

RECICLAGEM DO CAVACO DE USINAGEM DE ALUMÍNIO NA EMPRESA FORJASUL ELETRIK S.A.

*Frederico Haberkamp²
Maria Elisabete Machado³
Ivo André Homrich Schneider⁴*

Resumo

O objetivo geral do presente trabalho foi estudar a reciclagem de cavacos da usinagem de alumínio na Empresa Forjasul Eletrik S.A, oriundos da liga SAE 306. Experimentalmente, realizaram-se estudos de caracterização dos resíduos, avaliou-se a remoção de óleos, desenvolveu-se um procedimento de prensagem e, por fim, realizou-se estudos de recuperação metalúrgica do material por fundição em forno elétrico. A composição química das ligas obtidas foi medida por espectroscopia de emissão ótica. Os resultados dos estudos de caracterização mostraram que os cavacos de usinagem apresentam uma massa específica aparente muito baixa, da ordem de 0,54 g/cm³ e um teor de óleo de 9 g/kg. A remoção de óleo pode ser realizada com hexano ou soluções desengraxantes de baixa alcalinidade. A compactação em prensa hidráulica permitiu a obtenção de blocos cilíndricos com massa específica de 2,4 g/cm³. Os estudos em forno elétrico mostraram que a fundição dos cavacos apresentou uma recuperação metalúrgica de 63%. A análise química realizada demonstrou que a composição química da liga metálica obtida após a fundição dos cavacos é muito semelhante a obtida através da corrida de controle com o lingote. Assim, é possível concluir que a reciclagem dos cavacos de alumínio dentro da própria empresa é uma alternativa para a economia dos gastos na obtenção de insumos na produção de fundidos de alumínio.

Palavras-chave: Cavacos de alumínio; Resíduos sólidos; Reciclagem.

60 Congresso Anual da ABM – 25 a 28 de Junho de 2005, Minas Centro - Belo Horizonte

¹ *Aluno do Curso de Metalurgia da UFRGS.*

² *Química. Mestranda no PPGEM - UFRGS.*

³ *Professor - Departamento de Metalurgia - UFRGS*

INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal importante na produção de uma série de utensílios da vida moderna. Muitos destes utensílios são fabricados pelo processo de fundição, um processo bem consolidado que permite a obtenção de peças com ótimas características mecânicas (SENAI-MG, 1987; FUOCO, 1995; FUOCO, 1999).

Apesar de saírem praticamente prontas do processo de fundição, as peças fundidas também necessitam de um operação de usinagem. Particularmente para o alumínio, peças fundidas que necessitam de usinagem dão origem a um cavaco altamente contaminado com óleo e com a superfície do material oxidada.

Algumas alternativas estudadas para a reciclagem de cavacos de alumínio foram direcionadas na produção de compósitos (DA COSTA et al, 1994) produtos extrudados (GRONOSTAJKI, 1995) e na metalurgia do pó (COSTA et al., 2001). Outra alternativa, poderia ser através da fundição, sendo este o foco do presente trabalho.

A reciclagem dos cavacos de alumínio oriundos da usinagem enfrenta algumas dificuldades. Uma delas é o teor de óleo, que pode interferir nas propriedades químicas e mecânicas da liga fundida. A principal preocupação é que o óleo seja fonte de hidrogênio, causando porosidade e outras imperfeições na peça fundida (SPIM, 2003).

Outro problema é a dificuldade que se tem em fundi-lo. O problema se origina do fato de que quando adicionado ao banho líquido este cavaco não submerge, sobrenadando o metal líquido e, como consequência, o mesmo não funde. As razões que podem contribuir para esse efeito são a baixa massa específica aparente do material, a oxidação da superfície e a película de óleo adsorvida no metal.

Assim, o objetivo geral do presente trabalho foi estudar a reciclagem de cavacos de usinagem. Para isso, procurou-se realizar um estudo para a remoção do óleo, desenvolver um processo para a compactar o material e, por fim, fazer a fundição dos cavacos de usinagem, avaliando a recuperação metalúrgica de alumínio e a composição química da liga obtida.

EXPERIMENTAL

Origem dos Cavacos de Usinagem

Os cavacos de alumínio foram obtidos no setor de usinagem da Forjasul Eletrik S.A., sendo que os mesmos são todos oriundos da liga SAE 306. A composição química de 6 lotes de lingotes desta liga é apresentada na Tabela 1. A quantificação da massa e volume de cavacos gerados foi realizada através do acompanhamento do processo na Empresa durante o 2º semestre de 2004.

Tabela 1. Composições químicas dos lotes da Liga SAE 306 (Liga Verde) que deram origem ao cavaco utilizado nos testes.

Lote	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Al	Outros
1	8,00	0,924	3,53	0,139	0,095	1,92	0,074	0,029	84,90	0,388
2	8,73	0,893	3,15	0,173	0,072	1,87	0,073	0,029	84,79	0,225
3	8,81	1,060	3,75	0,172	0,096	1,87	0,088	0,034	83,87	0,246
4	8,54	0,974	3,49	0,156	0,066	1,93	0,072	0,027	84,54	0,205
5	8,23	0,879	3,08	0,137	0,006	0,86	0,068	< 0,000	86,58	0,166
6	8,18	1,070	3,44	0,240	0,090	1,07	0,013	< 0,000	85,82	0,079
Média	8,42	0,967	3,41	0,170	0,071	1,59	0,065	0,198	85,09	0,218

Remoção de Óleos e Graxas

Avaliou-se a remoção de óleo e graxas através de dois processos. O primeiro foi através do solvente orgânico hexano. O segundo foi através do uso de uma solução desengraxante de baixa alcalinidade aquecida a 80°C composta por: 40 g/L de silicato de sódio, 5 g/L de glicol, 1 g/L de tensoativo (Arkopal 60), 4 g/L de ácido fosfórico e 10 g/L de hidróxido de sódio. A razão de resíduo por volume de solução desengraxante foi 200 g / L. Em ambos procedimentos, estudaram-se o efeito do tempo de agitação após 10, 30 e 60 minutos de agitação. A análise de óleos e graxas foi realizada por gravimetria pela extração em Éter de Petróleo em Soxhlet.

Prensagem do Material

A prensagem dos cavacos foi feita em uma prensa de fricção de 180 toneladas. Para tanto, foi confeccionado dentro da própria empresa um pistão e uma camisa, usados na conformação do material prensado. O pistão e a camisa foram confeccionados em aço SAE 4340, temperado e revenido. O diâmetro interno da camisa é de 76 mm, em formato circular, totalizando uma área frontal interna de 45,34 cm². Dividindo-se o valor da força da prensa pela área interna da camisa obtém-se o valor de 3,97 ton/cm², que é a pressão exercida sobre o cavaco no momento da compactação.

A prensagem ocorreu da seguinte forma:

- Fixou-se o pistão na parte superior e a camisa na parte inferior da prensa;
- Encheu-se a camisa com cavaco de usinagem;
- Liberou-se a parte superior da prensa, fazendo com que o pistão desça, ocasionando a prensagem do cavaco dentro da camisa.

O grau de compactação foi avaliado através da medida da massa específica aparente obtida.

Fundição do Alumínio

As “pastilhas” de material compactado sem extração de óleo e após a extração de óleo foram fundidas em forno elétrico com capacidade de 2 kg em temperatura de aproximadamente 750°C. Para fins de controle, realizou-se uma fundição com os lingotes de alumínio convencionalmente empregados no processo. Foram realizadas 4 corridas:

- Corrida 1: realizada com cavaco de usinagem compactado e desengraxado;
- Corrida 2: realizada com cavaco de usinagem compactado e não desengraxado;
- Corrida 3: realizada com material de retorno da fundição (massalotes);
- Corrida 4: realizada com lingote (material virgem).

Antes de serem fundidos, cada material foi previamente pesado. O cadinho onde foram fundidos foi totalmente limpo antes de cada corrida, para que os resultados obtidos fossem os mais confiáveis possíveis. Depois de totalmente fundidas as corridas, o cadinho foi retirado do forno e o material foi vazado em lingoteiras. Buscou-se vaziar todas as corridas com temperaturas similares.

Em todas as corridas separou-se a escória do material líquido de forma idêntica. Após fundida a carga, o cadinho foi retirado do forno e colocado sobre tijolos refratários, onde se fazia a separação, para que posteriormente se pudesse proceder à pesagem da escória e do material fundido. A eficiência metalúrgica de recuperação da liga de alumínio foi realizada pelo balanço gravimétrico do material de entrada e a proporção de liga e borra obtida.

A composição química das ligas obtidas nas corridas foi medida em um Espectrômetro de Emissão Óptica marca Espectrolab LAVMB08B. Foram realizadas quatro queimas, obtendo-se, ao final destas, a composição química média da amostra.

O material obtido também passou por análise metalográfica. As amostras foram cortadas, embutidas, lixadas e polidas. Após, foi feita a análise em Microscópio Óptico marca Olympus. O principal objetivo da análise metalográfica foi de analisar a quantidade de óxidos gerados em cada corrida, indicando assim o material que mais e o que menos formou óxidos durante a fusão, vazamento e solidificação.

RESULTADOS

A produção de cavacos de alumínio na Forjasul Eletrik S.A. é de entorno de 2 toneladas mês. O cavaco de alumínio apresenta uma massa específica aparente de $0,54 \text{ g/cm}^3$ e um teor de óleo e graxas médio que varia de 5 a 30 g/kg.

A remoção do óleo dos cavacos se deu por dois processos distintos. No primeiro se utilizou hexano e no segundo usou-se uma solução desengraxante de baixa alcalinidade para alumínio. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 2. Pode-se observar que ambos os métodos são eficientes na remoção do óleo, porém um tempo de agitação de no mínimo uma hora é necessário.

Tabela 2. Comparativo da quantidade de óleos e graxas encontrados no cavaco antes e após o desengraxe.

TEMPO DE DESENGRAXE	PROCESSO	
	Hexano	Solução Desengraxante de Baixa Alcalinidade
Cavaco Bruto (não desengraxado)	26,7 g/kg	26,7 g/kg
10 minutos	5,7 g/kg	3,8 g/kg
30 minutos	3,7 g/kg	1,7 g/kg
60 minutos	0,5 g/kg	0,8 g/kg

Além das análises de óleos e graxas realizadas no cavaco, também foram feitas análises no efluente gerado no processo de desengraxe com solução desengraxante de baixa alcalinidade (Tabela 3). O efluente gerado foi obtido através da união da água de desengraxe mais a água de uma etapa de lavagem. Isso porque os efluentes gerados na indústria devem estar com determinadas características físico-químicas antes de serem lançados no meio ambiente. Foram feitas análises de pH, DQO e O/G. Pode-se observar que efluente gerado no processo de desengraxe com solução de tensoativo gera um efluente líquido que deve ser tratado, o que gera um problema a mais a ser solucionado.

A outra opção, através do uso de hexano ou outro solvente orgânico como éter de petróleo, também deve ser vista com cuidado, pois os solventes orgânicos são tóxicos e devem ter cuidados especiais de operação.

Tabela 3. Comparativo entre as características físico-químicas encontradas no efluente e aquelas permitidas pela Portaria no 05/89 da SSMA.

PARÂMETRO	EFLUENTE GERADO	PADRÃO PERMITIDO
pH	13,5	6,5 – 8,5
DQO	12.000 mg/L	200 mg/L
O/G	1000 mg/L	10 mg/L

A prensagem dos cavacos se deu com um só intuito: aumentar a massa específica aparente dos mesmos. Para que se pudesse fazer um comparativo, foram calculadas a massa específica aparente do cavaco compactado / desengraxado e do cavaco compactado / não desengraxado. Os resultados obtidos para duas amostras são mostrados na Tabela 4.

Comparando a massa específica aparente antes da compactação com a massa específica aparente após a compactação, pode-se verificar que houve um grande aumento da mesma. Isso se deve a grande pressão exercida sobre o cavaco no momento da compactação (3,97 ton/cm²). Essa pressão faz com que haja uma plastificação do material, proporcionando a formação de bloco cilíndrico com excelentes propriedades mecânicas e de manuseio (não se desmancha quando manuseada e nem mesmo após uma queda). Comparando-se a massa específica do cavaco compactado / desengraxado com a do cavaco compactado / não desengraxado, pode-se observar que praticamente não houve diferença, sendo que a média de cada uma é igual a média geral, ou seja, 2,4 g/cm³.

Outra comparação que pode ser feita é entre a massa específica aparente do material compactado (2,44 g/cm³ em média) com a do alumínio em forma de lingote (2,82 g/cm³). Podemos ver que elas ficaram bem próximas em valores.

Tabela 4. Massa específica antes e após a compactação.

AMOSTRA	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm ³)		
	Cavaco Bruto	Cavaco Compactado / Desengraxado	Cavaco Compactado / Não Desengraxado
Amostra 1	0,54	2,46	2,44
Amostra 2	0,54	2,42	2,44

Os cavacos compactados (desengraxados e não desengraxados), os lingotes foram fundidos em um forno de resistência elétrica. Foram feitas quatro corridas, cada uma delas com um material diferente. Todas as corridas deram origem a dois elementos distintos: alumínio e escória (ou borra). Para que se pudesse analisar qual das corridas deu origem a menos borra e mais material, foi calculado o rendimento metálico de cada corrida. A Tabela 5 mostra um comparativo do rendimento metálico das quatro corridas, realizadas com os distintos materiais. Observa-se que a recuperação de alumínio metálico na corridas com lingotes e material de retorno é de quase 97-99%, enquanto que o rendimento metálico das corridas com cavacos de usinagem é de 62-64%. Repara-se também que não parece haver uma diferença significativa na remoção ou não de óleo no rendimento metalúrgico de fundição dos cavacos.

O rendimento metálico das corridas analisadas poderiam ser maiores se fosse utilizado um forno com maior capacidade de carga. Nesse caso, a razão área de contato da corrida com o ar pelo volume da corrida seria menor, originando, desta forma, menor quantidade de escória. Além disso, a adição de fluxos escorificantes também poderiam aumentar o rendimento metálico destas corridas, principalmente no caso das feitas com cavaco compactado, pois quanto maior o volume de escória gerada, maior a quantidade de alumínio eliminado do banho.

Tabela 5. Rendimento metálico corridas.

CORRIDA	RENDIMENTO METÁLICO (%)
C-1 – Cavaco sem óleo compactado	62,46
C-2 – Cavaco com óleo compactado	63,54
C-3 – Material de retorno	97,30
C-4 – Lingotes	98,91

O material fundido foi analisado e a Tabela 6 resume os resultados obtidos em cada uma das corridas e a Tabela 7 mostra a composição esperada Liga SAE 306. Na corrida 1 (fundida com cavaco compactado desengraxado) o teor de ferro está um pouco acima do especificado (especificação de composição química para Forjasul Eletrik S.A. no item 4.1). O mesmo aconteceu com o teor de zinco para as corridas 3 e 4, fundidas com lingote e com retornos de fundição, respectivamente.

Tabela 6. Resultados da análise química da corrida 1.

Amost.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Sn	Ti	P	Al
C-1	9,06	<u>1,31</u>	3,39	0,19	<0,01	1,799	0,11	0,038	0,2051	0,0385	0,036	<0,001	83,80
C-2	9,26	1,26	3,59	0,20	<0,01	1,581	0,12	0,039	0,2413	0,0483	0,038	<0,001	83,60
C-3	8,62	1,22	3,27	0,19	0,07	<u>2,778</u>	0,07	0,044	0,2493	0,0440	0,046	<0,001	83,37
C-4	8,63	0,97	3,29	0,21	<0,01	<u>2,825</u>	0,07	0,033	0,2467	0,0765	0,061	<0,001	83,58

Tabela 7. Composição Química da Liga SAE 306 (Liga Verde): Fonte: Especificação Forjasul Eletrik S.A.

Elemento	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Ni	Ti	Outros
% máximo	9,50	4,00	1,30	2,00	0,10	0,50	0,50	0,10	0,50
% mínimo	7,50	3,00	-	-	-	-	-	-	-

A análise metalográfica dos materiais não demonstrou diferenças significativas. O material das 4 corridas apresentaram alguns pontos de formação de óxido, mas em frequência não preocupante.

A economia gerada na empresa com o processo de reciclagem do cavaco de usinagem de alumínio pode ser calculada com base nos dados apresentados. Sem a reciclagem, todo o cavaco gerado na empresa é vendido. O valor pago por ele é de R\$ 2,47 por quilo. O lingote utilizado para a fundição de peças é comprado ao preço de R\$ 8,36 por quilo. Tomando-se como base um rendimento metálico de 62,5 % e com uma produção mensal média de 2 toneladas de cavaco pode-se chegar ao seguinte valor de economia:

- Quantidade de material obtido através do processo de reciclagem, ou seja, material que deixa de ser comprado em forma de lingote mensalmente = $2000 \text{ kg} \times 62,5\% = 1250 \text{ kg}$
- Valor economizado por quilo de material reciclado = $\text{R\$ } 8,36 / \text{kg} - \text{R\$ } 2,47 / \text{kg} = \text{R\$ } 5,89 / \text{kg}$
- Valor médio economizado mensalmente = $1250 \text{ kg} \times \text{R\$ } 5,89 / \text{kg} = \text{R\$ } 7362,50$

Observa-se ainda que a borra (escória) formada pode ser vendida às empresas especializadas pelo mesmo preço que o cavaco é vendido. Portanto a reciclagem não causa prejuízos

CONCLUSÕES

Com base no que foi exposto, podemos chegar às seguintes conclusões:

- O desengraxe dos cavacos de usinagem pode ser realizado eficiente através do uso de hexano como de uma solução desengraxante de baixa alcalinidade. O primeiro processo que não atende os padrões de emissão de efluentes, e deve ser tratado. O processo de desengraxe por hexano não gera efluente, visto que o mesmo pode ser reaproveitado (por destilação), porém é um processo oneroso e deve ter cuidados especiais. Entretanto, os estudos de fundição posteriores demonstraram que esta etapa não é necessária para a reciclagem dos cavacos de usinagem.
- O processo de compactação funcionou muito bem, possibilitando a formação de blocos cilíndricos praticamente maciços. O aumento da massa específica aparente obtido foi de $0,54 \text{ g/cm}^3$ para $2,4 \text{ g/cm}^3$;
- Os estudos em forno elétrico mostraram que a fundição dos cavacos apresentou uma recuperação metalúrgica de 62-64%. A composição química e metalográfica da liga obtida é muito semelhante a do material fundido dos lingotes de liga SAE 306 empregados como padrões.
- A implantação do processo de reciclagem apresenta potencial para uma economia na obtenção de insumos pela empresa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas concedidas e a Empresa Forjasul Eletrik S.A pela apoio dado para o desenvolvimento do presente trabalho. Agradecem também ao Laboratório de Fundição (LAFUN-UFRGS) pela ajuda nos estudos de fundição e análise elementar do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 DA COSTA, C.E.; EZPINOSA, J.S.Q.; ZAPATA, W.c.; BOETTCHER, D.; ANGULSKI, J.C.; KOCH, V.E. Análise do comportamento mecânico e estrutural de compósitos de alumínio obtidos a partir da moagem de cavacos de usinagem. **56º Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais**. ABM, São Paulo, 9-14 de outubro, 1995.
- 2 DA COSTA, C.E.; ZAPATA, W.C.; BOETTCHER, D. Propriedades de compósitos extrudados de alumínio obtidos por metalurgia do pó. **Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais**. ABM, Belo Horizonte, 16-19 de julho, 2001.
- 3 FUOCO, Ricardo, **Fundição Sob Pressão das Ligas de Alumínio**, 1999.
- 4 FUOCO, Ricardo, **Curso de Fundição de Ligas de Alumínio**. São Paulo: ABAL, 1995.
- 5 GRONOSTAJSKI, J.Z. Direct recycling of aluminium chips into extruded products. **14th International Scientific Conference Advanced Materials & Technologies**, p.133-140. 1995.
- 6 SENAI-MG, **Metalurgia das Ligas de Alumínio – Fundição**, Publicação Técnica. Volume I, Belo Horizonte, 1987.
- 7 SPIM, J.^a, **Tratamentos Térmicos do Alumínio e suas Ligas**, Porto Alegre, 2003.

RECYCLING ALUMINIUM FROM THE METAL CONFORMATION SECTOR OF FORJASUL ELETRIK S.A.

*Frederico Haberkamp²
Maria Elisabete Machado³
Ivo André Homrich Schneider⁴*

Resumo

The aim of this work was to study the recycling of aluminium originated from the metal conformation sector of the Forjasul Eletrik S.A. It was evaluated possibilities to remove the oil and greases, to compact the material and to found the aluminium alloy. The process of oil and greases removal was carried out with hexane and a surfactant aqueous solution of low alkalinity (40 g/L of sodium silicate, 5 g/L of glycol, 1 g/L of the surfactant Arkopal 60, 4 g/L of H₃PO₄, and 10 g/L of NaOH). Both processes proved to be efficient, allowing 97% oil and grease removal efficiency. However, the use of the low alkalinity aqueous solution generated a wastewater containing oils and surfactants that should be treated before discharge. The compressing process developed in this work was efficient. The density of 0,54 g/cm³ of the bulk aluminium chips were compacted to a cylinder of 2,44 g/cm³ that permitted the use of the material in the foundry process. The foundry studies allowed the recycling of the material with a metallurgical recovery of 63%. The chemical and metalographic composition of the aluminium alloy obtained was inside the specifications. Finally, it is possible do conclude that aluminium chips recycling inside the company can promote a significant economy in the aluminium foundry production.

Palavras-chave: Aluminium chips; Solid waste; Recycling.

60 Annual Congress ABM – July 25th a 28th 2005, Minas Centro – Belo Horizonte

¹ *Undergraduate Student of Metallurgical Engineering – UFRGS,*

² *Graduate student PPGEM - UFRGS.*

³ *Professor – Metallurgical Engineering Departament – UFRGS*