

# MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO BAIXO CARBONO COM ALTO TEOR DE MANGANÊS(27%P) LAMINADO\*

Marcos Natan da Silva Lima<sup>1</sup>  
Pedro Paulo Nunes Maia<sup>2</sup>  
Hamilton Ferreira Gomes de Abreu<sup>3</sup>

## Resumo

O aço com alto manganês tem sido estudado como alternativa mais barata em substituição às ligas de aço mais utilizadas, devido as suas propriedades de resistência, ductilidade e tenacidade. Foi alterada a composição de manganês para teores acima dos teores dos aços Hadfield, visando sua aplicação em temperaturas criogênicas. Foram obtidas ligas de aço com alto teor de Manganês através do processo de fundição. O objetivo é avaliar as alterações provocadas pelo aumento do Manganês no aço fundido. Através do estudo realizado no Thermo-Calc®, as amostras da liga fundida foram submetidas à laminação a quente e posterior tratamento térmico de solubilização a 700 °C, com o intuito de manter a microestrutura austenítica. As mesmas foram analisadas quanto à microestrutura por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os ensaios de dureza realizados confirmaram a elevada dureza das ligas, bem como a variação entre as ligas no estado fundido e solubilizado.

**Palavras-chave:** Aço Alto Manganês, Laminação, Caracterização Microestrutural, Dureza.

## MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF LOW CARBON STEEL WITH HIGH MANGANESE (27% P) ROLLED)

### Abstract

High manganese steel has been studied as a cheaper alternative to replace the most commonly used steel alloys due to their properties of strength, ductility and toughness. The composition of manganese was altered for contents above the contents of Hadfield steels, aiming its application in cryogenic temperatures. Steel alloys with high Manganese content were obtained through the casting process. The objective is to evaluate the changes caused by the increase of Manganese in the molten steel. Through the study performed in Thermo-Calc®, samples of the molten alloy were subjected to hot rolling and subsequent thermal treatment of solubilization at 700 °C, in order to maintain the austenitic microstructure. They were analyzed for microstructure by optical microscopy (MO) and scanning electron microscopy (SEM). The hardness tests performed confirmed the high hardness of the alloys as well as the variation between the alloys in the molten and solubilized state.

**Keywords:** High Manganese Steel, Rolling, Microstructural Characterization, Hardness.

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia e Ciência de Materiais, Engenheiro Metalúrgico e de Materiais, Bolsista, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

<sup>2</sup> Estudante de Engenharia Metalúrgica, Bolsista, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica, Engenheiro Nuclear, Docente, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e o passar dos anos temos cada vez mais presente em nossas vidas, o aço. A fundição se destaca como processo de fabricação por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos; peças de extrema responsabilidade como as que se destinam à indústria aeronáutica e aeroespacial. O aço manganês austenítico original, contendo cerca de 1,2% C e 12% Mn, foi criado por Sir Robert Hadfield, em 1882. Foi uma descoberta que conseguiu conciliar alta tenacidade, ductilidade com alta capacidade de endurecimento em trabalho e boa resistência ao desgaste [1]. Os aços Hadfield (aço manganês austenítico) ainda são amplamente utilizados, com pequenas modificações na composição e tratamento térmico, principalmente nas áreas de terraplenagem, minas e pedreiras, bem como perfuração de petróleo, siderurgia, dragagem [2;3]. O gás natural em temperaturas criogênicas sofre uma drástica redução em seu volume, facilitando sua armazenagem e transporte. De uma forma geral, as ligas utilizadas para fabricação de tanques de GNL necessitam de alta resistência para que a espessura da parede do tanque seja minimizada, e se faz necessário também que essas ligas apresentem alta tenacidade em baixas temperaturas. Entre essas ligas está o aço 9% Ni, principal aço utilizado para essa aplicação. As ligas com alto teor de Manganês surgiram como alternativa devido ao seu menor custo em relação ao aço 9% Níquel, onde o Mn substitui o Ni como elemento estabilizador da austenita, fase imprescindível para manutenção das propriedades necessárias a baixíssimas temperaturas. Há muitos estudos realizados sobre os aços alto Mn, onde principalmente são avaliadas às propriedades mecânicas.

Muitas variações do aço austenítico manganês original que têm sido propostas nos últimos anos, geralmente envolvendo variações de carbono e de manganês, com ou sem elementos de liga. Outro grande estudo de aplicação das novas ligas de aço alto manganês tem sido para aplicações criogênicas como material para fabricação de vasos para armazenagem de GNL (Gás Natural Liquefeito), onde se busca propriedades mecânicas de elevadas resistência e tenacidade à baixíssima temperatura (criogênica) (et al [4]), em substituição as ligas 9%Ni, devido ao fato de que o minério de Mn (Manganês) ter um valor agregado menor em relação ao Ni (Níquel).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais foram fornecidos pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Com o software Thermo-Calc® foi realizada uma simulação das possíveis fases presentes no material, variando temperatura e composição de Manganês. Para tal análise foi inserida a composição química da amostra fundida. O software calcula termodinamicamente e produz um diagrama Fração em massa de Fase x Temperatura, e indica nas várias regiões do gráfico a presença de cada fase do material, e como também foi calculado no software o Diagrama de fases do sistema Fe-27Mn-1Si. Em concordância aos resultados obtidos, foram determinadas as temperaturas para o tratamento térmico de solubilização, com o objetivo de se obter microestrutura essencialmente austenítica. Foram utilizadas duas técnicas para a identificação dos teores dos elementos de liga presentes nos aços fundidos com alto teor de Manganês. As análises químicas foram realizadas utilizando-se a técnica de Espectrometria por

Energia Dispersiva de Raios-x (Energy Dispersive Spectrometry - EDS) acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Tescan, modelo VEGA-XM com tensão de aceleração de 20 kV, equipamento este presente no Instituto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Universidade Federal do Ceará (IPDI-UFC). A outra técnica utilizada foi a Espectroscopia de Emissão Ótica (Optical Emission Spectroscopy - OES), para a identificação da composição química do aço carbono e de alguns elementos não identificados pela técnica (EDS). A análise química utilizando a técnica (OES) foi realizada no Espectrômetro de emissão Óptica da marca Shimadzu, modelo PDA 7000. Equipamento este presente no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará (LACAM-UFC). As amostras dos aços alto Manganês fundido foram submetidas às seguintes condições: laminadas a quente (Temperatura=700°C) com 40%, 60%, 80% de redução na espessura respectivamente mais posterior tratamento térmico de solubilização à 700°C resfriado em água.

Foram preparadas um total de quatro amostras, uma amostra no estado bruto de fusão, três amostras laminadas e solubilizadas. As mesmas foram lixadas em granulometria cada vez menores 100, 220, 320, 360, 400, 600 e 1200 mesh, em seguida polidas com pasta de diamante com granulometria 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Amostras de aço alto Manganês têm como característica ter uma difícil preparação, neste caso com um agravante de ser um material fundido. Logo se fez necessário um polimento em alumina de 1,0  $\mu\text{m}$  e posterior polimento final eletrolítico por um período de 10-20 minutos por amostra. Foi aplicado um ataque químico com solução de Nital ( $\text{HNO}_3 + \text{Álcool Etílico}$ ), durante um tempo de (3-8) segundos, para serem observados os contornos de grão da microestrutura. Para cada condição foram obtidas várias fotos com intuito de analisar a microestrutura do aço alto Manganês nas condições bruto de fusão e laminado solubilizado. Para tal, o microscópio ótico Zeiss modelo (Axio Imager 2) foi utilizado na aquisição das imagens. Equipamento este presente no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM-UFC).

A dureza foi realizada no durômetro M/Sussen Wolpert, tipo testor HT1-Super, em posições distantes da borda e seguindo as orientação da norma ISO (6508-1:2005 Metallic materials -- Rockwell hardness test -- Part 1: Test method (scale B) com uma carga de 100 Kgs em tempo de 10 segundos. Equipamento este pertencente ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM-UFC). Foi utilizada uma esfera de aço (diâmetro da esfera 1,5875mm). A região escolhida para análise foi a de sentido transversal à direção de corte. Foram obtidas 5 medições para cada amostra analisada, perfazendo no total de 20 medições.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição do aço 27% Manganês está ilustrada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Análise Química da Liga

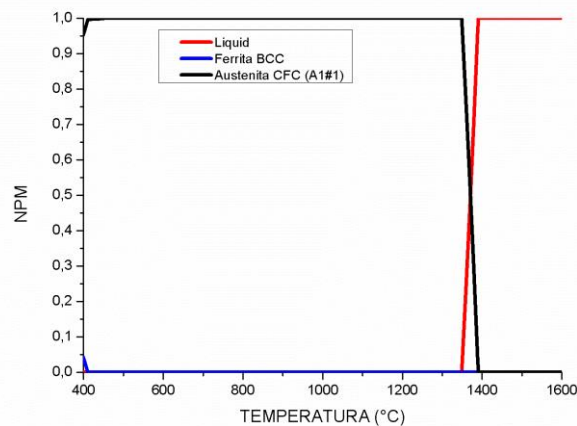
Mn	C	Si	Ni	Cr	Fe	
27	0,02	1,0	0,19	0,41	Bal.	(%p)

Fonte: o autor.

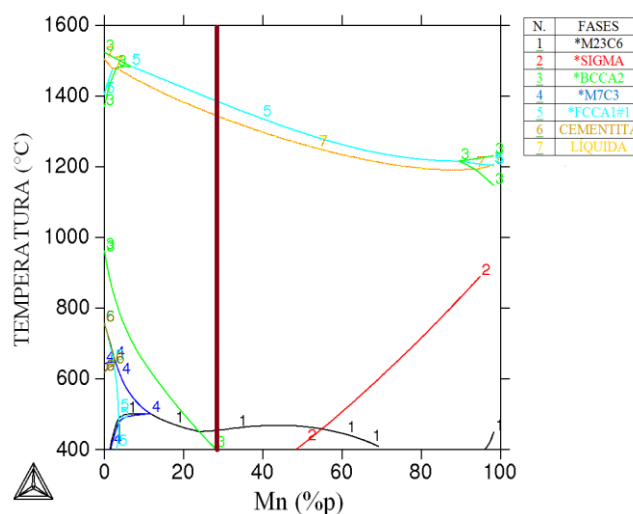
Para as simulações de frações em massa de fases, realizadas no software THERMO-CALC, foram utilizadas as composições obtidas na espectroscopia de emissão ótica. Avaliou-se a formação das possíveis fases para o aço com alto teor de Manganês. Como resultados foram obtidos diagramas na faixa de temperatura de (0-1600 °C) apresentado na Figura 1 e 2. Analisando o diagrama de fração em

massa de fases da liga na Figura 1 é possível identificar a região na qual a fase austenítica está presente de forma isolada. No diagrama da Figura 1, percebe-se um grande campo austenítico, pois o alto teor de Mn estabiliza a Austenita ( $\gamma$ -CFC) acima da temperatura de 400°C aproximadamente.

O diagrama do sistema Fe-27Mn-1Si com fases variando temperatura e teor de Mn pode ser observado na Figura 2. A linha marrom representa a composição/temperatura da liga utilizada neste trabalho.



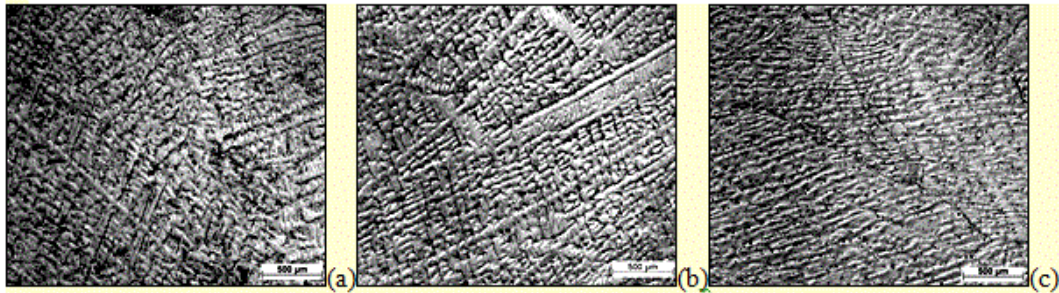
**Figura 1.** Gráfico de fração em massa de fase com o aumento da temperatura do aço alto Mn (28%p). Fonte: o autor.



**Figura 2.** Sistema Fe-27Mn-1Si (%p). Linha na cor marrom representa a composição da liga estudada neste trabalho. Fonte: o autor.

Alguns elementos quando dissolvidos no ferro, tendem a estabilizar a estrutura CFC em relação à estrutura CCC, como por exemplo, o Manganês. Este efeito é mais comum em elementos que puros, apresentam estrutura CFC, assim como os elementos Níquel, Cobre [6]. Análises da microestrutura encontrada para esta liga em seu estado bruto de fusão e com posterior tratamento termomecânico. Na Figura 3 (a, b e c) logo abaixo se pode observar claramente a estrutura dendrítica característica dos aços fundidos, em seu estado bruto de fusão sem tratamento termomecânico aplicado.



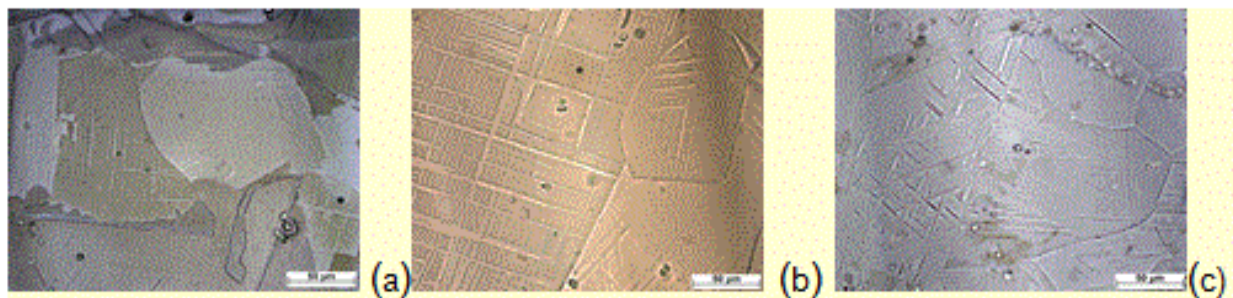


**Figura 3.** Micrografias da liga fundida e laminada a 700°C obtidas em microscópio óptico, (a), (b) e (c) laminadas com redução da espessura 40, 60, 80% de redução. Fonte: o autor.

Nas Figuras 4, 5, pode-se observar as micrografias feitas em microscópio óptico, evidenciando os grãos poligonais (característicos da fase Austenítica ( $\lambda$ )), porosidades oriundas da não solidificação em equilíbrio, de inclusões não metálicas geradas por gases como oxigênio e nitrogênio e possivelmente a presença de matensita ( $\varepsilon$ ) e maclas oriundas da deformação plástica.

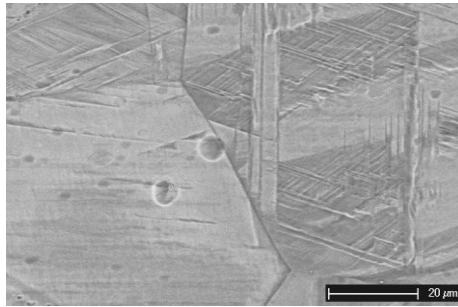


**Figura 4.** Micrografias da liga fundida e laminada/solubilizada a 700°C obtidas em microscópio óptico, (a), (b) e (c) laminadas com redução da espessura 40, 60, 80% de redução. Aumento 200x. Fonte: o autor.

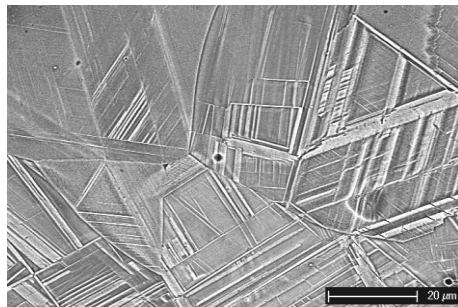


**Figura 5.** Micrografias da liga fundida e laminada/solubilizada a 700°C obtidas em microscópio óptico, (a), (b) e (c) laminadas com redução da espessura 40, 60, 80% de redução. Aumento 500x. Fonte: o autor.

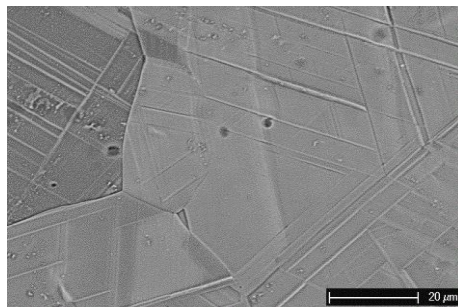
As imagens obtidas em MEV foram obtidas na tentativa de se obter mais informação acerca da microestrutura da liga Fe-Mn. Nas Figuras 6,7 e 8 estão as imagens obtidas no MEV para as respectivas deformações de 40,60 e 80% na espessura.



**Figura 6.** Micrografias da liga fundida e laminada/solubilizada a 700°C obtidas em microscópio eletrônico de varredura, laminadas com redução de 40% na espessura. Aumento 3000x.  
Fonte: o autor.



**Figura 7.** Micrografias da liga fundida e laminada/solubilizada a 700°C obtidas em microscópio eletrônico de varredura, laminadas com redução de 60% na espessura. Aumento 3000x.  
Fonte: o autor.



**Figura 8.** Micrografias da liga fundida e laminada/solubilizada a 700°C obtidas em microscópio eletrônico de varredura, laminadas com redução de 80% na espessura. Aumento 3000x.  
Fonte: o autor.

Caracteriza-se como uma microestrutura com grãos austeníticos e porosidades devidas a óxidos formados no processo de fundição.

Com o intuito de melhor analisar o efeito do tratamento termomecânico nas propriedades mecânicas do aço alto Mn, foram levantados os perfis de dureza para as quatro amostras estudadas neste trabalho. Nas amostras em seu estado bruto de fusão e nas três amostras laminadas/solubilizadas. Resultados da medição de dureza realizados nas amostras estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – (A) Resultados do Ensaio de Dureza Rockwell B realizado na liga nos estados Fundidos e Laminados/Solubilizado.

	Valores de Dureza (HRB)					Média	Erro(+/-)
Fundido	95	96	97	95	95	96	0,5
Laminada 40% Tratada	89	88	93	96	89	91	0,2
Tratada 60%	93	97	94	97	96	95	0,5
Tratada 80%	97	98	98	99	97	98	0,1

Fonte: o autor

#### 4 CONCLUSÃO

A caracterização dos aços Alto teor Mn em seu estado bruto de fusão apresentaram apenas porosidades e uma microestrutura dendrítica característica dos aços produzidos pelo processo de fundição, já as amostras laminadas apresentaram grãos austeníticos poligonais com grande presença de porosidades (óxidos) oriundos da fundição em ambiente não controlado. A microestrutura apresentou também uma possível martensita ( $\epsilon$ ), além de maclas de deformação e possíveis bandas de deslizamento, característica resultante da deformação plástica dos aços austeníticos com alto teor de Manganês arrefecido em água. A escolha da temperatura foi obtida através do software *Thermo-Calc*® com o intuito de se obter um menor grão possível consequentemente uma melhora nas propriedades mecânicas da Liga Fe-Mn-Si. Houve uma pequena diminuição da dureza das amostras das Ligas 40% e 60% solubilizadas em comparação com as amostras em seu estado bruto de fusão, devido ao tratamento térmico em que essas amostras sofreram após a conformação mecânica. Já a amostra como recebida pode-se justificar sua elevada dureza devido a sua estrutura dendrítica.

#### Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Estado do Ceará, assim como do Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

#### REFERÊNCIAS

- 1 LIMA, M.N.S., Caracterização e propriedades mecânicas dos aços com alto teor de manganês (18-28%p) e carbono (1,1-1,7%p) produzidos em um forno de indução no laboratório de fundição da Universidade Federal do Ceará. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE, 2016.
- 2 LIMA, G. R. INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NO ENCRUAMENTO PROVENIENTE DO PROCESSO DE USINAGEM NOS AÇOS HADFIELD, em III Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Unesp. Bauru, São Paulo. 2009.
- 3 AVERY. Howard. S. Austenitic Manganese Steel, ASM Handbook, v.1, p.1274 – 1283, 2004.

- 4 CHOI, J.K., et al. High Manganese Austenitic Steel for Cryogenic Applications. in Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, 2012.
- 5 COLPAERT, Huberts. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. - 4º Edição – São Paulo: Blucher, p. 421. 2008.