



RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE AÇOS INOXIDÁVEIS CONFORMADOS POR SPRAY¹

Leamar Guedes Beraldo²
 Leandro Zanardo Belloto³
 Conrado Ramos Moreira Afonso⁴
 Claudemiro Bolfarini⁴

Resumo

O presente trabalho investigou a microestrutura e a resistência ao desgaste de dois aços inoxidáveis, o ferrítico-AIF com 27% de Cr e o superduplex-SDM modificado com boro (3,5% p), conformados por *spray*. A solidificação rápida promovida por esse processo resulta na formação de uma nova estrutura com grãos refinados e fases metaestáveis. Os depósitos, pesando aproximadamente 3,5 kg, foram caracterizados pela combinação de microscopia eletrônica de varredura (MEV), dureza e resistência ao desgaste, conforme a norma ASTM G65-07. Os depósitos de AIF e SDM apresentam microestrutura mais refinada e maior dureza em relação aos materiais obtidos por fundição convencional. A resistência ao desgaste do SDM é maior do que os materiais tabelados na norma ASTM G65-07, ou seja, aço ferramenta AISI D2 e Stellite 1016, enquanto o AIF apresenta um valor intermediário entre esses dois materiais. A adição de boro no SDM é associada à formação de boretos e leva a um aumento na dureza e na resistência ao desgaste desse material conformado por *spray*.

Palavras-chave: Conformação por *spray*; Aços inoxidáveis; Desgaste.

WEAR RESISTANCE OF SPRAY FORMED STAINLESS STEELS

Abstract

The present work investigates the microstructure and the wear resistance of two stainless steels, the ferritic-AIF with 27% Cr and the superduplex-SDM modified with boron (3.5% p), spray formed. The rapid solidification promoted by this process has resulted in the formation of a new structure with refined grains and metastable phases. The deposits, weighing about 3.5 kg, were characterized by combination of scanning electron microscopy (SEM), hardness and wear resistance according to ASTM G65-07. The deposits of AIF and SDM show more refined microstructure and higher hardness in respect to materials produced by conventional casting. The wear resistance of the SDM is higher than the materials tabulated in ASTM G65-07, namely, AISI D2 tool steel and Stellite 1016, while the AIF presents an intermediary value between these two materials. The addition of boron to the SDM is associated with the formation of borides and led to an increase in the hardness and wear resistance of this spray formed material.

Key-words: Spray forming; Stainless steel; Wear.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Mestrando em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

³ Graduando em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

⁴ Professor Doutor da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).



1 INTRODUÇÃO

A resistência ao desgaste abrasivo, nas atividades ligadas à produção de óleo e gás, é um dos requisitos mais importantes para o projeto e seleção de materiais para aplicação em diversos componentes da área de exploração e produção de petróleo. De acordo com Barbosa, Vaz e Plácido,⁽¹⁾ na indústria de petróleo, o desgaste abrasivo nos tubos de perfuração pode comprometer a integridade estrutural dos mesmos, paralisando as atividades para substituição ou, em caso de rompimento, ocasionar uma provável contaminação do meio ambiente (fundo do oceano) por parte dos fluidos de perfuração.

Segundo Souza e Acsegrad,⁽²⁾ novos materiais são desenvolvidos na busca de uma maior resistência ao desgaste, assim como novas técnicas para a aplicações em superfícies sujeitas ao desgaste. Existem aproximadamente, 80 metais puros, podendo-se obter, com boa parte deles, aproximadamente 40.000 ligas metálicas, cada uma apresentando diferentes propriedades e, naturalmente, diferentes custos. O material ideal será aquele que apresentar as propriedades desejadas e com o menor custo possível.

Blickensderfer⁽³⁾ afirma que, devido à complexidade dos fenômenos de desgaste, foram criados vários dispositivos de ensaio para reproduzir configurações particulares de desgaste. Conforme Silva,⁽⁴⁾ os ensaios mais utilizados para estudo do desgaste são o ensaio tipo roda de borracha e o ensaio tipo pino sobre disco. Esses ensaios são normatizados pela ASTM, com as designações ASTM G 65-04⁽⁵⁾ e ASTM G 99-05, respectivamente.

Para Searson, Nagaskar e Latanision,⁽⁷⁾ as ligas metálicas amorfas constituem uma nova classe de materiais em virtude de suas propriedades mecânicas, magnéticas, elétricas, catalíticas e de resistência à corrosão. Devido a essas propriedades, consequência da estrutura homogênea, as ligas amorfas exibem um comportamento diferenciado das ligas cristalinas. Esses materiais com estruturas amorfas, conhecidos também como vidros metálicos, segundo Bonavina,⁽⁸⁾ apresentam resistência mecânica elevadíssima em compressão e dureza acima de 1.000 HV, similar àquela dos carbonetos duros dos materiais convencionais, em uma estrutura homogênea. Este tipo de estrutura apresenta uma série de vantagens quando em contato com o meio abrasivo, apresentando uma resposta uniforme a esse meio, o que implica em menor desgaste do material. Nosso grupo de pesquisa tem se dedicado ao estudo desses materiais e de outros com estruturas cristalinas metaestáveis com elevadas dureza, resistência mecânica e ao desgaste.

Um trabalho bastante importante publicado por Afonso et al.⁽⁹⁾ com a liga $Fe_{63}Nb_{10}Al_4Si_3B_{20}$, reporta a obtenção de um depósito conformado por *spray*, no qual em uma região periférica, com aproximadamente 1,0 mm de espessura, foi verificado uma quantidade de fase amorfa de cerca de 68%v. Mais recentemente um artigo de revisão de Kiminami, Botta e Bolfarini⁽¹⁰⁾ mostra que é possível a obtenção de até 4 mm de espessura amorfa por conformação por *spray* de ligas à base de ferro, com dureza e resistência mecânica muito elevadas. Em adição, quando essas ligas formadoras de estrutura amorfa se cristalizam, produzem microestruturas com dureza elevadíssima e alta resistência ao desgaste.

Mais recentemente, foi estudada uma liga $Fe_{66}B_{30}Nb_4Ti$ que, quando conformada por *spray*, apesar de não formar estrutura amorfa no depósito, apresentou uma dureza muito elevada, acima de 850HV e elevada resistência ao desgaste.⁽¹¹⁾ Estes resultados incentivam ao estudo do potencial do processo de conformação por *spray* na obtenção de materiais com estruturas metaestáveis com composições à base de

ferro, no sentido de reduzir custos e apresentar materiais competitivos em nível industrial, com enorme potencial para aplicação na indústria de petróleo.

Dentro deste contexto, este trabalho visa o estudo da dureza e da resistência ao desgaste de dois aços inoxidáveis (aço superduplex, modificado com boro-SDM, e aço ferrítico, com 27% de cromo-AIF), para serem utilizados como revestimento. As ligas são processadas por conformação por spray, no equipamento do grupo de pesquisa da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), em funcionamento rotineiro no Laboratório de Fundição (LabFun) do DEMA.

Neste trabalho são avaliadas, também, as respectivas microestruturas, dureza, bem como as características de resistência ao desgaste das ligas obtidas. Para a avaliação da resistência ao desgaste foi utilizado o ensaio tipo roda de borracha, equipamento pertencente ao Laboratório de Soldagem do DEMA.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais pesquisados para o estudo da resistência ao desgaste abrasivo foram baseados nas normas de dois materiais fundidos conhecidos: o aço ferrítico, normatizado pela norma **DIN 1.4136 – G-X70 Cr Mo 29-2**⁽¹²⁾ e o aço inoxidável superduplex, normatizado conforme a norma ASTM A890 / A890M Grau 6A.⁽¹³⁾ Com relação ao segundo material, a liga estudada neste trabalho foi modificada, apresentando, além do boro uma concentração maior de carbono.

As composições químicas dos aços usados como base dessa pesquisa encontram-se detalhadas na Tabela 1. Quando não indicada a faixa, deve-se considerar o valor da porcentagem como máxima.

Tabela 1. Composições químicas dos aços utilizados na pesquisa (% massa)

MATERIAL	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%N
G-X70CrMo29-2	0,5 - 0,9	1,00	2,00	27,0 - 30,0	0	2,0 - 2,5	0
A890 Grau 6A	0,03	1,00	1,00	24,0 - 26,0	3,0-4,0	3,0 - 4,0	0,2 - 0,3

Para facilitar a apresentação, a partir deste momento, os aços inoxidáveis obtidos, são descritos como: AIF (para o aço inoxidável ferrítico) e SDM (para o aço inoxidável superduplex modificado com boro).

Os depósitos obtidos por conformação por *spray* foram caracterizados pelas técnicas de análise química, microscopia eletrônica de varredura (MEV), dureza e microdureza.

Dos depósitos também foram retirados corpos de prova para a realização do ensaio de desgaste no abrasômetro tipo roda de borracha. Os materiais (AIF e SDM) foram fundidos por aquecimento indutivo em um cadinho revestido com refratário sílico-aluminoso, possuindo uma fonte de energia de 50 kW de potência e frequência de 3.200 Hz. Após a fusão destes aços, o cadinho do forno utilizado foi adequadamente alojado acima da câmara de atomização do equipamento de conformação por *spray*. A conformação por *spray* foi realizada com temperatura de vazamento de 1.700 °C, usando nitrogênio como gás de atomização. A Figura 1 ilustra esquematicamente o processo de conformação por *spray*.⁽¹⁴⁾

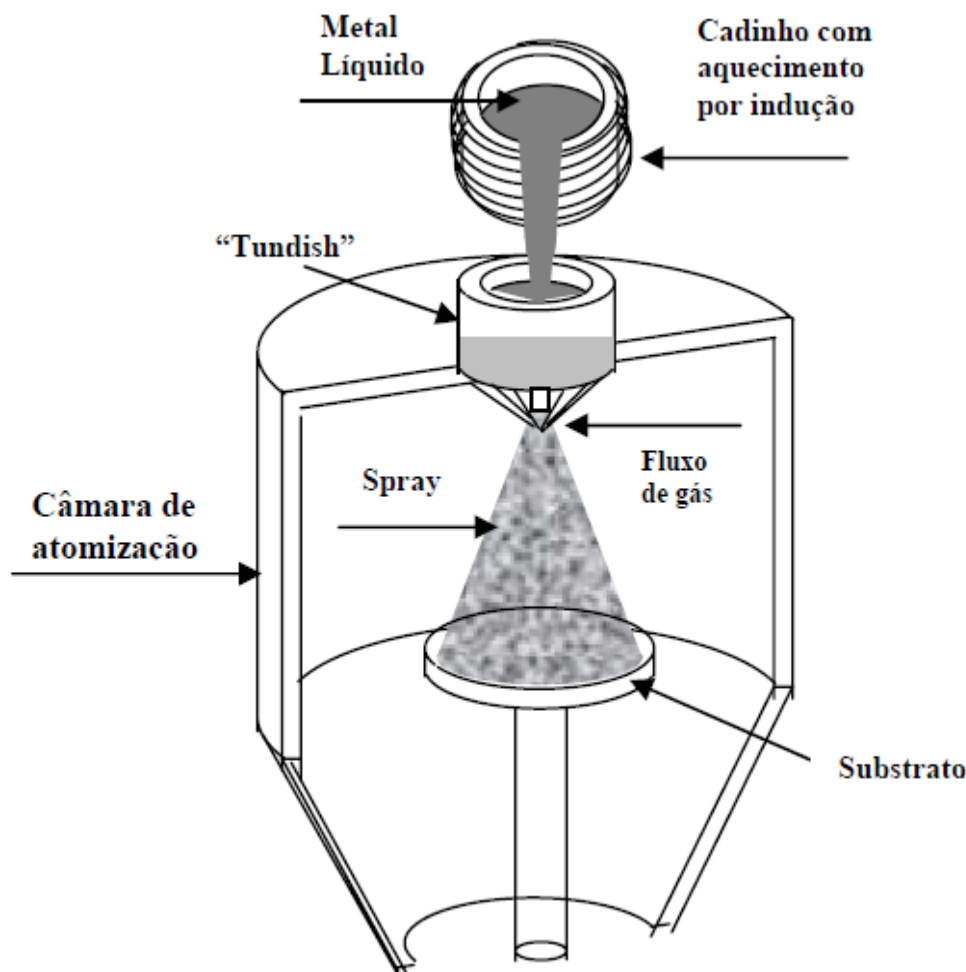


Figura 1. Ilustração do processo de conformação por spray.

Para o ensaio de desgaste foi utilizado um equipamento tipo roda de borracha pertencente ao Laboratório de Soldagem da UFSCar e parâmetros de ensaios conforme o procedimento A da norma ASTM G65-04,⁽⁵⁾ ou seja: carga de 130 N, areia tipo AFS 50/70 com vazão de 350 g/min, velocidade da roda de borracha de 200 ± 10 RPM e tempo de ensaio aproximado de 30 minutos.

As amostras para a realização do ensaio de desgaste foram obtidas dos depósitos do AFI e do SDM. As dimensões finais das amostras ficaram na faixa padronizada pela norma ASTM G65-04,⁽⁵⁾ ou seja, comprimento de 76,0 mm, largura de 25,0 mm e espessura variando entre 3,2 e 12,7 mm.

A norma ASTM G65-04⁽⁵⁾ também padroniza que os resultados de resistência ao desgaste abrasivo sejam apresentados em termos de perda volumétrica.

A Figura 2 ilustra o ensaio de desgaste no equipamento tipo roda de borracha.⁽¹⁵⁾

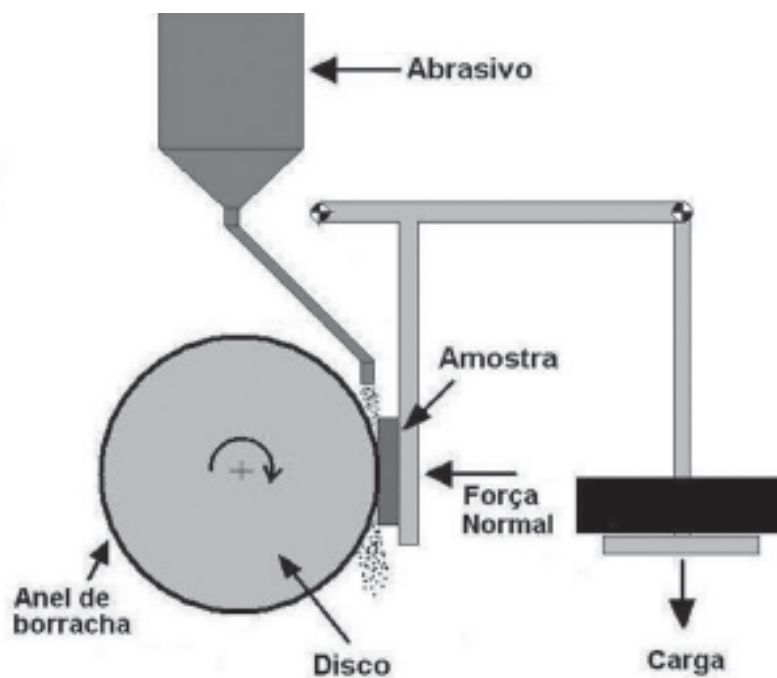


Figura 2. Ilustração do aparato de ensaio abrasivo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O depósito do AIF apresentou o formato próximo do gaussiano e teve as seguintes dimensões: diâmetro de 285,0 mm, espessura no centro do depósito igual a 19,6 mm e peso de 3,54 kg. Portanto, como a conformação por *spray* partiu de uma carga fria de 5,5 kg. O seu rendimento foi de 64,36%.

Já o depósito do SDM não apresentou o formato gaussiano, sendo que a espessura na borda cresceu rapidamente em direção ao centro. O depósito teve as seguintes dimensões: diâmetro de 252,0 mm, espessura no centro do depósito igual a 21,3 mm e peso de 3,65 kg. Portanto, como a conformação por *spray* partiu de uma carga fria de 5,6 kg. O seu rendimento foi de 68,75%.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise química dos depósitos dos AIF e SDM após a conformação por *spray*. Quando não indicada a faixa, deve-se considerar o valor da porcentagem como máxima.

Tabela 2. Composições químicas dos AIF e SDM após a conformação por *spray* (% massa)

Material	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%B
AIF	0,92	0,3	1,1	26,7	0,2	2,1	0,0	0,0
SDM	0,06	1,05	1,01	24,95	5,51	2,48	0,24	3,70

Analisando os valores da Tabela 2 e comparando-se com os valores da Tabela 1 pode-se perceber que as porcentagens em massa dos elementos químicos dos AIF e SDM estão dentro ou próximas das faixas desejadas.

É válido novamente ressaltar que o elemento boro não foi detectado pela espectrometria de absorção atômica e que o valor aqui apresentado é o resultado da composição da carga fria. Esse valor provavelmente é inferior ao valor da tabela, pois deve ser considerada a perda do elemento durante a fusão do material. No entanto, como se pode ver na apresentação dos resultados, é notória a presença do boro no SDM.

A Figura 3 mostra a fotomicrografia do depósito do AIF, após a conformação por *spray*. Essas fotomicrografias foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no modo de elétrons retroespalhados (BSE), em duas magnitudes de aumento – 500x (A) e 2.000x (B). As fases foram identificadas por espectrometria de dispersão de energia de raios X (EDS).

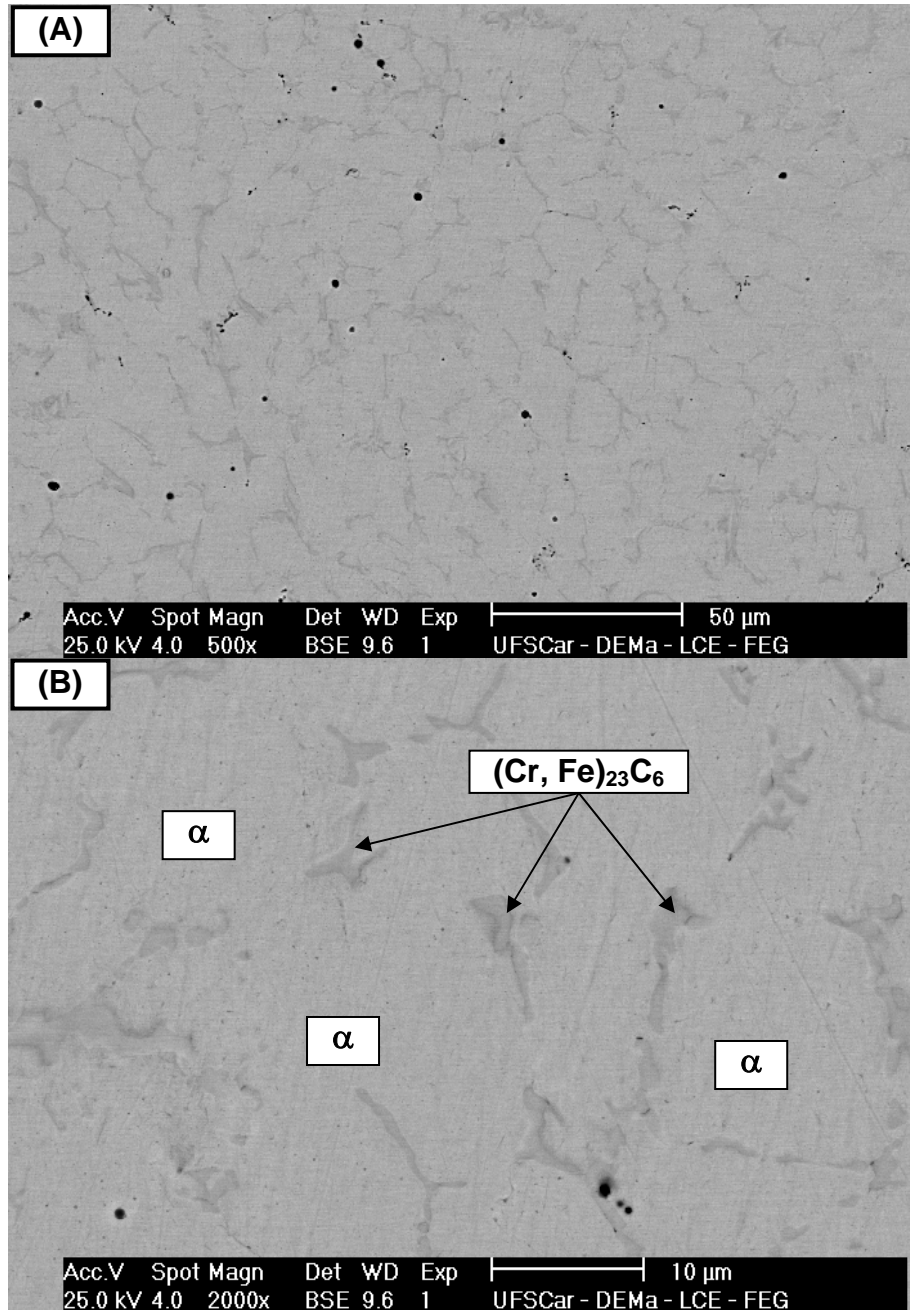


Figura 3. Fotomicrografias obtidas pela técnica MEV do depósito do AIF com aumento de 500x (A) e com aumento de 2.000x (B), detalhando as fases presentes no depósito.

Pode-se visualizar, nas fotomicrografias da Figura 3, que o depósito de AIF, apresenta microestrutura dendrítica de ferrita (α) rica em cromo e carbonetos de cromo eutéticos ($Cr_{23}C_6$), precipitados entre as dendritas. Devido aos teores elevados de carbono e cromo (0,9% e 26,7% em massa) presentes nesse material, eles foram segregados durante a solidificação para as regiões interdendríticas, formando os carbonetos complexos contendo cromo e ferro, no final da solidificação.

A Figura 4 mostra a fotomicrografia do depósito do AIF, após a conformação por spray. Estas fotomicrografias foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no modo de elétrons retroespalhados (BSE), em duas magnitudes de aumento – 500x (A) e 2.000x (B). As fases foram identificadas por espectrometria de dispersão de energia de raios X (EDS).

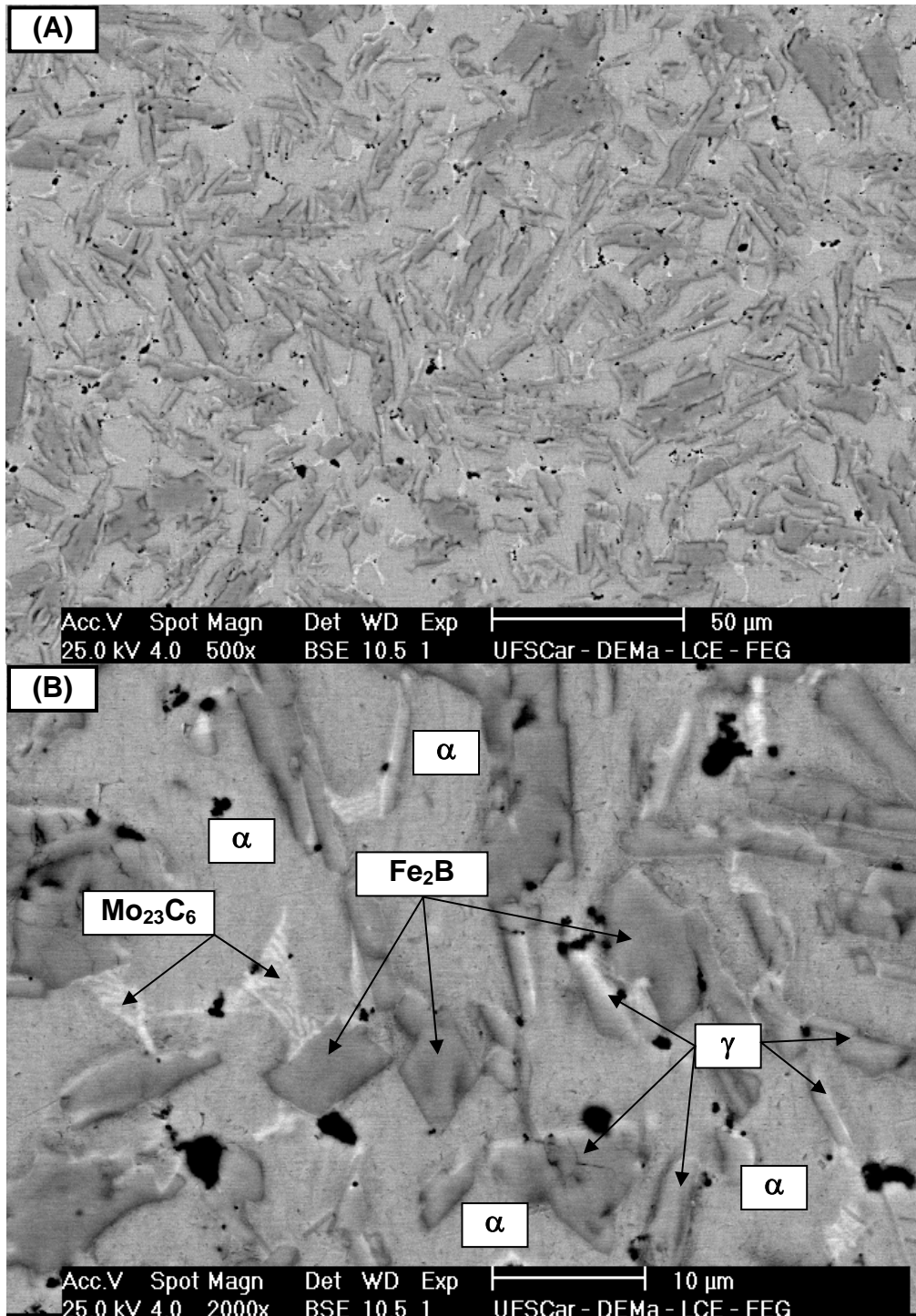


Figura 4. Fotomicrografias obtidas pela técnica MEV do depósito do SDM com aumento de 500x (A) e com aumento de 2.000x (B), detalhando as fases presentes no depósito.

Na Figura 4 são mostradas as fotomicrografias do depósito do SDM. Nestas fotomicrografias podem ser distinguidas quatro fases diferentes: matriz ferrítica (α)

rica em cromo, fase austenítica (γ) rica em níquel, boreto de ferro (Fe_2B) e carboneto de molibdênio (Mo_{23}C_6). Essa microestrutura diferencia-se de um duplex comum (composta por uma microestrutura bifásica ferrita/austenita) devido à presença do boro (3,7% em massa) que levou à formação dos boretos (fase mais escura e facetada) que muitas vezes aparece acoplada à austenita. A fase austenítica, como pode ser notada na Figura 3, apresenta uma tonalidade intermediária entre a matriz ferrítica e os boretos, sendo menos facetada que os boretos. Os boretos, devido à sua elevada dureza, apresentam-se com as arestas facetadas típico de um eutético divorciado. Por último, a fase mais clara e rendilhada é o carboneto de molibdênio (Mo_{23}C_6).

As medidas de dureza Rockwell dos depósitos foram realizadas em cinco pontos, conforme prescreve a norma ASTM E18-08⁽¹⁶⁾ com carga máxima de 150 kgf, carga mínima de 10kgf e penetrador tipo cone de diamante. As medidas de microdureza Vickers foram realizadas em cinco pontos dos depósitos, conforme prescreve a norma ASTM E384-10, com carga de 0,5 kgf. A média dos valores de dureza Rockwell C medidos nos depósitos dos aços inoxidáveis AIF e SDM foram de 23 HRC e 47 HRC, respectivamente. As médias dos valores de microdureza Vickers foram de 293 $\text{HV}_{0,5}$ e 529 $\text{HV}_{0,5}$, respectivamente.

Como comparação dos valores de dureza Rockwell (HRC), para o aço inoxidável AIF a literatura reporta, na condição solubilizada, valores entre 26 e 32 HRC.⁽¹⁷⁾ Já para o aço inoxidável superduplex, a literatura reporta apenas 23 HRC, na condição solubilizada e sem a adição de boro.⁽¹⁸⁾

Além da microdureza Vickers com carga de 0,5 kgf, no depósito de SDM, também foram realizadas indentações com cargas de 0,05 kgf. De modo a comparar os diferentes valores obtidos nesse ensaio, são apresentadas nas duas fotomicrografias 5(A) e 5(B) as indentações, obtidas nas mesmas condições de ensaio, realizadas nas duas diferentes fases do depósito de SDM – matriz ferrítica e boretos.

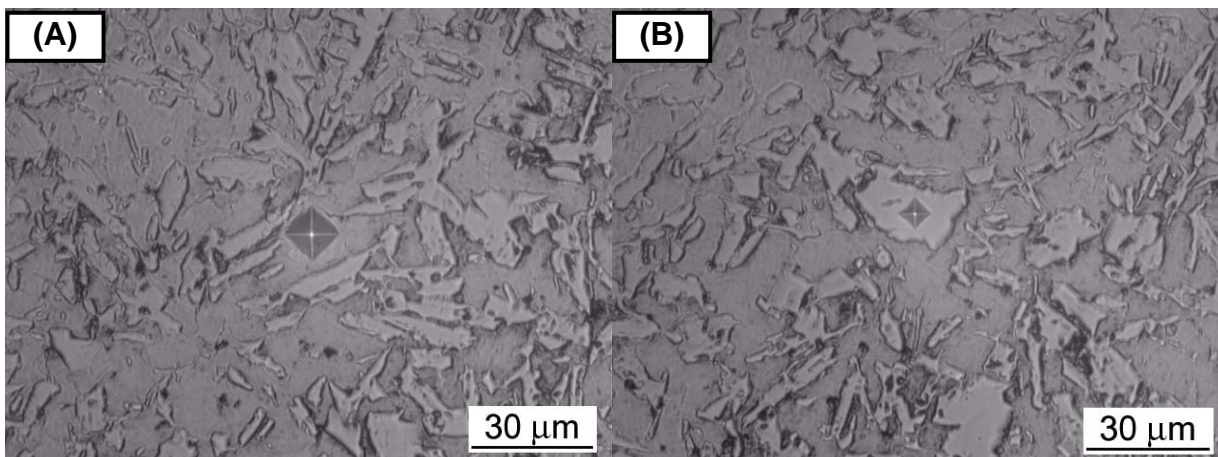


Figura 5. Fotomicrografias das indentações de microdureza Vickers (0,05 kgf) da matriz ferrítica (A) e dos boretos (B), obtidas nas mesmas condições de ensaio.

Ao analisar as fotomicrografias da Figura 5, nota-se que a indentação nos boretos é menor que a indentação na matriz. Isto era esperado, pois como o valor do ensaio de microdureza é inversamente proporcional ao tamanho da indentação, a indentação no material mais duro (boretos) (Figura 4B) é menor que a indentação na matriz ferrítica (Figura 4 A), resultando em durezas de 905 $\text{HV}_{0,05}$ e 511 $\text{HV}_{0,05}$, respectivamente.

O valor de 511 HV_{0,05} é bem próximo do obtido com a carga maior: 529 HV_{0,5}, o que significa que a medida feita com a carga maior não detectou a influência dos boretos. Provavelmente, na medida feita com a carga maior, que envolve uma região mais abrangente do material, incluindo a matriz e os boretos, o material abaixo do boreto deforma-se e não reflete a sua dureza. No entanto, a presença desses boretos de alta dureza, representa um papel fundamental na resistência ao desgaste abrasivo do material, mostrando que a medida da dureza em si não é, isoladamente, um fator determinante da resistência ao desgaste do material.

Os valores de perda volumétrica (em mm³) e também os valores de dureza (HRC) para os materiais estudados (AIF e SDM) são apresentados no gráfico da Figura 6. Ainda no gráfico da Figura 6, os valores de perda volumétrica (em mm³) e de dureza (HRC) dos materiais estudados são comparados com materiais da Tabela X-1.2 da norma ASTM G65-04.⁽⁵⁾

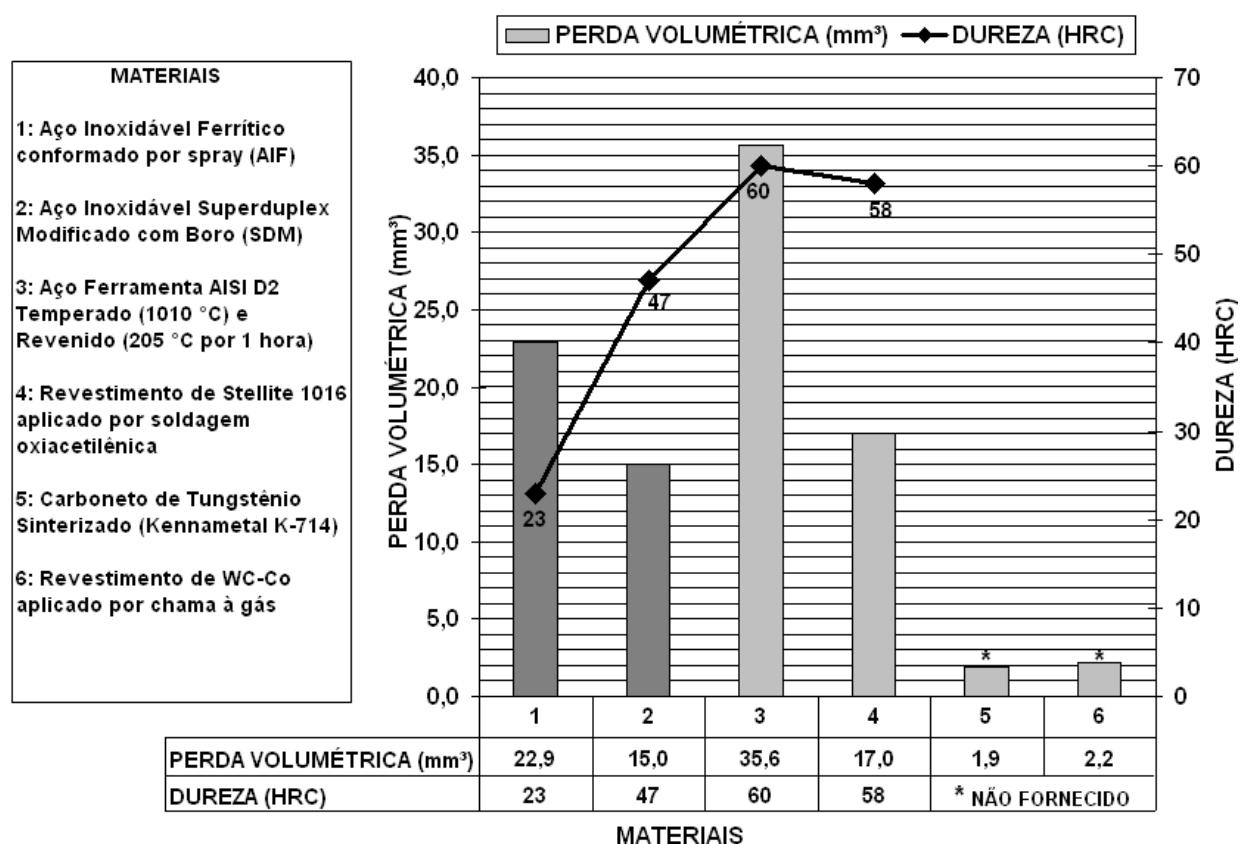


Figura 6. Valores de dureza e de perda volumétrica para diferentes materiais de acordo com a norma ASTM G65-07.⁽⁵⁾

Analisando-se o gráfico da Figura 6 para o depósito do AIF, nota-se que, apesar da dureza relativamente baixa (23 HRC), o depósito do AIF teve uma ótima resistência ao desgaste (perda volumétrica igual a 22,9 mm³). Este número pode ser considerado muito bom, admitindo-se que o material para aço ferramenta AISI D2 (temperado e revenido), apresenta, apesar da elevada dureza (60 HRC), uma perda volumétrica 55,5% maior que o AIF.

Para o depósito do SDM, ao analisar o gráfico da figura 6, nota-se a excelente resistência ao desgaste desse material (perda volumétrica igual a 15,0 mm³), e a sua elevada dureza (47 HRC). Esse aumento na dureza deve-se principalmente à adição



de boro. Quando comparado ao Stellite 1016 aplicado por soldagem oxiacetilênica (dureza de 58 HRC), percebe-se a ótima resistência ao desgaste do SDM, pois a perda volumétrica do Stellite 1016 é 13,33% maior que a perda volumétrica do SDM. Isto deve ser exaltado, pois o custo para a produção dos dois materiais é muito diferente, sendo o custo do Stellite 1016, muito maior que o custo do SDM.

Por último deve-se ressaltar que as matrizes do AIF (ferrita) e SDM (ferrita/austenita), por serem extremamente tenazes, favoreceram o aumento da resistência ao desgaste. Isso vai ao encontro dos resultados obtidos por Croopnick & Johnson e Croopnick,⁽¹⁹⁾ em que o fácil desgaste de revestimentos compostos por carbonetos se deu devido às partículas de metais duros não disporem de uma matriz tenaz para ancorá-las, e essas partículas atuarem como um abrasivo, desgastando mais facilmente esses revestimentos.

Kasama, Kiminami e Bolfarini,⁽¹⁵⁾ por sua vez, comparam a diferença entre a resistência ao desgaste de ferros fundidos de dureza semelhante e constata que materiais com matrizes mais tenazes são mais resistentes ao desgaste, pois resistem melhor ao desprendimento dos carbonetos M_7C_3 .

A Figura 6 também apresenta, para comparação, os valores de perda volumétrica de dois materiais utilizados em engenharia para serviços onde o desgaste é extremamente severo. Esses materiais, apesar dos ótimos valores de resistência ao desgaste, apresentam dificuldade de processamento e elevados custo de produção.

4 CONCLUSÃO

A adição do boro ao aço inoxidável superduplex representa uma alternativa viável para aumentar significativamente a dureza e a resistência ao desgaste desse material, devido a uma microestrutura formada por boretos ancorados em uma matriz ferrítica/austenítica de alta tenacidade. Este material, conformado por *spray*, apresenta uma resistência ao desgaste superior à liga Stellite1016 e ao aço ferramenta AISI D2.

Da mesma maneira, o aço inoxidável ferrítico, quando processado por conformação por *spray*, mesmo apresentando uma dureza significativamente inferior ao aço ferramenta AISI D2, apresenta uma resistência ao desgaste superior, devido à presença de carbonetos complexos de cromo e ferro presentes na microestrutura.

Agradecimentos

À FAPESP pelo apoio financeiro representado no Projeto Temático: “Propriedades de ligas metálicas amorfas metastáveis e nano-estruturadas”.

REFERÊNCIAS

- 1 BARBOSA, R. L.; VAZ, M.A.; PLÁCIDO; J.C.R. Análise de forças de contato e desgaste interno em risers de perfuração. Boletim técnico de Produção de Petróleo da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 2, n° 1 (2007). p. 49-63.
- 2 SOUZA, A.R.; ACSELRAD, O. Uma primeira avaliação do desgaste abrasivo de um aço austenítico de altos teores de Mn e Al. Programa de Recursos Humanos, Agência Nacional do Petróleo. (2006). p.51-52.
- 3 BLICKENSDEFER, R. Design criteria and correlations factors for field wear testing, Wear, 122, (1988) p. 165-182.
- 4 SILVA, G. N. Efeito da substituição do molibdênio pelo nióbio e nióbio boro em aços hadfield no desempenho em desgaste abrasivo. 99 p., 2004. Dissertação (Mestrado em



- Engenharia de Materiais). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- 5 ASTM INTERNATIONAL. ASTM G-65 – 04: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/ rubber. wheel apparatus. West Conshohocken, PA, 2010.
 - 6 ASTM INTERNATIONAL. ASTM G 99-05: Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. West Conshohocken, PA,
 - 7 SEARSON, P. C.; NAGASKAR, P. V.; LATANISION, R. M. Modern aspects of electrochemistry. New York: Plenum Press (1990). p.121-161.
 - 8 BONAVINA, L. F. Conformação por spray da liga formadora de fase amorfa Fe₆₆B₃₀Nb₄. 137 p., 2008. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
 - 9 AFONSO C. R. M.; KAUFMAN M. J.; BOLFARINI C.; BOTTA FILHO W. J.; KIMINAMI C.S. Gas Atomization of Nanocrystalline Fe₆₃Nb₁₀Al₄Si₃B₂₀ Alloy. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, v.20-21 (2004) p.175-182.
 - 10 KIMINAMI, C. S.; BOTTA, W. J.; BOLFARINI, C. Processing of glass former alloys by spray forming. Herstellung von Legierungen für Glasformen durch Sprühkompaktieren. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , v. 41, p. 513-523, 2010.
 - 11 CATTO, F. L.; YONAMINEC, T.; KIMINAMI, C. S.; AFONSO C. R. M.; BOTTA, W. J.; BOLFARINI, C. Amorphous phase formation by spray forming of alloys [(Fe_{0.6}Co_{0.4})_{0.75}B_{0.2}Si_{0.05}]₉₆Nb₄ and Fe₆₆B₃₀Nb₄ modified with Ti. Journal of Alloys and Compounds, 2011. No prelo.
 - 12 DIN 1.4136.
 - 13 ASTM INTERNATIONAL. ASTM A890 / A890M - 10 Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel-Molybdenum Corrosion-Resistant, Duplex (Austenitic/Ferritic) for General Application. West Conshohocken, PA,
 - 14 LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira, Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol. 14, n°2, (2009) p.140-150.
 - 15 LEAL, V.S.; CACERES, J.A.S.; HUBLER, C.H.; KIMINAMI, C.S.; BOLFARINI, C. Estudo da Etapa de Atomização na Conformação por Spray de uma Liga Fe-6%Si. In: 13º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais (CBCIMAT), 12. Curitiba. Anais em CDROM, (1998). p.1687-1696.
 - 16 ASTM INTERNATIONAL. ASTM E18-08: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, 2008.
 - 17 WEGST, C.W. Stahlschlüssel, 16th Edition. 1992. p. 314. 12
 - 18 ROSSITTI, S. M. Efeito do nióbio na estrutura e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável super duplex fundido SEW410 W. Nr. 1.4517. São Carlos, 2000. 150p. Tese (Doutorado) - Área Interinidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.
 - 19 CROOPNICK, A. C.; JOHNSON W. Hardbanding halts deepwater wear. Hart's E & P Magazine, (2000). 4 p.
 - 20 KASAMA A. H., KIMINAMI, C.S., BOLFARINI,C. Microstructure and wear resistance of spray formed high chromium white cast iron. Materials Science and Engineering. v.375–377. p. 589–594, 2004.