OBTENÇÃO DE LIGAS INTERMETÁLICAS UTILIZANDO COMO BASE CAVACOS DE AÇO INOXIDÁVEL E SUCATA DE ALUMÍNIO VIA METALURGIA DO PÓ

Mendonça, E. S. ⁽¹⁾ (erick.rb7@gmail.com), Coelho, R. E. ⁽²⁾ (rodrigoecoelho@gmail.com), Carvalho, C.O. ⁽¹⁾
(cristiane.olv.carvalho@hotmail.com)

⁽¹⁾ Discente no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBa); DTMM-LCMM

⁽²⁾ Docente no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBa); DTMM-LCMM

RESUMO: *O objetivo deste trabalho foi a elaboração de materiais intermetálicos utilizando-se cavacos de aço inoxidável e latas recicláveis de alumínio. Inicialmente, os cavacos de aço foram usinados por torneamento a seco e as latas de alumínio picotadas com dimensões entre 5 e 10mm. Este material foi reduzido a pó pelo processo de moagem de alta energia em um moinho atritor do tipo horizontal, após atingir a granulometria desejada, foi realizada mistura por 10h pelo mesmo processo. Os pós resultantes da moagem foram compactados a temperatura ambiente, depois sinterizados a 950°C por 90 minutos, seguido de resfriamento lento dentro do próprio forno. Os pós da moagem e as amostras tratadas termicamente foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia por energia dispersiva e difração de raios X. Foram realizados também, nas amostras tratadas termicamente, ensaios de dureza e microdureza. Os resultados obtidos permitiram verificar a formação de fases intermetálicas de Fe-Al, que proporcionaram uma estrutura de excelentes propriedades mecânicas associado com leveza, ideal para uso em estruturas de sustentação metálicas em substituição ao aço A-36.*

PALAVRAS-CHAVE: *Metalurgia do Pó, Moagem de Alta Energia, Sinterização, Cavaco de Aço, Alumínio.*

OBTAINMENT OF INTERMETALLIC ALLOYS USING STAINLESS STEEL CHIPS AND ALUMINIUM SCRAPS AS BASE BY POWDER METALLURGY

ABSTRACT: *The objective of this work was the elaboration of intermetallic materials using steel chips and recyclable aluminum cans. Initially, the steel chips were machined by dry turning, and cut aluminum cans with dimensions between 5 and 10mm. This material was reduced to powder by high energy milling process in a horizontal type Mill, after achieving the desired granulometry, mixing was performed for 10 hours by the same process. The milling powders were compacted at room temperature, then sintered at 550°C for 90 minutes, followed by cooling inside the furnace itself. The grinding powders and the thermally treated samples were characterized by scanning electron microscopy, dispersive energy spectroscopy and X-ray diffraction. Hardness and microhardness tests were also carried out on thermally treated samples. The obtained results allowed to verify the formation of intermetallic phases of Fe-Al that provided a structure of excellent mechanical properties associated with lightness, ideal for use in metal support structures in place of A-36 steel.*

KEYWORDS: *Metallurgy, High Energy Milling, Sintering, Steel chips, Aluminium.*

1. INTRODUÇÃO

"O consumo é a única finalidade e o único propósito de toda a produção". (SMITH, 1976). Alinhada com esse pensamento, a economia mundial de predominância capitalista, definiu como objetivo aumentá-lo, porém isto é atrelado a um custo cuja nossa fonte de matéria prima não é capaz de pagar. O planeta terra possui recursos limitados, e seu uso gera enorme quantidade de resíduos.

Um dos maiores problemas do século XXI é a destinação de resíduos, sendo necessário gerenciar sua destinação e promover uma ampla educação ambiental. A reciclagem surge neste cenário como solução parcial, não somente para este impasse, mas também na saúde, otimização de recursos, estratégia política, redução de desmatamento, economia, emprego, renda e cidadania, como afirma Layrargues (2010) em seu trabalho "O cinismo da reciclagem".

Sendo o objetivo deste trabalho o desenvolvimento de ligas metálicas com base em reciclados de alumínio e aço inoxidável, ressaltam-se aqui os enormes ganhos da reutilização destes materiais, com ênfase especial ao alumínio. "Produtos de alumínio são ideais para reciclagem porque é muito mais barato reaproveitá-los do que fazer alumínio novo do minério de bauxita. A reciclagem requer menos de 5% da energia usada para fazer alumínio" (COSTA, 2007). A reciclagem do alumínio economiza etapas: o material é fundido e moldado novamente, eliminando a extração, refino e redução. Nesse sentido, a utilização do alumínio na fabricação de embalagens é crescente, o que torna a sua reciclagem de uma grandíssima relevância. A reciclagem de alumínio, hoje, é fundamental porque se tornou uma atividade econômica abrangente em todos os setores da sociedade. O alumínio por sua vez, tem características importantes que fortalecem a utilização da sua reciclagem. ABAL, (2015).

As ligas FeAl, são amplamente utilizadas na indústria devido à ductilidade e à boa condutividade térmica e elétrica do alumínio, e o baixo custo e alta dureza do ferro. Nesse trabalho foi utilizado no lugar do pó de ferro, o cavaco de aço inoxidável, devido à necessidade ambiental de reciclar os rejeitos industriais. O objetivo é formar uma liga Fe-Al em diferentes proporções através da moagem de alta energia (MAE) cuja principal vantagem é mínima perda de material durante o processamento. "No início do processo de moagem, as partículas frágeis são fragmentadas e as partículas dúcteis tornam-se achatadas por um processo de microforjamento. As partículas achatadas sofrem soldagem a frio, enquanto as partículas frágeis são distribuídas na superfície do material mais mole". (NOWOSIELSKI, 2005).

As amostras então serão submetidas a tratamentos térmicos e preparação metalográfica para que possa ser realizada a caracterização de sua microestrutura por microscopia eletrônica de

varredura, escaneamento por energia dispersiva e difratometria. Por fim, para caracterizar mecanicamente, será feito ensaios de dureza e microdureza.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Diagrama de fases Fe-Al

Para determinação dos parâmetros de solubilidade, temperatura e fases desejados, faz-se necessário analisar o diagrama de fases (Figura 1), onde está destacado com linhas vermelhas a quantidade (em peso%) dos elementos de liga, e a temperatura de trabalho para formação da fase Fe-Al.

FIGURA 1. Diagrama de fases Fe-Al. Fonte: KRASNOWSKI (2006).

2.2 Método

O cavaco de aço inox e as latas de alumínio foram cortados em pedaços de até 5mm, e moídos separadamente em moinho atritor horizontal de alta energia por 2 horas a 1200rpm, para

obtenção de pó passante em peneira de 100 mesh. Após obtenção dos pós de alumínio e aço inox, foi efetuada mistura na concentração em peso de 75% aço inoxidável e 25% alumínio, por 10 horas a 1000rpm, e novamente peneirado em peneira de granulometria 100 mesh. O próximo passo foi a compactação a frio na prensa hidráulica, em matriz circular com 8,2mm de diâmetro, com pressões de 928,8MPa e 1486,0MPa. Com as amostras compactadas, a etapa seguinte foi a sinterização, realizada em forno tubular com atmosfera controlada, utilizando gás Nitrogênio. Os parâmetros utilizados no forno foram uma rampa de aquecimento de 10°C/min e patamar de sinterização a 950°C durante 90min, com resfriamento lento, ocorrendo dentro do forno pelo seu simples desligamento.

Para análise microestrutural foi realizado o lixamento das amostras compactadas e sinterizadas com lixas de granulometrias de 80, 100, 150, 220, 320, 400, 600 e 1200, e posterior polimento com disco de feltro sobre o qual foi aplicado o abrasivo de alumina diluída em água. Com os corpos de prova obtidos, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura aliado com escaneamento via EDS para determinar a composição química e mapear a dispersão dos elementos na amostra. Para análise microestrutural, obtenção das imagens e composição química utilizou-se o microscopia eletrônico de varredura (MEV) em um marca TESCAN, modelo LMU VEGA 3. O mapeamento eletrônico e a composição foram obtidos por um acessório acoplado no MEV de marca EDAX, fabricado pela empresa Inglesa Oxford. Para determinação das fases cristalinas, foi realizada análise por difratometria de raio-X (DRX). A dureza foi calculada segundo a norma ASTM E18, utilizando durômetro Mitutoyo na escala Rockwell E. Um procedimento geral do trabalho está esquematizado na Figura 2.

FIGURA 2. Estrutura esquemática do procedimento experimental. Fonte: próprio autor (2019).

3. RESULTADOS

O processo de moagem por 10 horas se mostrou eficiente para o refino do particulado, sendo comprovado através do MEV, onde foi possível visualizar particulados com média dimensional de $5\mu\text{m}$ (Figura 3).

FIGURA 3. Mistura em pó, após 10h de moagem. Fonte: próprio autor (2019).

Na microscopia eletrônica de varredura, observa-se uma estrutura heterogênea, com fases escuras compostas principalmente de alumínio, fases claras compostas em sua maioria por ferro e cromo e pontos brancos de tungstênio, de acordo com as Figuras 4 e 5. Esta diferença de coloração é atenuada quando se deixa de utilizar o detector por elétrons secundários (SE) e sim o detector de elétrons retroespalhados (BSE). Nota-se que não há poros na amostra, que se apresentou com aspecto bastante metálico.

Os pontos brancos notados nas figuras 5 e 7 representam a principal impureza notada, são carbeto de tungstênio provenientes de processos de moagem anteriores. Estes carbeto elevam a dureza do material a ponto de fragilizá-lo, como notado durante o lixamento.

FIGURA 4. Amostra compactada a 5T e sinterizada. Amp. de 500x. Fonte: próprio autor (2019).

FIGURA 5. Amostra compactada a 5T e sinterizada. Amp. de 5000x. Fonte: próprio autor (2019).

FIGURA 6. Amostra compactada a 8T e sinterizada. Amp. de 500x. Fonte: próprio autor (2019).

FIGURA 7. Amostra compactada a 8T e sinterizada. Amp. de 5000x. Fonte: próprio autor (2019).

A composição química, bem como da heterogeneidade das amostras, se deu pela técnica de espectrometria de raio-x por energia dispersiva EDS. Resultados apresentados nas figuras 8 e 9 e respectivas tabelas 1 e 2.

TABELA 1. Composição química da amostra 5T

Elemento	Peso%		
	Espectro 10	Espectro 11	Espectro 12
Al	7,85	30,73	26,77
Cr	5,00	9,06	6,02
Mn	0,57	0,85	0,65
Fe	79,67	50,72	47,41
Ni	4,18	2,29	2,77
W	2,73	6,35	16,38
Total:	100	100	100

Fonte: próprio autor (2019).

FIGURA 8. EDS da amostra compactada a 5T.

Fonte: próprio autor (2019).

TABELA 2. Composição química da amostra 8T

Elemento	Peso%		
	Espectro 6	Espectro 7	Espectro 8
Al	18,01	24,74	21,93
Cr	4,21	6,54	4,25
Mn	0,77	0,84	0,70
Fe	69,80	60,08	64,99
Ni	1,83	2,86	3,16
W	5,38	4,94	4,97
Total:	100	100	100

Fonte: próprio autor (2019).

FIGURA 9. EDS da amostra compactada a 8T.

Fonte: próprio autor (2019).

A dispersão dos elementos químicos em uma área ampla da amostra é verificada através do mapeamento via EDS, bem como sua composição em peso%. As figuras 10 e 11 mostram essa dispersão nas amostras compactadas a 5T e 8T.

FIGURA 10. Mapeamento da amostra compactada a 5T e sinterizada. Fonte: próprio autor (2019).

FIGURA 11. Mapeamento da amostra compactada a 8T e sinterizada. Fonte: próprio autor (2019).

Nota-se pelo EDS a presença de algumas impurezas redundantes, como o manganês (Mn) e tungstênio (W), oriundos dos pigmentos que revestem as latinhas de alumínio e contaminação durante processo de moagem, respectivamente. Contudo, ainda assim foram obtidas composições químicas próximas da teórica estabelecida. Observa-se também nas imagens do EDS alguns espectros pontuais, estes serviram para corroborar com a afirmação de que os pontos de coloração

mais clara são predominantemente partículas de ferro, cromo e tungstênio encrustadas, já as mais escuras correspondem ao alumínio.

Para analisar as fases constituintes das amostras, foi utilizado o ensaio DRX. O difratograma da amostra compactada a 8Té apresentados na figura 12, onde se observa as fases, Al, FeAl como uma solução sólida e ainda a presença da fase γ -Fe₂O₃. Os picos de difração foram caracterizados conforme os PDF's Card's n. 00-039-1346-Al, 12042-17-AlFe e 00-039-1346-Fe₂O₃ do ICDD (International Centre for Diffraction Data). Esses resultados apontam a ocorrência de uma pequena quantidade de óxido de ferro (fase- γ -Fe₂O₃), indicando uma que haveria necessidade de atmosfera do forno com gás nitrogênio, visto que, o forno utilizado possui uma grande rachadura que impede o controle com alta confiabilidade da atmosfera. Ocorre a predominância de formação da fase ferro-alumínio. Como todas as sinterizações foram realizadas à temperatura de 950°C, já era esperado esse resultado, pois no digrama de fase Al-Fe, nesse percentual ocorre fases intermetálicas entre o Al e o Fe.

FIGURA 12. Difratograma de raio-x da amostra compactada a 8T. Fonte: próprio autor (2019).

Para análise da resistência mecânica foram realizados os ensaios de dureza e micro dureza. Os parâmetros utilizados no ensaio de dureza seguiram a norma ASTM E18, que indica para ligas de alumínio a escala Rockwell E, com penetrador de geometria esférica de 1/8" de diâmetro, pré-carga de 10kgf e carga de 100kgf. Para o ensaio de microdureza, seguiu-se a norma ASTM E92-82, que indica a utilização da escala Vickers 0.5, com força teste de 4,903N e penetração por 15 segundos. Após 5 testes em cada corpo de prova, foi calculado a média aritmética e o desvio padrão, conforme tabela 3. Observa-se que, conforme esperado, o valor da dureza eleva de acordo com uma maior carga de compactação aplicada.

TABELA 3. Microdureza Vickers e Dureza Rockwell E

Ensaio realizados	Vickers (HV)		Rockwell E(HRE)	
	5T	8T	5T	8T
1º	301	442	108,2	111,3
2º	328	450	116,3	114,1
3º	289	477	111,8	121,8
4º	294	458	109,5	124,1
5º	304	446	112,9	119,9
MÉDIA	303,2	454,6	111,74	118,24
DESVIO PADRÃO	15,06	13,85	3,15	5,36

Fonte: próprio autor (2019).

FIGURA 14. Desvio padrão para ensaios de dureza e microdureza. Fonte: próprio autor (2019).

4. CONCLUSÕES

O trabalho permitiu a elaboração de uma liga utilizando reciclados de alumínio e cavaco de aço inoxidável. Foi revelada uma microestrutura heterogênea, indicando que houve uma dissolução do alumínio no ferro sem formação de liga ou de um composto intermetálico, impossibilitando a formação de grãos. Como o aspecto heterogêneo foi apresentado por todas as amostras, tanto as compactadas a quente quanto as compactadas a frio, entende-se que há necessidade de realizar uma solubilização em temperatura superior à sinterização para a formação do composto desejado. A constante oxidação superficial sofrida pelas amostras durante o procedimento experimental corrobora o fato de que o ferro ficou exposto sem a proteção que o alumínio poderia lhe oferecer.

Os ensaios de dureza indicam uma melhor resistência mecânica das amostras compactadas a 8 toneladas. A pressão de compactação influencia na adesão dos particulados, tornando-os mais próximos e facilitando sua sinterização. Outro fator que influenciou na obtenção de melhor resistência mecânica nas amostras foi o tamanho reduzido dos corpos de prova, facilitando o processo de sinterização.

As amostras apresentam baixa porosidade, evidenciada principalmente durante o lixamento. Em uma posterior revisão bibliográfica foi encontrado o trabalho de Krasnowski e Kulik (2006) que solucionaram o problema da porosidade aumentando a carga de compressão para 7,7Gpa e utilizando compactação a quente em temperatura de 1000°C.

A composição química das amostras foi satisfatória, embora tenha sido identificada a presença de impurezas como tungstênio, mas isso se deve ao fato de ter sido utilizado reciclados ao invés dos metais puros, com alguns ajustes no controle de impurezas e aplicação de uma solubilização adequada, espera-se obter deste trabalho uma liga de FeAl com ótimas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio (Online). Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em agosto 2019.

CHIAVERINI, V., Metalurgia do pó: técnicas e produtos. 3.ed. São Paulo, S.P., ABM, 1992, p. 278.

COSTA, L. G.; PIRES, H. A contribuição da reciclagem do alumínio para o alcance do desenvolvimento sustentável. IV SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

GALVÃO, A. O. Reciclagem de cavacos de aço SAE 1020 via metalurgia do pó. CEFET-RN, p. 23, 2008.

KRASNOWSKI, M., KULIK, T. Nanocrystalline FeAl intermetallic produced by mechanical alloying followed by hot-pressing consolidation. Warsaw University of Technology, Woloska 141, 02-507 Warsaw, Poland, 2006.

LAYRARGUES, P. P., “O cinismo da reciclagem: o significado ideológico da reciclagem da lata de alumínio e suas implicações para a educação ambiental”, 2010.

NOWOSIELSKI, R., PILARCZYK, W. “Structure and properties of Fe-6.67%C alloy obtained by mechanical alloying”. Journal of Materials Processing Technology, Vol.162-163, p. 373-378, 2005.

SILVA, J. R. G., BROTZEN, F. R., (1991). “Elaboração mecânica de ligas”. Metalurgia-ABM. Vol. 47, n. 396, pp. 236-240.

SURYANARAYANA, C. “Mechanical alloying and milling: Progress in Material Science”. Vol. 46, p. 1-184, 2001.