

EFEITO DA ADIÇÃO DE BORO EM ENSAIOS DE TRAÇÃO EM LIGA MODELO DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERFERRÍTICO

JULIANNE RIBEIRO DOS SANTOS¹, EMMANUELLE DE OLIVEIRA SANCHO²; KARLISBENIO TARSO OLIVEIRA DE MENEZES³; MARCELO JOSÉ DO CARMO⁴; JUSCELINO CHAVES SALES^{5*}

¹Doutoranda em Engenharia e Ciência dos Materiais, UFC, Fortaleza-CE, rsjulianne@yahoo.com.br

²Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais, Prof. Universidade de Fortaleza, UNIFOR, Fortaleza-CE, esancho@unifor.br

³Graduando em Engenharia Mecânica, UNIFOR, Fortaleza-CE, karlisbenio@unifor.br

⁴Dr. em Engenharia Mecânica, Prof. Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza-CE, mgsilva@ufc.br

⁵Doutorando em Engenharia de Teleinformática, Prof. Universidade Vale do Acaraú, UVA, Sobral-CE, juscelinochaves@hotmail.com

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: Para a presente pesquisa foi produzida uma liga modelo de aço inoxidável superferrítico com adição de 4,4%p de níquel (Ni) para melhorar a sua tenacidade, o teor de cromo (Cr) foi elevado para 25,7%p para que a estabilidade da fase ferrítica fosse mantida. O teor de Mo foi mantido em 4,6%p, já que tem a finalidade de aumentar a resistência à corrosão. Um fator importante para o estudo desta liga foi a adição de 0,07%p (700 ppm) de boro, aumentando a temperabilidade, a resistência a fluência e estabilizando os contornos de grão desta liga. A atual pesquisa faz parte de um estudo para o desenvolvimento de novas ligas a partir da composição dos aços superferríticos comerciais, afim de aprimora-los para que sejam utilizados em equipamentos como trocadores de calor e torres de destilação que operam em condições extremas de temperatura, pressão e em ambientes contendo alta concentração de cloretos, H₂S e CO₂, que são encontradas nas novas áreas de exploração de petróleo e gás na costa brasileira. O efeito do boro na microestrutura foi estudado através de ensaios de tração comparando dois métodos de fabricação distintos, fundição e centrifugação.

PALAVRAS-CHAVE: superferríticos, boro, ensaio de tração.

EFFECT OF BORON IN ADDITION TENSILE TESTS ON ALLOY STEEL MODEL STAINLESS SUPERFERRITIC

ABSTRACT: For this research was produced one stainless steel alloy model superferritic with addition of 4.4 wt% nickel (Ni) to improve their toughness, the chromium (Cr) was raised to 25.7% p for the stability of the ferritic phase was maintained. The Mo content was maintained at 4.6% w since it has the purpose to increase the corrosion resistance. An important factor in the study of this alloy was the addition of 0.07 wt% (700 ppm) boron, increasing hardenability, resistance to creep and stabilizing the grain boundaries of this league. The current research is part of a study for the development of new alloys from the composition of commercial superferritic steels, in order to enhances them to be used in equipment such as heat exchangers and distillation towers operating in extreme temperature conditions, pressure and in environments containing high concentrations of chlorides, H₂S and CO₂, which are found in the new areas of oil and gas exploration off the Brazilian coast. The effect of boron on the microstructure was studied by tensile tests comparing two different manufacturing methods, casting and spin.

KEYWORDS: Superferritic, boron, tensile testing.

INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis são ligas metálicas baseadas nos sistemas ferro-cromo, e ferro-cromo-níquel, mas podem conter adições de outros elementos de liga tais como molibdênio, manganês, silício, cobre, titânio, nióbio, vanádio e nitrogênio, que alteram as suas microestruturas e propriedades. De acordo com a microestrutura, os aços inoxidáveis podem ser classificados como austeníticos, ferríticos, duplex (ferríticos-austeníticos), martensíticos e aços endurecíveis por precipitação. Os aços inoxidáveis ferríticos são largamente utilizados na indústria, principalmente em ambientes com presença de cloretos, tais como: indústria química, petroquímica, geração de energia, bombas, implantes e instrumentos cirúrgicos em geral, além de uma infinidade de outros produtos de uso doméstico e comercial. Estes aços possuem boas propriedades mecânicas e boa resistência à corrosão (SMITH, 1993) por conter elementos como Cr, Mo e N que são conhecidos por promoverem resistência à corrosão por pites na presença de cloretos (JANIKOWSKI e BLESSMAN, 2008) (NEGREIROS et al., 2008).

Na indústria do petróleo e gás há inúmeras etapas para o processamento do petróleo bruto. Durante o processo de refino, quanto mais pesado for o petróleo, maiores temperaturas serão utilizadas para a sua destilação, o que provocará uma maior corrosão das tubulações, trocadores de calor, outros equipamentos e partes estruturais. Procurando diminuir a ocorrência destes problemas, a busca por novos materiais que tenham um melhor desempenho em ambientes muito agressivos em relação a corrosão, alta temperatura e alta pressão é um constante desafio e têm motivado estudos mais aprofundados na aplicação de elementos de liga para a fabricação de equipamentos utilizados na indústria do petróleo e gás. Buscando novas alternativas de elementos de liga que promovam o aumento da resistência mecânica aplicados em ambientes que possuem condições extremas de temperatura, pressão e meios corrosivos, foi estudado ao longo desta pesquisa o efeito da adição de 0,07% de boro em uma liga experimental contendo 25,7% de Cr, 4,6% de Mo, 4,4% de Ni. O efeito do boro na microestrutura será relacionado com as possíveis alterações das propriedades mecânicas. Tal estudo é de suma importância, pois tais efeitos são escassos na literatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo deste trabalho foi uma liga modelo Fe-Cr-Mo-Ni com baixo teor de carbono, alto cromo (25,7%), 4,6% de molibdênio, 4,4% de níquel e 0,07% de B, que são maiores do que as ligas comerciais de aço inoxidável superferrítico encontradas no mercado.

A liga foi fundida na empresa FAI (Fundição de Aço Inox) e foram obtidos três lingotes de aços inoxidáveis superferríticos de seção quadrada com dimensões de 100 x 100 x 400 mm, confeccionados em fornos de indução elétricos. Amostras desses lingotes foram previamente analisadas por espectroscopia de emissão óptica, na própria FAI e depois confirmadas com a análise química no espectrômetro de emissão óptica SHIMADZU PDA7000 disponível no LACAM (Laboratório de Caracterização dos Materiais).

Na Figura 1 pode-se observar o lingote com boro da liga modelo de aço inoxidável superferrítico, na condição como recebido (CR), para ser cortado na mesa da serra de fita horizontal com fluido de refrigeração disponível no Laboratório de Materiais da Engenharia Mecânica da UNIFOR.

Figura 1. Lingotes fundidos da liga modelo de aço inoxidável superferrítico com boro (LSFB).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 1 é apresentada a composição química em percentual em massa, fornecida pela FAI a denominação da liga modelo de aço inoxidável superferrítico com boro analisada neste trabalho. A composição de boro foi fornecida pela empresa FAI.

Tabela 1. Composição química da liga modelo de aço inoxidável superferrítico (% em massa).

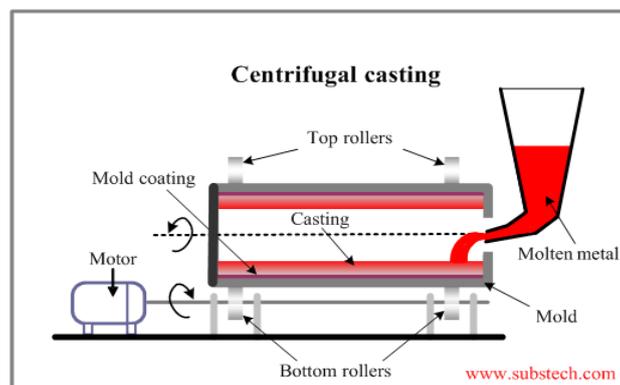
Liga	Cr	Mo	Ni	C	Mn	Si	B	Fe
LSFB	25,7	4,6	4,4	0,02	0,48	0,6	0,07	Equil.

Fonte: Fabricante - Fundição de Aço Inox

O Processo de fundição centrífuga foi invenção de Alfred Krupp , que foi muito usada para a fabricação de aço fundido para rodas ferroviárias em 1852. A ideia de utilizar a força centrífuga para fazer peças fundidas tinham sido conhecidos durante muito tempo, foi patente original AG Eckhardt de 1809 que revelou a compreensão dos princípios básicos envolvidos.

O processo de centrifugação de metais caracteriza-se por vaziar o metal líquido em um molde que esta girando em elevada velocidade de rotação, e com o auxílio da força centrífuga, este metal ao entrar em rotação junto com o molde, conseguindo assim formar uma peça metálica, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2. Processo de centrifugação.



Fonte: <http://www.substech.com>.

Este método foi adaptado especificamente para a produção de peças cilíndricas e elimina a necessidade de portas, tirantes e núcleos. A velocidade de rotação e velocidade de metal varia com o vazamento da liga e do tamanho e forma de ser fundido. A força centrífuga melhora a consistência de alimentação e enchimento atingindo detalhes da superfície.

Em razão de se tratar de um processo que tem como característica principal a expulsão do metal (“para fora do centro”) com o metal ainda líquido, a solidificação e contração se dão de forma rápida e homogênea, sempre de fora para dentro. Com isso o resultado é um material de acordo com as características mecânicas exigidas e isento das porosidades ou gases normalmente encontrados em materiais fundidos estaticamente.

Figura 3. Exemplo de estrutura do material centrifugado (isento de porosidades e pouco sobremetal)..

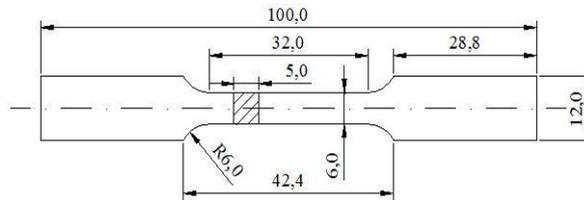


Fonte: <http://www.fvtecnologia.com.br>

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram preparados oito corpos de provas, quatro amostras de cada condição. Os corpos de prova de seção retangular foram usinados para realização de ensaios de tração a temperatura ambiente, de acordo com a norma NBR 6152 e ASTM E8/E8M – 13a, com geometria e dimensões reduzidas com 5 x 12x 100 mm, conforme apresentada na Figura 4 e Figura 5 (ASTM, 2013).

Figura 4. Dimensões dos corpos de prova reduzidos para os ensaios de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5. Corpos de prova reduzidos para os ensaios de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios de tração foram realizados nas amostras fabricados pelo método de fundição e centrifugação no Laboratório de Materiais da Engenharia Mecânica da UNIFOR numa máquina universal de ensaios *INSTRON* modelo 4484, mostrada na Figura 6. Os ensaios foram realizados a uma velocidade (deslocamento do travessão) de 1 mm/minuto a uma temperatura média de 25°C.

Nos ensaios de tração, mede-se a variação do comprimento em função da carga aplicada e como resultando obtém se um gráfico relacionando a carga em função do alongamento resultante. A uniformidade da deformação permite obter informações mais precisas da variação de comprimento em função da tensão aplicada e é representada graficamente por meio da curva tensão versus deformação.

Figura 6. Máquina Universal de Ensaios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2. Resultados para as amostras de lingote fundidas.

Corpo de prova	Limite de resistência a tração (MPa)	Deformação Específica (mm/mm)	Limite de escoamento (MPa)	Deformação na tensão máxima (MPa)	Tensão na ruptura (mm/mm)	Módulo de elasticidade (MPa)
L1	455.019	0.030	215.814	455.019	0.030	30646.047
L2	394.641	0.024	200.210	394.641	0.024	30447.244
L3	432.062	0.027	194.546	432.062	0.027	29595.338
L4	525.099	0.035	218.149	525.099	0.035	30462.420

Tabela 3. Resultados para as amostras do tubo centrifugado.

Corpo de prova	Limite de resistência a tração (MPa)	Deformação Específica (mm/mm)	Limite de escoamento (MPa)	Deformação na tensão máxima (MPa)	Tensão na ruptura (mm/mm)	Módulo de elasticidade (MPa)
T1	230.006	0.011	196.279	230.006	0.011	28754.652
T2	266.573	0.013	200.339	266.573	0.013	29138.922
T3	-	-	-	-	-	-
T4	427.502	0.029	196.735	427.502	0.029	29841.066

Na Figura 7 são apresentados os corpos de prova ensaiados das amostras fundidas. Nos resultados obtidos para as amostras de lingote fundidas, verifica-se que, em média, a amostra possui resistência a tração de 451.71MPa, valor que está de acordo com a teoria. Apesar do corpo de prova L4 ter sofrido maior tensão de ruptura, indicando que se deformou pouco, comportando-se como um material frágil. Isso aconteceu devido alguma imperfeição superficial, conhecido como trincas, ou por alguma impureza que foi adquirida no processo de fundição e que afetou as essa amostra. Nos resultados obtidos para as amostras do tubo centrifugado, verifica-se que, em média, a amostra possui resistência a tração de 308.0271MPa. A amostra T3 rompeu fora da área útil, por esse motivo foi descartada. Apesar do corpo de prova T4 ter sofrido maior tensão de ruptura, indicando que se deformou pouco, comportando-se como um material frágil, provavelmente ocasionado por alguma imperfeição ocorrida no processo de centrifugação.

Figura 7. Corpos de prova ensaiados das amostras fundidas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

CONCLUSÃO

Com os estudos levantados para a elaboração desta pesquisa, as amostras fabricadas pelo método de fundição se apresentaram mais satisfatórias nos ensaios de tração realizados, mas ainda não nos confere a melhor escolha, tendo em vista que outros ensaios são necessários para uma caracterização do material. Os ensaios de resistência à tração comportaram-se de forma inesperada, pois de acordo com a literatura, o boro inserido pelo método de centrifugação deveria apresentar resistências mecânicas mais elevadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Materiais da Engenharia Mecânica da UNIFOR.

REFERÊNCIAS

- Negreiros, Y. S. et al. Efeito do teor de Mo na resistência a corrosão de ligas FeCrMo. In: CBCiMat 18: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas. p.11, 2008.
- Janikowski, D.; Blesman, E. Super-ferritic Stainless Steels –The Cost Effective Answer for Heat Transfer Tubing. In: Corrosion Conference, 2008: NACE International, New Orleans. New Orleans: NACE International, 2008.
- Smith, W. F. Structure and Properties of Engineering Alloys. 2ª.ed. Ed. Mc.Graw-Hill, 288-303 p., 1993.