

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS COM ALTO TEOR DE MANGANÊS (18-28%P) PRODUZIDOS NO LABORATÓRIO DE FUNDIÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

Marcos Natan da Silva Lima¹, Waydson Martins Ferreira², Caio David Andrade¹,
Jeferson Leandro Klug¹, Hamilton Ferreira Gomes de Abreu¹.

¹Universidade Federal do Ceará, Campus Universitário do Pici – Centro de
Tecnologia – Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Bairro Pici - CEP:
60440-554 - Fortaleza - CE

²Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella –
Centro de Tecnologia – Curso de Engenharia Mecânica - Bairro Ininga - CEP:
64049-550 - Teresina - PI

marcosnatan.sl@gmail.com

Resumo: *O aço 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. Foram produzidas ligas de aço com alto teor de Mn e C através do processo de fundição. O objetivo é avaliar as alterações provocadas pelo aumento do Mn e do C no aço fundido. Através de estudo realizado no Thermo-Calc®, as ligas fundidas foram submetidas a tratamento térmico de solubilização a 1100 °C, com o intuito de manter a microestrutura austenítica. As mesmas foram analisadas por microscopia ótica (MO) e MEV das ligas no estado bruto de fusão e solubilizadas. Os ensaios de dureza e microdureza realizados confirmaram a elevada ductilidade das ligas, bem como a variação entre as ligas no estado fundido e solubilizado.*

Palavras-chave: *Aço Alto Manganês, Fundição, caracterização microestrutural, tenacidade.*

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 (LIMA, 2016) 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. (LIMA, 2009; AVERY, 2004).

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 de transporte e armazenagem de GNL (Gás Natural Liquefeito), onde se busca propriedades mecânicas de elevadas resistência e tenacidade à baixíssima temperatura (criogênica) (et al CHOI, 2012).

Tabela 1 — Principais Estatísticas de produção mineral no Brasil.

Discriminação		Unidade	2011 ⁽¹⁾	2012 ⁽¹⁾	2013 ⁽¹⁾
Produção	Concentrado	10 ³ t	2.738	2.796	2.833
	Metal Contido (4)	10 ³ t	1.139	1.164	1.180
	Ferroligas à base de Mn	10 ³ t	296	307	311
Importação	Concentrado	10 ³ t	8	34	32
		(10 ³ US\$-FOB)	5.943	8.727	8.886
	Semimanufaturado	10 ³ t	90	70	61
		(10 ³ US\$-FOB)	144.341	107.414	84.108
Exportação	Concentrado	10 ³ t	2.091	1.558	1.835
		(10 ³ US\$-FOB)	306.859	201.424	262.532
	Semimanufaturados	10 ³ t	76	75	79
		(10 ³ US\$-FOB)	95.621	76.719	79.850
Consumo Aparente ⁽²⁾	Concentrado	10 ³ t	655	1.272	1.030
Preços	Minério de Manganês ⁽²⁾	(US\$/t-FOB)	147,00	129,00	143,00
	Ferroligas à base de Mn ⁽³⁾	(US\$/t-FOB)	1.257,00	1.422,00	1.494,00

Fonte: DNPM(2014).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a fabricação do molde de areia verde para a fundição em laboratório foram utilizadas: areia de praia (\cong 98% em massa, Sílica), lavada em água corrente por repetidas vezes e posicionada para secagem em temperatura ambiente sob uma plataforma coberta, somada à argila natural comum de jardinagem (como

aglomerante), e água atuando como ligante. A composição da areia verde utilizada nos três processos de fundição realizados foi constituída de: 75% p. de areia, 23% p. de argila e 2% p. de água. Após a preparação da mistura, a mesma foi colocada e prensada dentro do molde junto com o modelo da peça (dimensões 100x66x12, 5 mm) e com os respectivos canais para escoamento do metal fundido. Em seguida o molde foi reservado para a secagem em temperatura ambiente por um período de 24 horas, após esse período o molde passou pelo processo de secagem em estufa por um intervalo de 8-12 horas a uma temperatura de 120°C.

Para realizar a fusão do material metálico foi utilizado um forno de indução elétrico, modelo esse com potência máxima de 50 kW da marca nacional SERVIFOR Ltda. Equipamento este presente no Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará (LAF-UFC). O processo de fusão da carga foi realizado primeiro com o aquecimento prévio do cadinho, e acionamento da bomba de refrigeração do forno. Posteriormente foi aumentada a potência do forno gradualmente até a temperatura de fusão da carga (Temperatura de fusão \cong 1600°C). Como cargas foram utilizados tarugos com diâmetros entre 25,5 mm de aço carbono 1020. Utilizou-se também o Manganês eletrolítico adicionado ao longo do processo de fundição. Para a primeira corrida foram utilizados 1,4 kg do aço carbono 1020 e 0,6kg de Manganês Eletrolítico totalizando uma carga de 2 kg de material. Na segunda corrida foi utilizada uma carga contendo 3,0 kg do aço carbono 1020 e 1,0 kg de Manganês eletrolítico. As composições das ligas foram obtidas através do cálculo do balanço de massa para a fabricação do aço com alto teor de Manganês.

A primeira corrida foi realizada com a utilização do tarugo em volume único, com tempo médio de 23 minutos da introdução do aço 1020 da carga até o vazamento. Na segunda corrida também se utilizou um tarugo com volume único e uma carga de maior volume total. Logo após a fusão da carga, foi vazado todo o metal líquido no molde de areia e obteve-se o produto em estado bruto de fusão.

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). 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 das amostras fundidas. O software calcula termodinamicamente e produz um diagrama Fração em massa x Temperatura, e indica nas várias regiões do gráfico a presença de cada fase do material. Em concordância aos resultados obtidos, foram determinadas as temperaturas para o tratamento térmico de solubilização, com o objetivo de se obter microestrutura essencialmente austenítica (LIMA, 2016).

2.4 Experimental

As amostras de cada liga de aço alto Manganês foram submetidas a um processo de solubilização nas temperaturas correspondentes a composição química e diagrama de fases obtido por software THERMO-CALC. As temperaturas utilizadas nos tratamentos foram 1100 °C para as amostras das ligas 1 e 2 por um período de 2 horas. Após isso, foram resfriadas em água. A essas temperaturas as ligas se encontravam na fase austenítica, segundo a Simulação do Diagrama de Fração em Massa de Fases realizada para este trabalho. Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno elétrico da marca EDG modelo 3P-S, que atinge temperatura máxima de 1200 °C. Este equipamento esta presente no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará (LACAM-UFC).

Foram preparadas quatro amostras, duas amostras no estado bruto de fusão e duas amostras solubilizadas. As mesmas foram lixadas em granulometria cada vez menores 100, 220, 320, 360, 400, 600 e 1200, em seguida polidas com pasta de diamante com granulometria 6, 3 e 1 µm. Amostras de aço alto Manganês têm como característica ter uma difícil preparação, neste caso com um agravante de ser um material fundido e com alto teor de Carbono. Logo se fez necessário um polimento em alumina de 0,05 µm e posterior polimento final automatizado por um período de

5-8 horas por amostra no equipamento Buehler minimet 1000 modelo 69-1100 com abrasivo de sílica diluída em água destilada. Equipamento este presente no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM-UFC). Foi aplicado um ataque químico com solução de Nital 2% (2ml HNO₃ + 98ml Álcool Etilico), durante um tempo de (5-10) segundos, para serem observados os contornos de grão da microestrutura. Logo em seguida foi realizado outro ataque químico com solução de Metabissulfito de Sódio (Na₂S₂O₅) dissolvido em água destilada, em composição de (5g de Na₂S₂O₅ + 50 ml de água destilada), durante um tempo de (5-10) segundos, para serem observadas as formações dendríticas da microestrutura bruta de fusão. Para cada condição foram obtidas várias fotos com intuito de analisar a microestrutura do aço alto Manganês nas condições bruto de fusão e solubilizada. 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 Ensaios Mecânicos (LEM-UFC). Foi utilizada uma esfera de aço (diâmetro da esfera 1,5875mm). A região escolhida foi a de sentido transversal à direção de corte. Foram obtidas 5 medições para cada amostra analisada, perfazendo no total de 20 medições. A microdureza foi realizada apenas nas amostras solubilizadas. Foi utilizado o microdurômetro Shimadzu modelo DUH-W211. Equipamento este pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM-UFC). Os ensaios foram realizados em locais, por exemplo, regiões de fases, carbonetos metálicos, microconstituintes como a perlita fina e porosidades. Foi utilizada uma carga de 980,7 mN em tempo de 15 segundos. Foram feitas medições nas fases visualizadas em cada amostra e também nas suas heterogeneidades.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

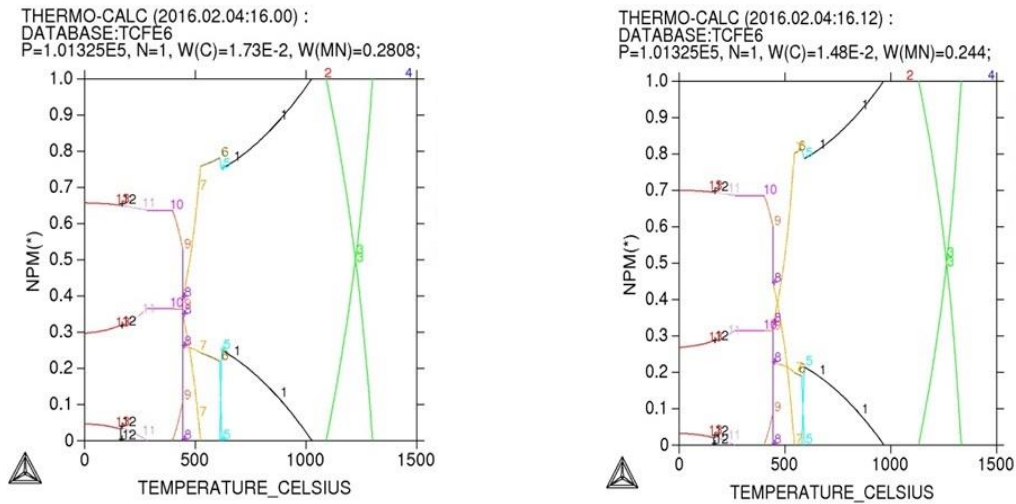
O resultado das análises químicas para cada liga em estudo é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise Química das Ligas 1, 2.

ELEMENTOS	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
LIGA 1 (%p)	1,73	28,08	0,89	0,03	0,010	0,07	0,145	0,20	0,25	bal.
LIGA 2 (%p)	1,48	24,40	0,80	0,033	0,007	0,027	0,080	0,12	0,11	bal.

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 dois diagramas na faixa de temperatura de (0-1500 °C) apresentados na Figura 1.



1	CEMENTITA (Fe ₃ C) + AUSTENITA (γ-CFC)
2	AUSTENITA (γ-CFC)
3	LIQUIDO+AUSTENITA (γ-CFC)
4	LIQUIDO
5	CEMENTITA (Fe ₃ C) +AUSTENITA (γ-CFC) + M5C2
6	AUSTENITA (γ-CFC)+M5C2
7	FERRITA (α-CCC) + AUSTENITA (γ-CFC) +M5C2
8	FERRITA (α-CCC) + AUSTENITA (γ-CFC) +M23C6+M5C2
9	FERRITA (α-CCC) + AUSTENITA (γ-CFC) +M23C6
10	FERRITA (α-CCC) + M23C6
11	FERRITA (α-CCC) + M23C6+M5C2
12	FERRITA (α-CCC) + M23C6+M5C2+M7C3
13	FERRITA (α-CCC) + M23C6+M7C3

Fonte: o autor

Figura 1 – Simulação do Diagrama de Fração em Massa de Fases para a Liga 1 e 2.

Analisando os diagramas de fração em massa de fases das duas ligas procuramos identificar a região na qual a fase austenítica está presente de forma isolada, e verificar as fases presentes, como mostra a Tabela 3.

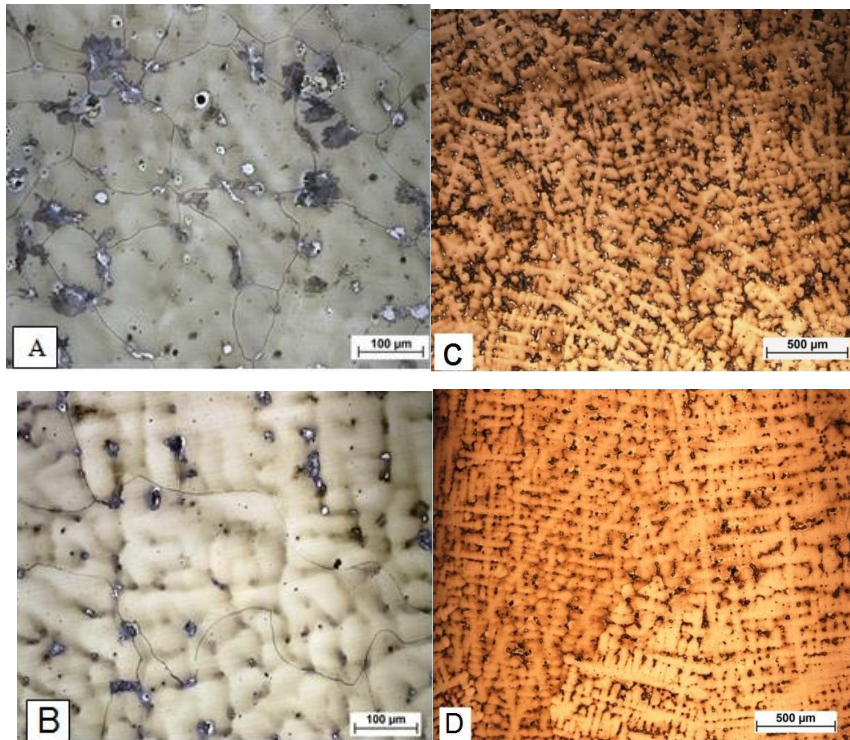
Tabela 3 – Fases Presentes por Faixas de Temperaturas nas Ligas 1, 2 – segundo os Diagramas de Fração em Massa de Fases.

Fases/ Ligas	Liga 1 (T-°C)	Liga 2 (T-°C)
Líquida+austenita	1100-1390	1180-1400
Austenita	1010-1100	980-1180
Austenita + Cementita	700-1010	600-980
Austenita + Cementita + Ferrita + Carbonetos metálicos (M23C6, M7C3, M5C2)	27-700	27-600

Fonte: o autor

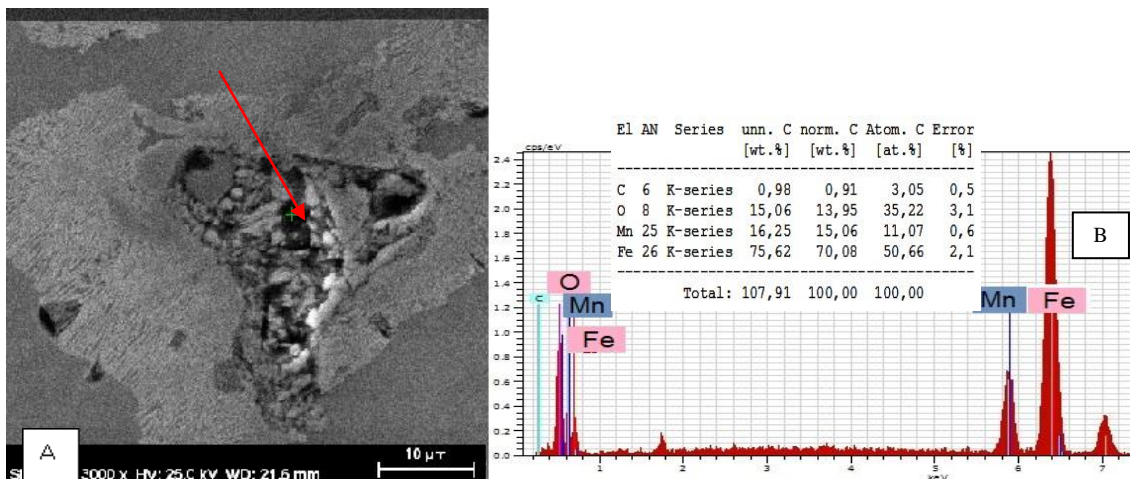
No diagrama da Liga 1 considera-se a grande quantidade de carbonetos também por a liga apresentar frações de elementos formadores de carbonetos como o Molibdênio (COLPAERT, 2008). No diagrama da Liga 2, percebe-se que com a redução do teor de Carbono e Manganês ocorreu um aumento do campo austenítico, se comparado com o diagrama da Liga 1. No entanto o alto teor de Mn continuou estabilizando a Austenita (γ -CFC) a altas temperaturas para a Liga 2. 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 (COLPAERT, 2008). Análises da microestrutura encontrada para as Ligas 1, 2, respectivamente em seu estado bruto de fusão. Inclusive resultados da técnica de EDS, obtidas no MEV. Nas Figuras, 2 (C) e 2 (D) (logo abaixo) pode-se observar claramente a estrutura dendrítica característica dos aços fundidos, em seu estado bruto de fusão sem tratamento térmico aplicado. As porosidades são oriundas da não solidificação em equilíbrio de inclusões não metálicas geradas por gases como oxigênio e nitrogênio. Nas Figuras, 2 (A) e 2 (B) (logo abaixo) estão presentes as micrografias das ligas 1 e 2 em seu estado bruto de fusão, sem prévio tratamento térmico, mas utilizando outro reagente o Nital 2%. Foram revelados grãos de Ferrita (α), com contornos de grão finos. As micrografias das amostras em seu estado bruto de fusão apresentam frações de Ferrita (α), e

carbonetos metálicos (M23C6, M7C3, M5C2). Percebe-se grande presença de porosidades, principalmente nos contornos, assim como carbonetos metálicos.



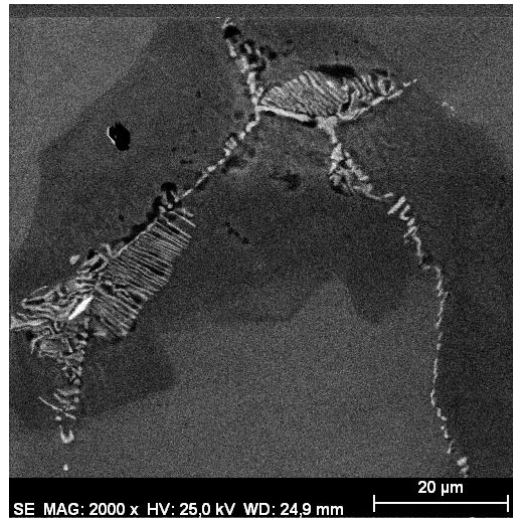
Fonte: o autor.

Figura 2 – Micrografias das ligas fundidas obtidas em microscópio ótico, aumento de 50x. Sendo (C), e (D); ataque com metabissulfito de sódio. E (A), e (B); ataque com nital 2%. (A), (C) Liga 1; (B), (D) Liga 2.



Fonte: o autor.

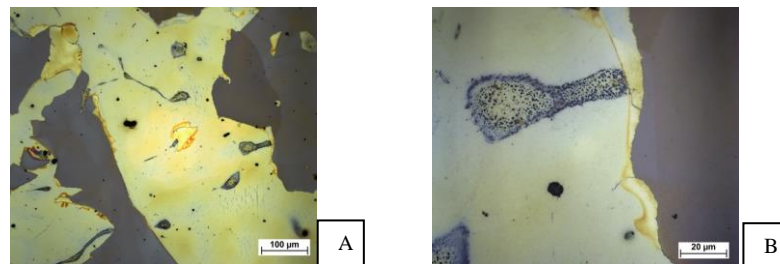
Figura 3 – A) Micrografia feita em MEV da Liga 1 fundida. Aumento 3000x. B) Espectroscopia EDS pontual realizada na região apontada pela seta vermelha.



Fonte: o autor.

Figura 6 - Micrografia MEV-Liga 1 solubilizada-Ataque: Nital 2%-Aumento 2000x.

As Figuras 5 (A) e 5 (B) apresentam micrografias da Liga 1, com aumentos de (200x) e (1000x) respectivamente. A Figura 6 serve para confirmar a presença de perlitas finas nucleadas nos contornos de grãos. Observa-se também que o tratamento térmico de solubilização fez com que a Cementita (Fe_3C) migrasse para os contornos de grão, juntamente com óxidos e inclusões. As Figuras 7 (A) e 7 (B), mostradas abaixo, apresentam a microestrutura da Liga 2 após tratamento térmico de solubilização apresentando grãos austeníticos.



Fonte: o autor

Figura 7 — Micrografia da Liga 2 solubilizada - Ataque: Nital 2% - Aumento A) 200x; B) 1000x.

Com o intuito de melhor analisar o efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço alto Mn, foram levantados os perfis de dureza para as seis amostras estudadas neste trabalho. Nas três amostras em seu estado bruto de fusão e nas três amostras solubilizadas. Resultados da medição de dureza realizados nas amostras estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – (A) Resultados do Ensaio de Dureza Rockwell B Realizado Nas Duas Ligas Nos Estados Bruto de Fusão e Solubilizado.

(B) Resultados do Ensaio de Microdureza Vickers no estado solubilizado.

A	Estado Bruto de Fusão		Estado Solubilizado	
	Dureza Rockwell B	Conversão HV	Dureza Rockwell B	Conversão HV
Liga 1	73,2	137	60,4	108
Liga 2	67,8	123	66,4	120
B	Região da medição		Dureza Vickers (HV)	
Liga1	Grão perlítico		375	
	Grão austenítico		297	
	Óxidos		305	
Liga 2	Grão austenítico		197	

Fonte: o autor.

Os valores da microdureza da Tabela 4 se mostram coerentes, pois a microestrutura dos aços estudados possui estrutura austenítica, mas com grandes porções de inclusões e óxidos, aumentando a microdureza do material. Temos na amostra da Liga 1, os maiores valores de microdureza. Valores altos de microdureza eram esperados para a Liga 1, pois possui a maior composição em (%p) de C e Mn, elevando assim as propriedades mecânicas da liga além de possuir regiões perlíticas em sua microestrutura. Analisando os valores de microdureza para a Liga 2, está justificada a presença de regiões livres de perlitas e carbonetos. Como dito anteriormente a microestrutura da Liga 2 apresentou grãos bem grandes característicos de microestruturas austeníticas, assim os valores de microdureza apresentados na Tabela 6 estão coerentes com a microestrutura apresentada anteriormente nas micrografias. Não foi encontrada regiões perlíticas, pois os valores de 24 (%p) de Mn da liga estabilizaram o campo austenítico inibindo a formação das fases Ferrita (α -CCC) e Cementita (Fe_3C). Como demonstrado pelo diagrama da Figura 2.

4. CONCLUSÕES

A caracterização dos aços Alto teor Mn e C produzidos no LAF em seu estado bruto de fusão apresentaram grãos ferríticos com grande presença de carbonetos metálicos e porosidades (óxidos). A microestrutura apresentou também estrutura dendrítica, característica dos aços produzidos pelo processo de Fundição. A caracterização dos aços com alto de Mn e alto teor de C produzidos no LAF, após o tratamento térmico de solubilização, apresentaram grãos austeníticos com tamanhos grandes, presença de carbonetos metálicos e óxidos. Houve uma pequena diminuição da dureza das amostras das Ligas 1, 2, solubilizadas em comparação com as amostras em seu estado bruto de fusão. A microdureza realizada apenas nas amostras solubilizadas obtiveram resultados que fazem justificativa a microestrutura encontrada nos diagramas termodinâmicos, bem como nas microestruturas analisadas neste trabalho. Com valores bem altos de microdureza Vickers (HV) nas porosidades e nas regiões perlíticas.

5. REFERÊNCIAS

- AVERY. Howard. S. **Austenitic Manganese Steel**, ASM Handbook, v.1, p.1274 – 1283, 2004.
- CHOI, J.K., et al. **High Manganese Austenitic Steel for Cryogenic Applications**. in Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, 2012.
- COLPAERT, Huberts. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. - 4º Edição – São Paulo: Blucher, p. 421. 2008.
- DNPM. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Ministério de Minas e Energia. Sumario Mineral. Disponível em < <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/manganes-sumario-mineral-2014/view#> >. Acesso em: 05 janeiro 2016.
- 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.**