

# RECICLAGEM DE CAVACOS DE AÇO 1020 E REFUGOS DE ALUMÍNIO VIA METALURGIA DO PÓ<sup>1</sup>

Narayanna Marques Ferreira<sup>2</sup>  
Samara Mello Valcacer<sup>3</sup>  
Tércio Graciano Machado<sup>4</sup>  
Uílame Umbelino Gomes<sup>5</sup>  
Caubi Ferreira de Souza Júnior<sup>6</sup>  
Gilson Garcia da Silva<sup>7</sup>

## Resumo

A reciclagem dos resíduos industriais surge como uma alternativa para minimizar os impactos ambientais e o excessivo gasto de energia ocorrido durante o processo de produção utilizando matéria-prima convencional. A indústria metal-mecânica também não é diferente das demais e busca no reaproveitamento de seus insumos uma eficiente e vantajosa saída para a preservação ambiental, aumento do recurso financeiro e diminuição do gasto de energia no processo. A preocupação com a reciclagem industrial tem levado as indústrias a buscarem alternativas para disposição final de seus resíduos, e uma saída plausível é a utilização de processos para sua recuperação. O objetivo deste trabalho é viabilizar a reciclagem de cavacos de aço SAE 1020 e cavacos de alumínio (liga de alumínio 6060) provenientes do processo de torneamento de usinagem a seco na indústria metal-mecânica, com posterior processamento pela metalurgia do pó. Neste trabalho, o cavaco em pó foi transformado através do processo de moagem em moinho de alta energia, em que é realizado um estudo do tempo e rendimentos necessários para cominuição do material. Os pós de aço SAE 1020 foram misturados com alumínio 6060 nas proporções de 10%, 20% e 30% com pressão de compactação de 400 MPa e sinterizados por fase líquida na temperatura de 1150°C. Para caracterização da microestrutura formada foi realizada microscopia óptica. O ensaio de dureza Rockwell foi realizado para a determinação da dureza das amostras, procurando-se avaliar o efeito da compressibilidade e sinterabilidade.

**Palavra-chave:** Metalurgia do pó; Sinterização; Cavaco de aço SAE 1020; Cavaco de alumínio 6060.

## STEEL 1020 SCRAP RECYCLING AND ALUMINUM REFUGEES VIA THE POWDER METALLURGY

### Abstract

The recycling of industrial waste is an alternative to minimize environmental impacts and excessive expenditure of energy occurred during the production process using conventional raw materials. The metal-mechanical industry is not different from other search and reuse of their inputs in an efficient and profitable outlet for environmental preservation, increasing the financial resource and decrease the expense of energy in the process. The concern with the recycling industry has led the industry to seek alternatives for final disposal of their waste, and a plausible exit is the use of procedures for its recovery. The goal is to enable the recycling of steel SAE 1020 chips and chip aluminum (aluminum alloy 6060) from the process of turning the dry machining of metal-mechanical industry with further processing by the powder metallurgy. In this work, the chip powder was processed through the grinding mill in high-energy, which is a study of time and income to comminution of the material. The SAE 1020 steel powders were mixed with aluminum in 6060 proportions of 10%, 20% and 30% with a pressure of 400 MPa and sintered by liquid phase in the temperature of 1150°C. For characterization of the phases and microstructure formed was performed by optical microscopy. The Rockwell hardness test was performed to determine the hardness of the samples, trying to evaluate the effect of compressibility and sintering.

**Key words:** Powder metallurgy; Sintering; Steel SAE 1020 scrap; Aluminum 6060 scrap.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Graduada em Tecnologia em Fabricação Mecânica pelo CEFET-RN. narayanna\_marques@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Graduada em Tecnologia em Materiais pelo CEFET-RN. samaravalcacerl@hotmail.com

<sup>4</sup> Mestre em mecânica, Doutorando do PPGCEM/UFRN. gracianomil@hotmail.com

<sup>5</sup> Doutor, professor DFTE/UFRN. umbelino@dfte.ufn.br

<sup>6</sup> Doutor, professor CEFET-RN. caubi@cefetrn.br

<sup>7</sup> Doutor, professor CEFET-RN. gilsongarcia@cefetrn.br

# 1 INTRODUÇÃO

A reciclagem é um processo industrial que converte resíduos descartados (matéria-prima secundária) em um produto semelhante ao inicial ou a outro produto. A reciclagem dos resíduos industriais surge como uma alternativa para minimizar os impactos ambientais causados e o excessivo gasto de energia ocorrido durante o processo de produção utilizando matéria-prima convencional.

A crescente preocupação ambiental iniciada no final do século XX tem exigido das empresas uma perspectiva mais atenta para sua relação com o meio ambiente. A indústria metal-mecânica também não é diferente das demais, e busca no reaproveitamento de seus insumos uma eficiente e vantajosa saída para a preservação ambiental e aumento do recurso financeiro. Alguns setores ligados à indústria mecânica já desperta para essa prática de reutilização de seus insumos, partindo da elaboração e desenvolvimento de programas de incentivo a reciclagem, como financiamento de idéias inovadoras sobre a reciclagem de seus produtos.

Alguns materiais destacam-se no processo de reciclagem, uma vez que eles oferecem infinitas possibilidades de reutilização, este é o caso do alumínio e suas ligas. A reciclabilidade é um dos principais atributos do alumínio podendo ser reciclado infinitas vezes, sem perder suas características no processo de reaproveitamento, ao contrário de outros materiais. O alumínio pode ser reciclado tanto a partir de sucatas geradas por produtos de vida útil esgotada, como de sobras do processo produtivo.<sup>(1)</sup>

O aço apresenta um conjunto de características que permitem também a sua ampla utilização industrial. O Brasil é atualmente o 9º produtor de aço, atrás de potências como China, Japão, Estados Unidos. O aço é o primeiro material em importância na engenharia, seguido do alumínio. Sua versatilidade deve-se ao baixo custo de fabricação, de conformação de processamento, a abundância das matérias-primas, de suas propriedades mecânicas, além da possibilidade e aplicação de tratamentos térmicos.

A Metalurgia do Pó é uma técnica de transformação de pós metálicos, não-metálicos e cerâmicos, através da compactação e consolidação da peça por aquecimento controlado; resultando em um componente útil para as diversas áreas da engenharia. A seqüência de transformação envolve a aplicação de leis básicas de calor, trabalho, e deformação para o pó.<sup>(2)</sup> É uma técnica viável em componentes com aplicação industrial, em particular, as que exigem peças de maior precisão, que seja impossível ou inviável pela metalurgia convencional.

A Metalurgia do Pó Ferrosa (MPF) pode ser considerada como um dos mais importantes ramos da Metalurgia do Pó, devido à versatilidade do ferro e suas ligas como materiais amplamente utilizados na indústria. Atualmente, segundo a Metal Powder Industries Federation - MPIF, nos Estados Unidos são produzidas, anualmente, mais de um milhão de toneladas de peças sinterizadas, ou seja, um crescimento bastante acentuado, considerando-se que, em meados da década de 80, essa produção era em torno de 350 mil toneladas.<sup>(3)</sup>

É importante ressaltar que a adição controlada de elementos de liga ao componente principal da mistura é um dos meios mais utilizados para se atingir a qualidade desejada aos componentes da MPF. Assim, torna-se viável a reciclagem de materiais provenientes da indústria metal-mecânica pelo processo de fabricação por metalurgia do pó, a qual se distingue dos processos convencionais pela ausência de fase líquida ou presença apenas parcial de fase líquida durante o

processamento;<sup>(4)</sup> tornando-se uma saída para minimizar ainda mais os gastos com o reaproveitamento de materiais ferrosos.

Lourenço<sup>(5)</sup> afirma que a MPF é uma tecnologia ecologicamente limpa, tem desperdício mínimo de energia e matéria-prima, produz componentes com alto grau de repetibilidade e precisão. Todas essas características fazem com que essa técnica encontre usuários nos diversos segmentos da indústria.

O ciclo de produção de componentes provenientes da Metalurgia do Pó envolve etapas bem definidas, como: a produção dos pós, mistura e homogeneização dos pós, compactação, sinterização; e, se necessário, uma operação de acabamento denominada de calibração.<sup>(6)</sup> A etapa de sinterização tem importante papel, pois confere a configuração final da microestrutura do material compactado. Basicamente, ocorrem três tipos de sinterização dependendo apenas das fases envolvidas no processo, podendo-se assim destacar: a sinterização por fase sólida, a sinterização por fase líquida e a sinterização ativada.<sup>(2)</sup>

Neste trabalho, o compósito Aço/Alumínio será sinterizado por fase líquida, pois a principal característica desse processo é a formação de fase líquida capaz de dissolver o alumínio na matriz de aço com objetivo de promover uma densificação da estrutura.

A proposta deste trabalho é desenvolver um compósito metálico de base em aço e reforço em alumínio obtido a partir da reciclagem de refugos de aço SAE 1020 e liga de alumínio 6060, provenientes de torneamento de usinagem a seco. Determinando assim, as fases presentes, a microestrutura e o grau de sinterabilidade formado pela sinterização por fase líquida. Devido o processo de sinterização provocar modificações dimensionais, foram analisadas as densidades a verde e sinterizada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Procedimento Experimental

Neste trabalho foi utilizado o cavaco de aço SAE 1020 e liga de alumínio 6060 provenientes de torneamento de usinagem a seco. Ambos os materiais foram cominuidos separadamente em moinho de alta energia do tipo atritor horizontal, conforme ilustra a Figura 1.



Figura 1. Moinho de alta energia do tipo atritor horizontal.

O controle das características dos pós (tamanho de partículas, forma das partículas, distribuição dos grãos, entre outros) é de fundamental importância no processamento e na aplicação particular do material. A essas características estão vinculadas as propriedades tecnológicas dos materiais a partir do pó, como a escoabilidade, densidade aparente e compressibilidade, pois essas propriedades tratam-se de parâmetros fundamentais na qualidade final do produto.<sup>(7)</sup>

Na Tabela 1 temos os parâmetros da moagem adotados para os refugos de aço SAE 1020 e liga de alumínio 6060.

**Tabela 1.** Parâmetros da moagem

| <b>Parâmetros</b>            | <b>Valores</b> |
|------------------------------|----------------|
| Massa de esfera (g)          | 500            |
| Massa do pó (g)              | 50             |
| Massa de esfera/ Massa de pó | 10             |
| Diâmetro das esferas (mm)    | 10             |
| Velocidade da haste (rpm)    | 1000           |
| Atmosfera passante           | aberta         |
| Refrigeração                 | água           |
| Tempo de processo (h)        | 1              |

Após o processo de cominuição, o pó de aço SAE 1020 e o pó de alumínio foram selecionados com peneiras classificatórias para se ter o controle da granulometria das partículas. Nesse processamento obtiveram-se pós com faixa de granulometria de 200 mesh. Com a finalidade de estudar a influência de diferentes percentuais de alumínio adicionados na matriz de aço dividiu-se em quatro composições distintas, conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição das amostras.

| <b>Composição</b>   | <b>Percentual do Aço SAE 1020</b> | <b>Percentual do elemento de liga – alumínio 6060</b> |
|---------------------|-----------------------------------|---|
| <b>Composição 1</b> | 100                               | 0   |
| <b>Composição 2</b> | 90                                | 10  |
| <b>Composição 3</b> | 80                                | 20  |
| <b>Composição 4</b> | 70                                | 30  |

Como aditivo lubrificante foi utilizado o estearato de zinco, no percentual de 0,8%. Para a compactação das amostras a verde, foi utilizada uma matriz metálica uniaxial de simples efeito usando uma pressão de 400 MPa. Para a compactação das amostras a verde, foi utilizada uma prensa hidráulica universal de ensaios mecânicos marca TIL MARCON MPH – 15.

Com o objetivo de analisar a densificação do corpo a verde e sinterizada foram realizadas medições correspondentes à altura e diâmetro das amostras com auxílio do instrumento de precisão – micrômetro 0,001 mm.

A sinterização das amostras foi realizada em um forno resistivo tubular de marca JUNG J200, com atmosfera controlada de argônio, conforme ilustra a Figura 2. O controle da temperatura de sinterização foi feito com termopar do tipo K de 3 mm de diâmetro e 1.000 mm de comprimento, inserido numa bainha dentro do forno e, com auxílio de um multímetro, foram realizadas medições em mV sendo em seguida convertidas para graus Celsius (°C).



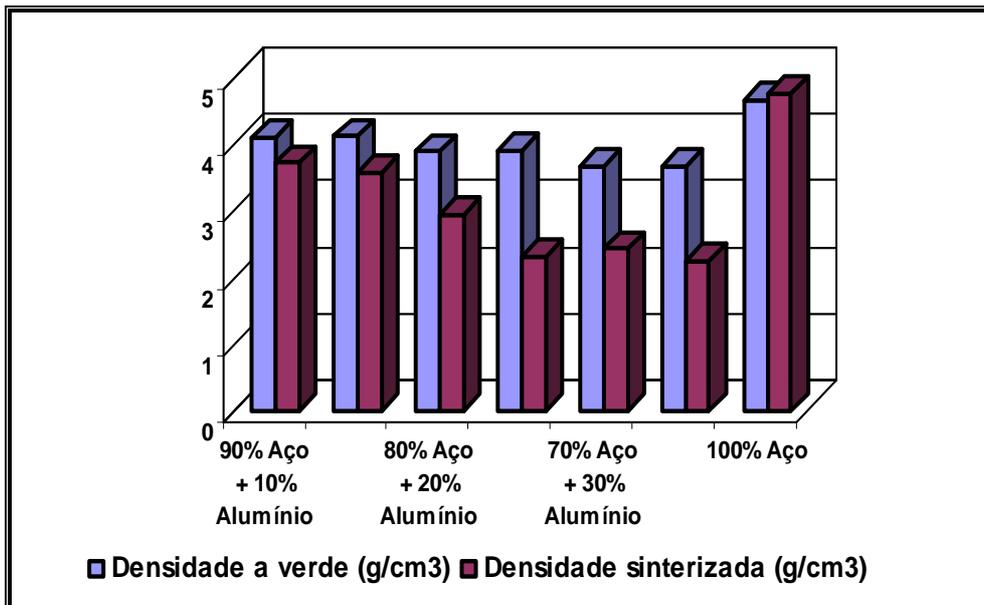
**Figura 2.** Forno resistivo tubular de marca JUNG J200.

Durante a sinterização, a extração do lubrificante foi realizada a uma temperatura de 500°C, durante 30 min, somente com aquecimento resistivo. Para a sinterização das amostras foi utilizada temperatura equivalente a 1.150°C, durante 1,5 h. Após a sinterização, as amostras foram preparadas metalograficamente, lixadas e polidas com pasta abrasiva de polimento a base de alumina (composição: alumina, betonita, água destilada e corante), seguida de ataque químico na superfície utilizando uma solução de Ácido Nítrico (NITAL) 2%.

A microestrutura das amostras foi caracterizada por Microscopia Óptica, utilizado microscópio PANTEC XJL-03, com aumentos de 400x. Para a caracterização das propriedades mecânicas foi realizado o ensaio de Dureza Rockwell, escala padrão B; sendo realizadas pelo menos cinco medidas para cada composição.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As amostras tiveram suas densidades avaliadas nos estágios de compactados a verde e sinterizados. Na Figura 3 é apresentado o perfil da variação dimensional decorrente da retração nos corpos de prova após a sinterização.



**Figura 3.** Comparação entre os resultados da densificação das amostras com percentuais de 10%, 20%, 30% de alumínio em matriz de aço, nos estágios de compactadas a verde e sinterizadas.

Percebe-se que nas amostras apenas compactadas o grau de densificação é maior do que naquelas que passaram pelo processo de sinterização, devido o alumínio ser dúctil e sofrer maior retração na fase de compactação do que na sinterização. Sendo confirmado apenas nas amostras com adições de 10%, 20% e 30% de alumínio; no entanto na amostra com percentual de 100% de aço houve uma pequena expansão com uma variação não significativa.

Segundo German,<sup>(1)</sup> os mecanismos de densificação atuantes na sinterização por fase líquida são bastante dependentes da quantidade de líquido presente na estrutura e da interação deste líquido com a fase sólida (molhabilidade, dissolução entre sólido e líquido, reação para formação de outras fases com absorção ou liberação de energia etc.). Em todo caso, existe sempre uma importante contribuição da ação das forças de capilaridade. Se a molhabilidade do sólido pelo líquido for favorável, estas forças de capilaridade promovem um forte e rápido rearranjo de partículas que leva à densificação. Se a molhabilidade é desfavorável, as forças de capilaridade atuam em sentido oposto, impedindo a densificação e promovendo até o rompimento da estrutura.

A Figura 4 ilustra o diagrama de fase binário Fe-Al, com teores de alumínio variando de 0 a 100, em percentuais de massa e átomos.

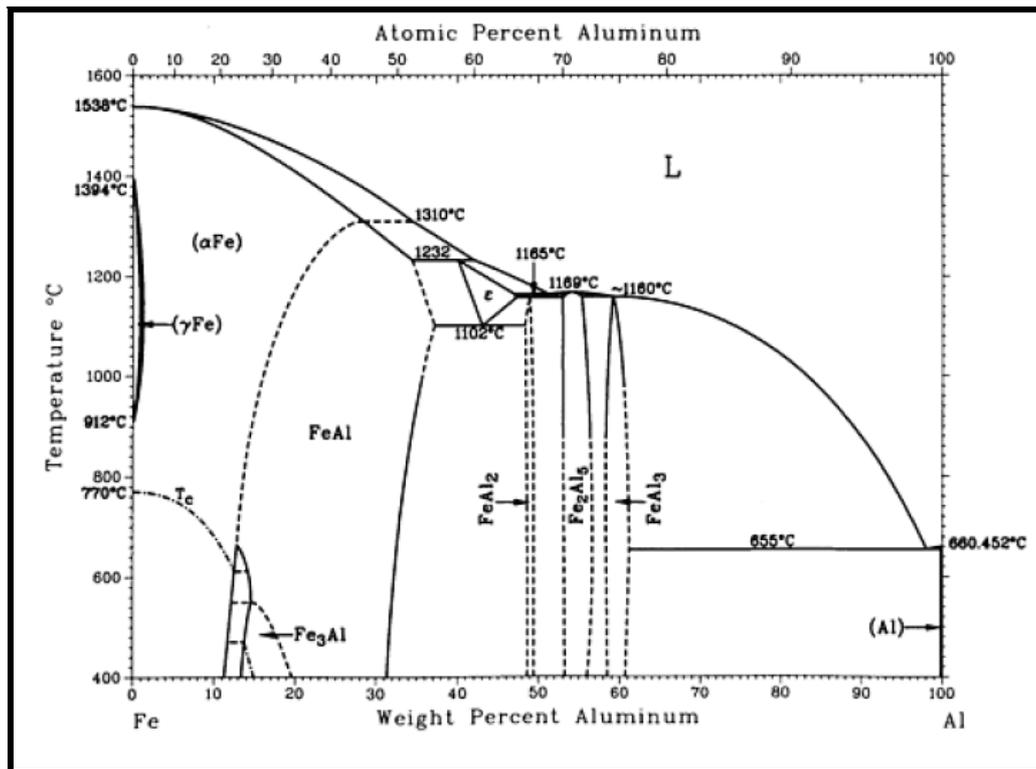


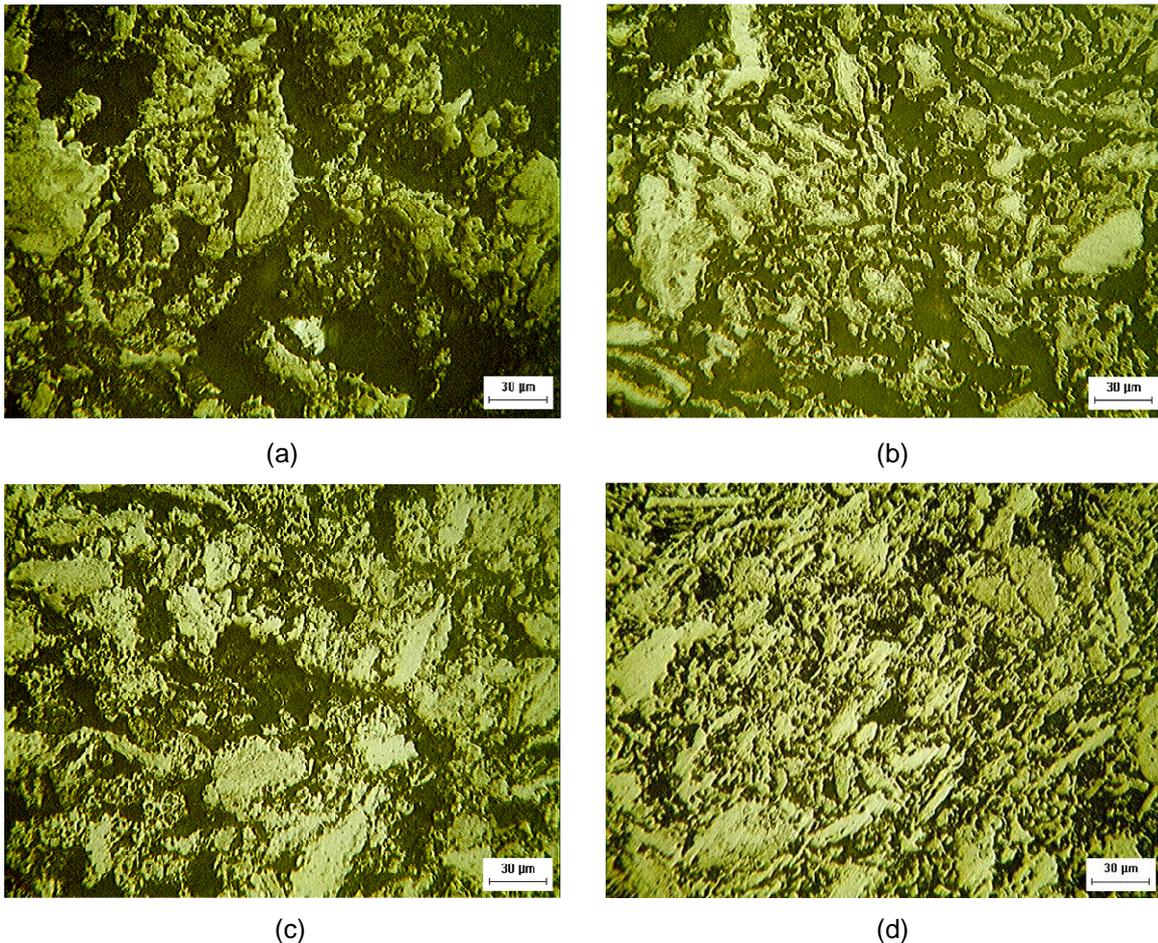
Figura 4. Diagrama de fase binário Fe-Al.<sup>(8)</sup>

Percebe-se no diagrama que o Al tem solubilidade de 28% em massa de Al a uma temperatura de 1.310°C, expandindo o campo  $\alpha$  e contraindo a fase- $\gamma$ . É ainda possível verificar, que o ponto máximo do campo  $\gamma$  situa-se numa composição química de aproximadamente 0,6% em massa de Al e temperatura de 912°C a 1.394°C. Todavia, o campo  $\alpha$  localiza-se numa faixa de composição química intermediária de 0% a 28% em massa de Al e temperatura que varia de 770°C a 1.310°C. No entanto, a fase FeAl varia da composição química de 12,8% a ~37% em massa de Al e temperatura de 650°C a 1.310°C. Com isso, faz-se necessário ressaltar que a melhor interação Fe-Al promove-se no campo  $\alpha$ , estrutura cristalina CCC cujo Fator de Empacotamento Atômico (FEA) é de 0,68; fazendo essa estrutura ser menos compacta do que no campo  $\gamma$  de estrutura CFC e FEA de 0,74, havendo melhor difusividade e sinterabilidade no campo  $\alpha$ .

A temperatura de sinterização foi 1.150°C, sendo utilizada em todos os ensaios, nas amostras de percentuais 10%, 20% e 30%, em massa de Al na matriz de aço, intermediando-se em duas fases distintas, campo  $\alpha$  para o percentual de 10% Al e a fase FeAl para o percentual de 20% e 30% Al. Nesta última fase, percebe-se uma imiscibilidade do alumínio no ferro tornando um componente não homogêneo com fases claramente distintas.

A sinterização por fase líquida na temperatura de 1.150°C para o sistema Fe-Al mostrou-se favorável apenas na composição química de percentual de 0,6% a 10% Al. Pois essa faixa de composição está localizada no campo  $\alpha$ , possuindo melhor difusividade, solubilidade e conseqüente sinterabilidade; devido ao  $FEA_{CCC}$  ser no valor de 32%, ou seja, menos denso em relação ao campo  $\gamma$  -  $FEA_{CFC}$  26%.

As micrografias da Figuras 5 ilustram o aspecto microestrutural das amostras de 10%, 20% e 30% de Alumínio em matriz de Aço e microestrutura da amostra de 100% de Aço, todas sinterizadas na temperatura de 1.150°C durante 1,5h.



**Figura 5.** Micrografias das composições 10% Alumínio - 90% Aço (a); composição 20% Alumínio - 80% Aço (b); composição 30% Alumínio - 70% Aço (c) e composição de 100% de Aço, com aumento de 400x.

É perceptível a presença de poros grandes e arredondados, característicos da sinterização por fase líquida. Nas Figuras 5(a) e 5(d) nota-se uma continuidade e homogeneidade da matriz característica de uma boa solubilidade e sinterabilidade. No entanto, nas Figuras 5(b) e 5(c) percebe-se a formação e continuidade de duas fases distintas causadas, conseqüentemente pela falta de homogeneidade em tais percentuais.

A determinação da dureza no material sinterizado torna-se difícil devido a presença da porosidade, deste modo, os valores obtidos não podem ser comparados com os valores obtidos de material idêntico produzido na metalurgia convencional.

Para todas as amostras de percentuais 10%, 20%, 30% de Al na matriz de Aço verificou-se um aumento dos valores de dureza Rockwell, porém não foram acréscimos significativos, constatando-se um aumento da dureza na mesma ordem de grandeza. Todavia, na composição de 100% de Aço percebe-se um valor superior da dureza comparado quando adicionado os percentuais de alumínio. Isto é explicado pelo fato da matriz de Aço ter sofrido uma maior densificação com conseqüente diminuição da porosidade interna, melhorando sua dureza. Nas amostras acrescidas com percentuais de Al, o efeito do preenchimento e molhabilidade da matriz do Aço ocasionou um aumento da dureza não significativo, decorrente da interação de dois sistemas diferentes, Fe campo  $\alpha$  - melhor difusividade e FeAl - dificuldade da formação de solução sólida substitucional. Como

o Al penetrou na matriz do Aço, ocorreu um aumento da dureza por solução sólida substitucional, promovendo um acréscimo mais significativo; contudo este acréscimo não foi perceptível.

**Tabela 3.** Resultados obtidos no ensaio de dureza Rockwell

| <b>Composição</b>   | <b>Percentual do elemento de liga</b> | <b>Dureza Rockwell – Esc. B</b> |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Composição 1</b> | 100% Aço                              | 62                              |
| <b>Composição 2</b> | 10% Alumínio - 90% Aço                | 42,67                           |
| <b>Composição 3</b> | 20% Alumínio - 80% Aço                | 47,77                           |
| <b>Composição 4</b> | 30% Alumínio - 70% Aço                | 46,83                           |

#### **4 CONCLUSÃO**

É notória no cenário atual uma busca por soluções que aumentem o ciclo de vida dos materiais visando dessa forma não só a preservação do meio-ambiente, mas também a minimização de custos nos processos produtivos. O entulho metálico que normalmente voltaria para reciclagem pela via metalurgia convencional, à fusão, atingiu resultados satisfatórios quando processados pela metalurgia do pó.

Outro ponto a ser destacado é que os resultados obtidos poderiam ser melhorados com a adequação de alguns parâmetros na técnica adotada: um pó de granulometria mais fina fosse adotado, uma vez que esse ponto é facilitador da sinterização; a compactação do alumínio e suas ligas devem ser sempre realizadas de forma que a pressão seja crescente e não constante; o pó deve ser preservado ao máximo, uma vez que a formação de óxido na partícula faz com que a troca de fluxo entre as partículas seja comprometida.

Considerando os resultados experimentais analisados pode-se concluir que se torna viável a reciclagem do cavaco de aço SAE 1020 via metalurgia do pó com percentuais de alumínio em torno de 20%, garantindo assim, um destino final aos produtos oriundos da siderurgia. Desta forma, os procedimentos, os equipamentos e ensaios realizados neste trabalho devem ter rastreabilidade metrológica a fim de diminuir as incertezas durante o trabalho.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao bolsista de IC Paulo Jesus Costa Esteves - Cefet/BA pelo apoio laboratorial e contribuição no processamento do material utilizado.

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa PIBITI.

## REFERÊNCIAS

- 1 VERRAN, G. O. et al. Reciclagem de latas de alumínio usando fusão em forno elétrico à indução, *Estudos Tecnológicos*. Joinvilli, SC, v. 3, n.1, p. 1 – 11, 2007.
- 2 GERMAN, R. M. Brief history. In: \_\_\_\_\_. Powder metallurgy science. 2. ed, Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1989. p. 3 -16
- 3 DELFORGE, D. Y. M, et al. Metalurgia do pó: sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais? *Revista Escola de Minas*, v. 1, n. 60, p. 95 -100, 2007.
- 4 CALLISTER Jr., W. D. The structure of crystalline solids. In: \_\_\_\_\_. Materials science and engineering: and introduction. Rio Janeiro: ed. LTC, 2002. Cap. 3.
- 5 LOURENÇO, J. M. Evolução microestrutural do ferro puro e ligas ferrosas sinterizadas por plasma. 2004. 149 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- 6 ROLL, K. H. Powder Metallurgy: Metals Handbook. In: History of powder metallurgy. v. 7. Washington: ASM International, 1949. Cap. 1.
- 7 CHIAVERINI, V. Metalurgia do pó: técnica e produtos. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. p. 97 -128.
- 8 BAKER, H. Binary diagrams: Iron – Aluminum. In: Guillermet. A. F. Alloy Phase Diagrams: Metals Handbook. v. 3. Washington: ASM International, 1992. Cap. 2.