn-Cr	1,1 - 1,25	12,5 - 13,5	0,5	1,8 - 2,1	----	----	1 D	F, TR	96 - 147	58 - 68	27 - 59	205 - 215	
							4 t	F, TR	82	53	31		
							6 t	F, TR	81	56	20		
C-Mn-Ni	0,6 - 0,9	12,4 - 14,3	0,5 - 0,9	----	3,4 - 3,6	----	1 D	F, TR	90 - 132	42 - 49	40 - 88	150 - 180	
	0,8 - 0,9	13,9 - 15,1	0,9 - 1,3	----	2,8 - 4,0	----	----	L, TR	134 - 146	46 - 56	74 - 87	180	
C-Mn-Mo	0,75 - 1,0	12,1 - 14,1	0,4 - 0,6	----	----	----	1	1 D	F, TR	106 - 137	50 - 59	37 - 67	179 - 207
							1	8 t	F, TR	80 - 133	42 - 55	27 - 61	
	1,15	12,8 - 14,3	0,5	----	----	----	1	1 D	F, TR	120 - 144	56 - 74	45 - 53	202 - 207
							1	8 t	F, TR	76 - 77	50 - 56	16 - 33	
0,72	13	----	----	----	----	1	1 D	L, TR	145 - 147	53 - 54	60 - 72	187	

*F = Fundido

**L = Laminado

***TR = Temperado Recozido

Encruamento

A alta temperatura de austenitização pode levar a uma decarbonetação de aproximadamente 3,2mm de profundidade. A deformação plástica dos aços austeníticos ao manganês não é uniforme. Existe uma variação de dureza de 30% de grão para grão e até mesmo em regiões distintas de um mesmo grão de aços Hadfield encruados (QIAN, 2011).

A capacidade de encruamento aumenta conforme a energia de impacto se eleva. Marcas de escorregamento, discordâncias, falhas e maclas aumentam conforme o aumento da energia de impacto. Abaixo da energia crítica de impacto, o encruamento se dá pelos movimentos de discordâncias e escorregamento. Acima da energia crítica de impacto o encruamento se dá pela maclação (XIAOYUN, 2012)

Aços ao manganês austeníticos podem transformar a austenita em martensita através do encruamento, e essa é a melhor maneira de se aumentar a dureza desse tipo de aço. Provavelmente o aço Hadfield é o aço com a maior capacidade de elevação de dureza por encruamento, podendo a dureza ser elevada de em torno de 200 para 500-600 Brinell através de impacto em serviço (CHIAVERINI, 1988).

Um aço austenítico ao manganês de grau comum de pode encruar de 220HV para além de 900HV. Jacarés de ferrovias chegam a durezas típicas em torno de 495 a 535HB após elevado período em serviço. Encruamento normalmente é induzido por impacto através de martelamento. Impactos maiores resultam em encruamentos de maiores profundidades, no entanto com durezas superficiais não tão elevadas (DAVIS, 1998)

Resistência ao desgaste

A resistência ao desgaste dos aços austeníticos ao manganês está baseada no fenômeno do encruamento. Sobre cargas de compressão ou impacto, a superfície do aço se endurece, enquanto o metal base se permanece tenaz (METZO, 2011).

Aços hadfield são muito resistentes ao desgaste, com desempenho superior ao dos ferros fundidos brancos e aços perlíticos e são mais tenazes que a maioria das ligas ferrosas resistentes a abrasão e, portanto, muito utilizados em aplicações onde se requer elevada resistência a abrasão. Eles são menos resistentes à abrasão que ferros fundidos brancos martensíticos ou aços alto carbono martensíticos. São muito resistentes ao desgaste metal-metal (DAVIS, 1998).

Embora o aço Hadfield seja a melhor escolha para algumas aplicações, seu fator determinante de escolha deverá ser tenacidade e não resistência a abrasão. Onde a abrasão for predominante, um ferro fundido martensítico é uma escolha muito melhor (TAYLOR, 1961).

Soldagem dos Aços Hadfield

Consumíveis

Um dos primeiros eletrodos para soldagem de aços austeníticos manganês foi desenvolvido e patenteado na década de 1920, com composição de 1,0-1,25%C, 3,0-13,0%Mn. No entanto, desde essa época, a tendência foi de uma redução do teor de carbono, para reduzir possibilidade de fragilização por precipitação de carbonetos e adição de níquel para se evitar formação de martensita. A adição de outros elementos também vem sendo estudada (Mendez, 1978). Nesse mesmo estudo, o eletrodo ligado ao molibdênio apresentou melhor desempenho em termos de propriedades de encruamento e resistência a deformação do que eletrodos ligados ao cromo e cromo-níquel.

Conforme o BOILER ASME CODE, (2010) eletrodos da série EFeMn (A à F) são ideais para reconstrução, reparo e união de aços austenítico ao manganês pela habilidade de absorver altos impactos. Eletrodos dessa série com 4% de níquel dão mais estabilidade para austenita, e aqueles com cromo, molibdênio e vanádio elevam o limite de escoamento. A dureza dos depósitos normalmente não passa de 20HRC, mas quando encruados podem chegar a 55HRC.

Eletrodos A5.13 da série EFeMnCr também são utilizados para reconstrução, reparo e união de aços Hadfield a ainda união de aços Hadfield com aço carbono, pois proporcionam uma austenita um pouco mais estável, mas também necessitam de cautela com o reaquecimento. São utilizados também como base para eletrodos EFeCr para aplicações sujeitas a abrasão e moderado impacto, já que têm baixo teor de manganês e elevado teor de cromo.

A tabela 4 apresenta a composição química do metal depositado para diferentes classificações de consumíveis de soldagem conforme o código ASME.

Tabela 4: Composição química de metal depositado com eletrodos revestidos para revestimento de ligas de ferro (BOILER ASME CODE, 2010).

Classif. AWS	Anexo A Referência	Número UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	W	Ti	Nb(Cb)	Fe	Outros Elem. Total
Efe1	A7.1.1	W74001	0.04-0.20	0.5-2.0	1.0	0.5-3.5	-	1.5	-	-	-	-	Rem	1.0
Efe2	A7.1.1	W74002	0.10-0.30	0.5-2.0	1.0	1.8-3.8	1.0	1.0	0.35	-	-	-	Rem	1.1
Efe3	A7.1.2	W74003	0.50-0.80	0.5-1.5	1.0	4.0-8.0	-	1.0	-	-	-	-	Rem	1.2
Efe4	A7.1.3	W74004	1.0-2.0	0.5-2.0	1.0	3.0-5.0	-	-	-	-	-	-	Rem	1.3
Efe5	A7.1.4	W75110	0.30-0.80	1.5-2.5	0.9	1.5-3.0	-	-	-	-	-	-	Rem	1.4
Efe6	A7.1.5	W77510	0.6-1.0	0.4-1.0	1.0	3.0-5.0	-	7.0-9.5	0.5-1.5	0.5-1.5	-	-	Rem	1.5
Efe7	A7.1.6	W77610	1.5-3.0	0.5-2.0	1.5	4.0-8.0	-	1.0	-	-	-	-	Rem	1.6
EFeMn-A	A7.1.7	W79110	0.5-1.0	12-16	1.3	-	2.5-5.0	-	-	-	-	-	Rem	1.7
EFeMn-B	A7.1.7	W79310	0.5-1.0	12-16	1.3	-	-	0.5-1.5	-	-	-	-	Rem	1.8
EFeMn-C	A7.1.7	W79210	0.5-1.0	12-16	1.3	2.5-5.0	2.5-5.0	-	-	-	-	-	Rem	1.9
EFeMn-D	A7.1.7	W79410	0.5-1.0	15-20	1.3	4.5-7.5	-	-	0.4-1.2	-	-	-	Rem	1.10
EFeMn-E	A7.1.7	W79510	0.5-1.0	15-20	1.3	3.0-6.0	1.0	-	-	-	-	-	Rem	1.11
EFeMn-F	A7.1.7	W79610	0.8-1.2	17-21	1.3	3.0-6.0	1.0	-	-	-	-	-	Rem	1.12
EFeMnCr	A7.1.8	W79710	0.25-0.75	12-18	1.3	13-17	0.5-2.0	2.0	1.0	-	-	-	Rem	1.13
EFeCr-A1A	A7.1.9	W74011	3.5-4.5	4.0-6.0	0.5-2.0	20-25	-	0.5	-	-	-	-	Rem	1.14
EFeCr-A2	A7.1.10	W74012	2.5-3.5	0.5-1.5	0.5-1.5	7.5-9.0	-	-	-	-	1.2-1.8	-	Rem	1.15
EFeCr-A3	A7.1.11	W74013	2.5-4.5	0.5-2.0	1.0-2.5	14-20	-	1.5	-	-	-	-	Rem	1.16
EFeCr-A4	A7.1.9	W74014	3.5-4.5	1.5-3.5	1.5	23-29	-	1.0-3.0	-	-	-	-	Rem	1.17
EFeCr-A5	A7.1.12	W74015	1.5-2.5	0.5-1.5	2.0	24-32	4.0	4.0	-	-	-	-	Rem	1.18
EFeCr-A6	A7.1.13	W74016	2.5-3.5	0.5-1.5	1.0-2.5	24-40	-	0.5-2.0	-	-	-	-	Rem	1.19
EFeCr-A7	A7.1.13	W74017	3.5-5.0	0.5-1.5	0.5-2.5	23-30	-	2.0-4.5	-	-	-	-	Rem	1.20
EFeCr-A8	A7.1.14	W74018	2.5-4.5	0.5-1.5	1.5	30-40	-	2.0	-	-	-	-	Rem	1.21
EFeCr-E1	A7.1.15	W74211	5.0-6.5	2.0-3.0	0.8-1.5	12-16	-	-	-	-	4.0-7.0	-	Rem	1.22
EFeCr-E2	A7.1.15	W74212	4.0-6.0	0.5-1.5	1.5	14-20	-	5.0-7.0	1.5	-	-	-	Rem	1.23
EFeCr-E3	A7.1.15	W74213	5.0-7.0	0.5-2.0	0.5-2.0	18-28	-	5.0-7.0	-	3.0-5.0	-	-	Rem	1.24
EFeCr-E4	A7.1.15	W74214	4.0-6.0	0.5-1.5	1.0	20-30	-	5.0-7.0	0.5-1.5	2.0	-	4.0-7.0	Rem	1.25

Notas:

a. Arames sólidos nus e varetas previamente classificadas na AWS A5.13-80 estão descontinuados ou reclassificados na AWS A5.21:2001,

Especificação para arames sólidos nus e varetas para revestimento (veja A8 no Anexo A)

b. Valores únicos são máximos. Rem = Restante

c. Eletrodos e varetas devem ser analisados para os elementos específicos os quais valores são mostrados nessa tabela.

Se a presença de outros elementos for indicada no curso deste trabalho, o total desses elementos deve ser determinado para garantir que o total não exceda o limite especificado em "Outros Elementos, Total" na última coluna da tabela.

d. Enxofre e fósforo não deve exceder 0.035%.

e. ASTM/SAE UNS para metais e ligas.

Para TAYLOR, (1961), consumíveis com alto teor de manganês e sem outros elementos de liga, são mais utilizados somente para reparo de áreas desgastadas. Para aplicações críticas é mais recomendado o uso de eletrodo com adição de molibdênio ou níquel, os quais proporcionam maior tenacidade.

Procedimento

De acordo com MENDEZ, (1978), diversos aspectos contribuem para um melhor procedimento de soldagem desses aços, tais como:

- Soldagem com eletrodo AWS A5.13 EFeMn-A;
- Soldagem sempre puxando, pois empurrando poderá gerar depósitos de baixo nível qualidade;
- Evitar soldagem oxiacetilênica, que provavelmente fragilizará o metal base;
- Buscar a menor energia de soldagem possível;
- Manter baixo stick-out, para redução da tensão e conseqüentemente da energia de soldagem;
- Não preaquecer, exceto em casos de temperatura abaixo de -30°C .
- Permitir tempo para resfriamento.
- Temperaturas em regiões adjacentes a solda nunca devem exceder 315°C após 1 minuto da execução do cordão;
- Sempre que possível, locais encruados do metal base devem ser removidos antes da soldagem, devido a maior susceptibilidade à fragilização.
- Quaisquer áreas defeituosas deverão ser removidas antes da soldagem.
- Martelamento imediato com cordões de solda ainda quentes contribuirão para redução de empenamento e tensões residuais, devido à contração durante a soldagem.
- Não martelar o último passe.

A empresa multinacional ESAB é ainda mais conservadora em sua recomendação para procedimentos de soldagem, no que se refere a temperaturas a serem atingidas pelo aço durante a soldagem. De acordo com ESAB AB, (2010), além de serem recomendadas correntes baixas para proporcionar baixo aporte térmico, deve-se ainda buscar utilizar cordões filetados ao invés de trançados e a temperatura de interpasse não deve exceder 200°C , para

evitar fragilização. Pode-se colocar também o componente em água para mantê-lo em baixa temperatura durante a soldagem.

TAYLOR, (1961) também cita a impossibilidade de se soldar o aço Hadfield pelo processo oxiacetilênico, devido à facilidade de fragilização.

Para união de aços austeníticos ao manganês e austenítico manganês com demais aços deve-se utilizar consumíveis inoxidáveis austeníticos do tipo 18/8/6 (Cr/Ni/Mn), ou do tipo 29/9 (Cr-Ni).

Para recuperação de componentes sujeitos a elevados impactos, é recomendado amanteigamento com inox austenítico seguido de eletrodo ao manganês para enchimento e acabamento. O amanteigamento é realizado para se prevenir de que possíveis trincas formadas no metal de solda se propaguem para o metal base e a recomendação é usar eletrodo de classificação DIN 8555 E 8 200 CKZ ou ASME II PART C (E307-15), tipo 18/8/6 (Cr/Ni/Mn). Esse amanteigamento garante metal de elevada ductilidade e com capacidade de absorver tensões (ESAB AB, 2010).

Segundo o BOILER ASME CODE, (2010), eletrodos do tipo A5.4 E307 são utilizados primariamente como amanteigamento para soldas de moderada resistência e com grande resistência a trincas, entre aços dissimilares assim como aços austenítico manganês, e aços carbono forjados ou fundidos.

De acordo com o ESAB AB, (2010), para o enchimento e acabamento, são recomendados eletrodos dos tipos 13Mn e 13Mn-4Cr-3Ni, ambos com classificação DIN 8555 E-7-200-K, ou 13%Mn-3,5%Ni, com classificação ASME II PART C A5.13 EFeMn-A. Para reparo de trincas, é recomendado DIN 8555 E 9 200 CTZ, do tipo 29/10.

Para aumentar a dureza inicial do metal depositado e aumentar a resistência a abrasão, é recomendado o uso de revestimento com eletrodo revestido ligado ao cromo tipo E 6 UM 55

G. Para aplicações onde for desejada extrema resistência a abrasão pode-se utilizar eletrodo que garanta liga com percentual de cromo ainda mais elevado, como o tipo E 10 UM 60 CZ.

A figura 11 informa o significado dos caracteres das classificações de consumíveis conforme a norma DIN 8555.

Ex: DIN 8555 **E** **8** **UM** **200** **KP**

E	Processo de soldagem G - Soldagem oxí-acetilénica E - Soldagem manual ao arco eléctrico com eletrodo revestido MF - Soldagem ao arco eléctrico utilizando-se arames tubulares TIG - Soldagem ao arco eléctrico com eletrodo não consumíveis de tungsténio MSG - Soldagem ao arco eléctrico com protecção gasosa UP - Soldagem ao arco submerso	8	Grupo de liga Tipo de metal de adição 1 Não-ligado com até 0,4%C ou baixa liga com até 0,4%C e até um máximo de 5% dos elementos de liga Cr, Mn, Ni no total. 2 Não-ligados com até ou mais de 0,4%C ou baixa liga com mais de 0,4%C e até um máximo de 5% dos elementos de liga Cr, Mn, Mo, Ni no total. 3 Ligado, com as propriedades dos aços de trabalho à quente 4 Ligado, com as propriedades dos aços rápidos 5 Ligados, com mais de 5%Cr, com um baixo teor de C (até mais ou menos 0,2%) 6 Ligados, com mais de 5%Cr, com um teor maior de C (até mais ou menos 0,2% a 2,0%) 7 Austeníticos ao Mn com 11 a 18% Mn, mais de 0,5%C e até 3% Ni. 8 Austeníticos Cr-Ni-Mn 9 Aços Cr-Ni (resistentes à oxidação, ácidos e calor) 10 Com um alto teor de C e alto teor de Cr e sem agentes adicionais formadores de carbonetos 20 À base de Co, ligado a Cr-W, com ou sem Ni e Mo 21 À base de carbonetos (sintetizado, fundido ou tubular) 22 À base de Ni, ligado ao Cr, ligado ao Cr-B 23 À base de Ni, ligado ao Mo, com ou sem Cr 30 À base de Cu, ligado ao Sn 31 À base de Cu, ligado ao Al 32 À base de Cu, ligado ao Ni
UM	Método de produção GW - laminado GO - fundido GZ - extrudado GS - sinterizado GF - tubular UM - revestido	200	Nível de dureza Faixa de dureza 150 125 ≤ HB ≤ 175 200 175 < HB ≤ 225 250 225 < HB ≤ 275 300 275 < HB ≤ 325 350 325 < HB ≤ 375 400 375 < HB ≤ 425 500 450 < HB ≤ 530 40 37 ≤ HRC ≤ 42 45 42 < HRC ≤ 47 50 47 < HRC ≤ 52 55 52 < HRC ≤ 57 60 57 < HRC ≤ 62 65 62 < HRC ≤ 67 70 HRC ≥ 68
KP	Propriedades do metal de adição C - resistente à corrosão G - resistente ao desgaste abrasivo K - capaz de endurecer em trabalho N - não magnetizável P - resistente ao impacto R - resistente à formação de carepa S - habilidade de corte (aços rápidos, etc) T - tão resistente a altas temperaturas quanto os aços ferramenta para trabalho a quente Z - resistente ao calor (não formadores de carepa), para temperaturas acima de 600 °C		

Figura 11: Classificação de consumíveis para revestimento (DIN 8555, 1983)

Reparos por soldagem

Os reparos por soldagem necessitam de inspeção conforme os critérios de qualidade exigidos para fundidos. Os reparos devem ser realizados com uso de procedimento de soldagem e por soldadores capazes de realizar soldas de boa sanidade. Em geral, o metal de

solda deverá ser austenítico, mas nas superfícies o metal de solda deverá ser austenítico ao manganês. (ASTM 128).

Previsão da microestrutura do metal de solda

A tabela 5 apresenta consumíveis para soldagem de aços hadfield com respectivas microestruturas de metal de depositado mapeadas através do diagrama de Schaeffler, com base na composição química típica informada pelo respectivo fabricante. Apresenta também a aplicação dos consumíveis aos aços Hadfield de acordo com as recomendações mencionadas neste trabalho.

Tabela 5: Composição química do metal depositado, microestrutura e aplicações de consumíveis para soldagem de aços Hadfield.

Classificação	E307-15	E309L-17	E312-17	E 7-UM-200-K
Consumível / Fabricante	OK 67.45 (ESAB)	OK 67.61 (ESAB)	OK 68.84 (ESAB)	OK 86.18 (ESAB)
C	0,07%	0,03%	0,04%	0,60%
Si	0,25%	0,85%	0,84%	0,40%
Mn	6,95%	1,03%	0,78%	12,00%
Cr	18,10%	23,66%	28,20%	
Ni	9,45%	12,26%	10,30%	3,80%
Mo		0,19%	0,01%	
Microestrutura	Austenítica	Austenítica Ferrítica	Austenítica Ferrítica	Austenítica
Aplicação	- Amanteigamento para união de aços hadfield; - União aços baixo carbono e baixa liga com aços Hadfield.	- União aços baixo carbono e baixa liga com aços Hadfield.	Reparos de aços Hadfield.	Enchimento e acabamento de aços Hadfield.

Percebe-se que o metal de solda resultante da união de aço austenítico manganês amanteigado com E307 OK 67.45, independente do grau do aço, terá sempre microestrutura austenítica, independentemente da diluição resultante da soldagem e se o enchimento e acabamento é realizado com consumível de classificação OK 67.45 ou consumível ao manganês, uma vez que tanto o metal base como esses consumíveis localizam-se na região

austenítica do diagrama. A figura 12 apresenta a microestrutura do metal de solda do amanteigamento feito com o consumível OK 67.45.

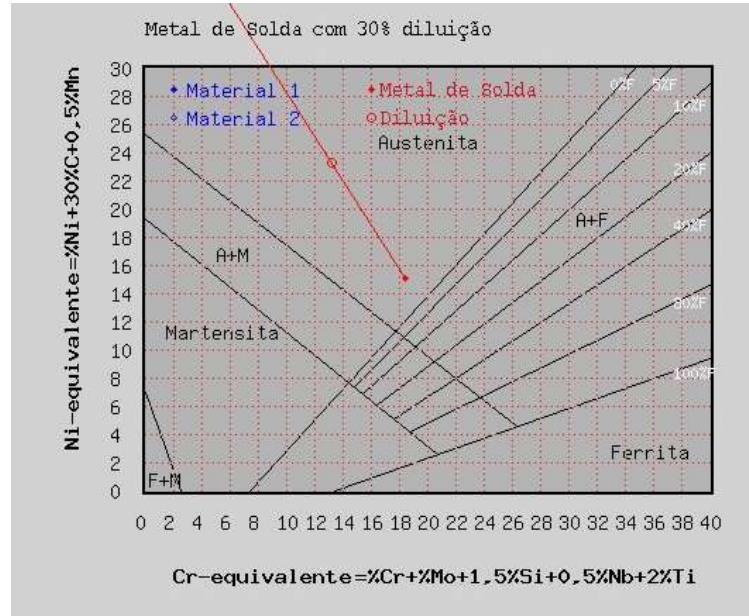


Figura 12: Diagrama de Schaeffler - Amanteigamento de ASTM A128 Gr.A com consumível E307 OK 67.45 considerando 30% de diluição

Sendo o principal problema da soldagem na região austenítica do diagrama de Schaeffler a fissuração a quente, recomenda-se cautela quanto ao teor de enxofre e fósforo assim como avaliação do grau de restrição da peça. A mesma recomendação também é válida para união de aço carbono ASTM A36 ao aço austenítico manganês com consumível OK 67.45. A figura 13 apresenta a microestrutura esperada para união do A36 com A128 Gr.A.

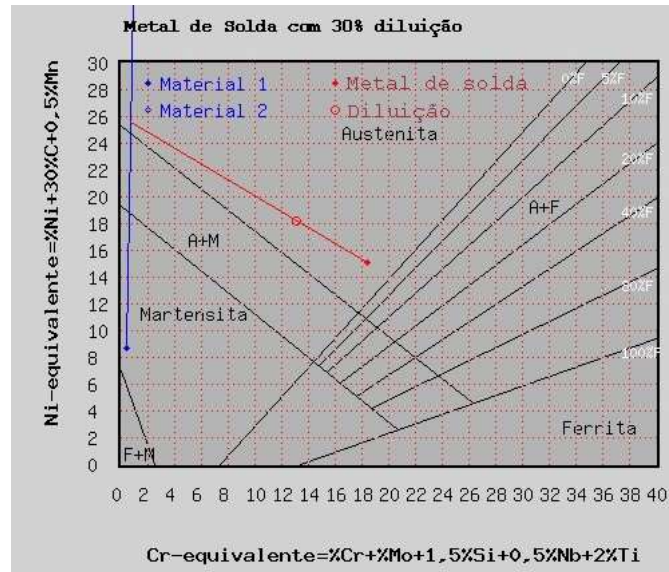


Figura 13: Diagrama de Schaeffler - Amanteigamento de ASTM A128 Gr.A com ASTM A36 consumível E307 OK 67.45 considerando 30% de diluição

Para união de aço carbono ao aço austenítico manganês com consumível E309L OK 67.61, simulando-se ASTM A36 com ASTM A128 Gr.A, obtêm-se na primeira camada microestrutura austenítica ou austenítica ferrítica à depender da diluição. Para 10% de diluição obtêm-se austenítica ferrítica já na primeira camada enquanto que para 30% obtêm-se essa microestrutura apenas na segunda camada. As figuras 14 e 15, apresentam as microestruturas previstas no Diagrama de Schaeffer.

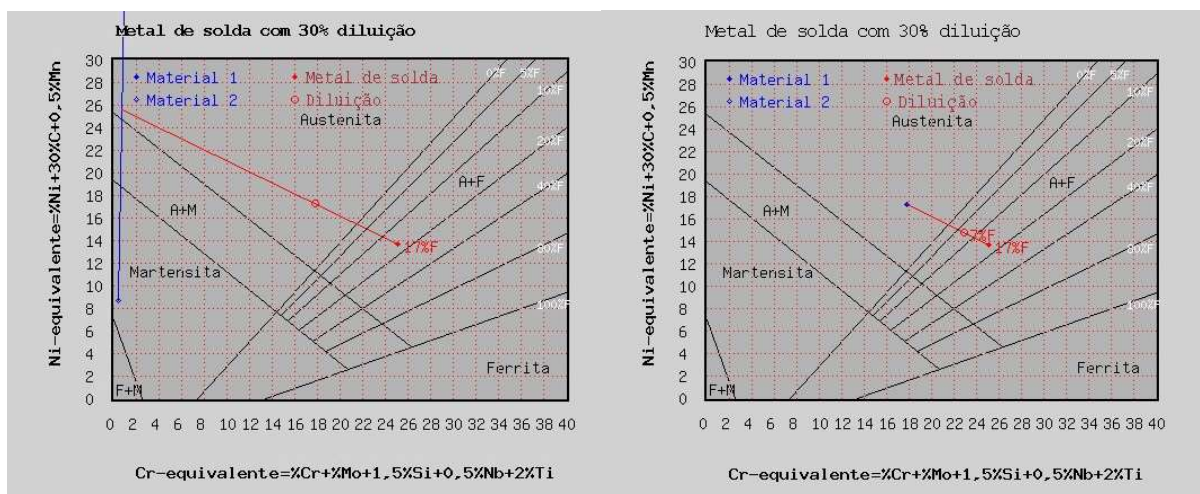


Figura 14: Diagrama de Schaeffler – Primeira camada à esquerda e segunda camada à direita em união de ASTM A36 com ASTM A128 Gr.A com consumível E309L OK 67.61 considerando 30% de diluição

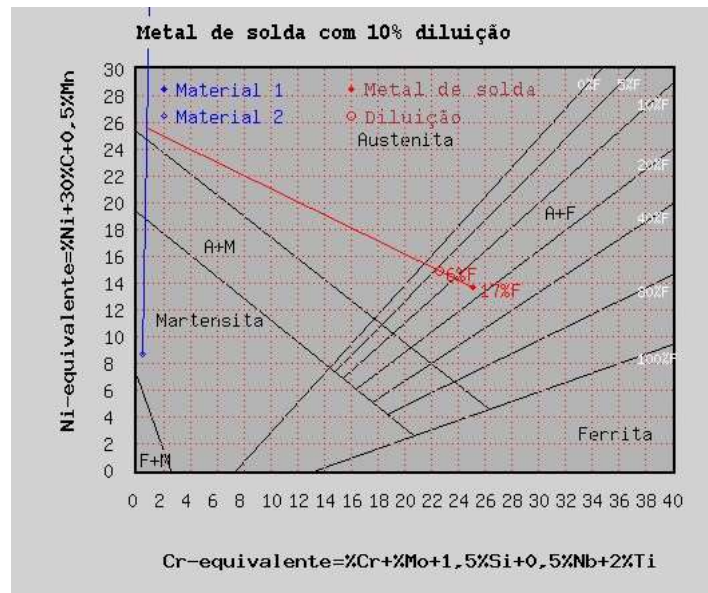


Figura 15: Diagrama de Schaeffler – Primeira camada em de união de ASTM A36 com ASTM A128 Gr.A com consumível E309L OK 67.61 considerando 10% de diluição

A primeira camada é portanto crítica e é aquela à qual se se deve ter maior atenção quanto à fissuração a quente, nessa aplicação.

Em reparos com utilização de consumível E312 OK 68.84, obtêm-se na primeira camada do metal depositado uma microestrutura austenítica ou austenítica ferrítica, à depender da diluição. Para 10% de diluição obtêm-se austenítica ferrítica já na primeira camada enquanto que para 30% obtêm-se microestrutura austenítica ferrítica apenas na segunda camada. As figuras 16 e 17 apresentam as microestruturas previstas no Diagrama de Schaeffer. Recomenda-se, portanto, uma menor diluição nesse caso para obtenção de parte da microestrutura ferrítica, o que contribui para prevenir a fissuração a quente.

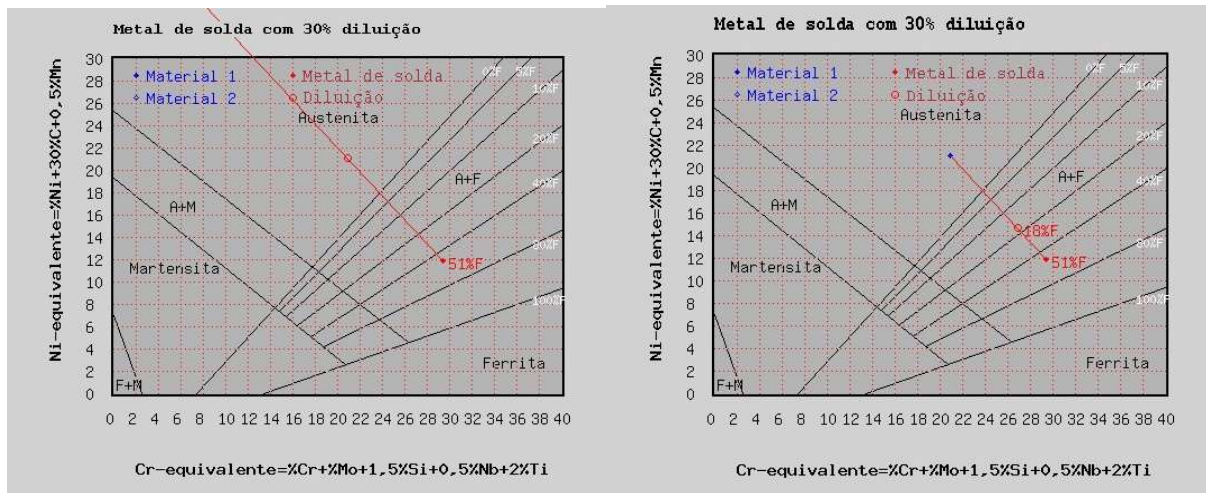


Figura 16: Diagrama de Schaeffler – Primeira camada à esquerda e segunda camada à direita em solda de ASTM A128 Gr.A com consumível E312 OK 68.84 considerando 30% de diluição

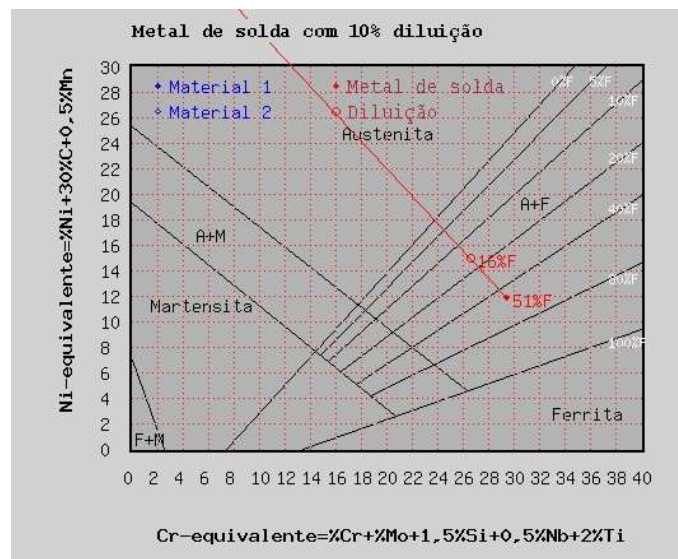


Figura 17: Diagrama de Schaeffler – Primeira camada em solda de ASTM A128 Gr.A com consumível E312 OK 68.84 considerando 10% de diluição

CONCLUSÃO

Problemas comumente encontrados na soldagem dos aços austeníticos ao manganês são: a fragilização ao reaquecimento por precipitação de carbonetos; a fissuração a quente relacionada a teores de fósforo e enxofre e às contrações e grau de restrição da peça e a não remoção de locais encruados do metal base antes da soldagem.

As boas práticas que contribuem para prevenir tais problemas são diversas e parte delas são apresentadas nesse trabalho, como o controle do aporte térmico e da temperatura durante o serviço de soldagem, para se evitar a fragilização ao reaquecimento. Outra prática muito interessante é o uso do Diagrama de Schaeffler para se prever a microestrutura e tomar medidas para prevenir a fissuração a quente comum em microestrutura totalmente austenítica, através do controle da diluição e escolha do consumível a ser empregado. O uso de consumível E309L frente ao E307 para soldagem de aço austenítico manganês com aço carbono ou aço baixa liga pode permitir a obtenção da estrutura ferrítica austenítica, a qual é mais resistente a fissuração a quente. Recomenda-se também evitar elevadas espessuras e elevado grau de restrição da peça para se prevenir a fissuração a quente.

A escolha dos consumíveis deve levar em conta a aplicação desejada e outros aspectos relacionados à soldagem, tais como: reparo, solda de união de aços austenítico manganês ou com outro aço, recuperação/reconstrução de peças, e dureza e resistência ao desgaste desejadas, assim como o grau de restrição e a espessura da peça.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A 128 / A 128M, Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese, ASTM International, 2003.

BRIGGS, CHARLES W. The effects of surface discontinuities on the fatigue properties of cast steel sections. In: Mechanical Engineering. 345 E 47TH ST, New York, NY 10017 ASME-AMER SOC MECHANICAL ENG, 1968. p. 69-&.

BOILER, A. S. M. E.; CODE, Pressure Vessel. Section II–Materials, Part C. ASME, New York, 2010.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 6ª edição. São Paulo: ABM, 1988.

DAVIS, Joseph R. Metals handbook. ASM international, 1998.

MENDEZ, J. et al. Weldability of austenitic manganese steel. Journal of Materials Processing Technology, v. 153, p. 596-602, 2004.

MENDEZ, J. Weldability of austenitic manganese steel. 1978

QIAN, Lihe; FENG, Xiaoyong; ZHANG, Fucheng. Deformed Microstructure and Hardness of Hadfield High Manganese Steel. Materials transactions, v. 52, n. 8, p. 1623-1628, 2011.

Repair and Maintenance Handbook. 2.ed. Gothenburg ESAB AB, 2010

Roll Crusher Maintenance, Rebuilding, and Repair, Pit and Quarry- October 1970, pp. 104–106.

SUBRAMANYAM, D. K. Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys Austenitic Manganese Steels. In: ASM handbook. Asm International, v.1, pp. 1274-1302, 2005.

TAYLOR, L.; HOWARD, E. B. Metals Handbook Vol. 1: Properties and Selection of Metals. American Society for Metals, 1961.

VOORT, G.F.V. Understanding and Measuring Decarburization. Advanced Materials & Process – February 2015.

XIAOYUN, Li et al. Influence of impact energy on work hardening ability of austenitic manganese steel and its mechanism. Foundry Journal Agency China Foundry. <http://www.foundryworld.com/uploadfile/2012082747991625.pdf>, 2012.

Welding Handbook: Metals and Their Weldability (Vol. 4), American Welding Society, Jan-2007)

Wear parts application Guide, METSO, 2011

Filler metals used for surfacing, DIN 8555, November 1983