



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
17 a 19 de novembro de 2020

A RECICLAGEM DO ALUMÍNIO POR CLASSES E SUAS VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DOS PRODUTOS

Fábio Gatamorta, fabio.gatamorta@gmail.com, UNIFACCAMP
Claudomiro Alves, miro@fem.unicamp.br, UNICAMP
Bruna Vilas Boas, bruna.vilas@ifsp.edu.br, IFSP - SOROCABA

Resumo

O Alumínio possui baixa densidade e boas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Outra característica para seu maior protagonismo está relacionada à sustentabilidade. O metal é 100% reciclável e, dentre todo Alumínio produzido nos últimos 100 anos, aproximadamente 75% ainda é utilizado. O Brasil produz mais de 55% de produtos em Alumínio obtidos a partir da reciclagem, valor muito superior à média mundial de 25%. A reciclagem impacta não só na preservação de recursos naturais como na redução do consumo de energia. Sua utilização consome apenas 5% da energia necessária para produção do alumínio primário reduzindo em 90% a emissão de CO₂. Atualmente a reciclagem envolve 20 tipos de sucatas em função do perfil dentro de grupos. O grau de impurezas pode variar entre 2 e 5%. Não existe um controle preciso sobre a composição dos materiais dentro de cada grupo e ocorrem, além disso, um aumento da contaminação por ferro pelos métodos empregados na reciclagem. A maior precisão de controle no processo melhora, portanto, o ciclo de vida dos produtos melhorando a sustentabilidade da indústria. O objetivo do trabalho é analisar objetivamente a influencia da variação de composição na resistência mecânica do Alumínio reciclado a partir de 3 diferentes classes de sucata: chaparia (chapas), perfis mistos e cabos sem alma de aço. Para realização das análises os materiais foram fundidos separadamente em forno resistivo com os lingotes caracterizados quanto à sua composição química e ensaios mecânicos segundo a norma ASTM E8M-15a. A partir dos resultados, foi realizado uma análise fatorial no *software Mini-Tab*, que revelou uma forte correlação entre a variação da composição química e dos teores de ferro e os valores de propriedades das 3 classes de sucata.

Palavras-chave: Alumínio, reciclagem, sustentabilidade, ciclo de vida.

1. Introdução

O alumínio é o metal não ferroso mais consumido no mundo. O Brasil é o terceiro maior produtor de Alumina e o quarto maior produtor de bauxita. Essa posição é obtida em função das grandes reservas do minério encontradas em Minas Gerais e no Pará. O minério de bauxita é a matéria prima utilizada para a produção do Alumínio primário e a alumina é subproduto no processo de obtenção do Alumínio. Em contraste a essas posições o país ocupa apenas o décimo quarto lugar entre os maiores produtores de Alumínio primário com valores muito influenciados pela alta escala de reciclagem inserida na produção. (ABAL, 2020).

A maioria dos produtos obtidos a partir do Alumínio utiliza ligas metálicas em detrimento do metal puro. Essa característica é apoiada no fato de que suas propriedades físicas e mecânicas são alteradas quando são adicionados elementos de ligas como Cobre, Ferro, Magnésio, Manganês, Silício e Zinco (CALLISTER, 2012).



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
17 a 19 de novembro de 2020

A reciclagem do alumínio utiliza apenas 5% da energia utilizada na produção do Alumínio primário que é aquele obtido a partir da matéria-prima virgem composta pela bauxita (CALDERONI, 2003). Além disso, o processo emite apenas 10% de gás de efeito estufa durante o processo e o ciclo de reciclagem dos produtos obtidos indica que este metal pode ser reciclado infinitas vezes (ABRALATAS, 2005).

O processo utilizado para a reciclagem do Alumínio no Brasil tem como principal matéria prima as sucatas de embalagens de refrigerantes e cervejas. Os processos de reciclagem envolvem etapas de separação de impurezas, corte das latas e fusão do material. Com relação aos demais produtos que contem o Alumínio o processo de fusão mantém a separação em classes de sucatas sem um controle sobre a liga utilizada (RECICLOTECA, 2020).

2. Fundamentação teórica

A presença de elementos de ligas ou de elementos residuais é inerente aos processos de fabricação pelas próprias características envolvidas. No caso dos processos metalúrgicos, que são a uma etapa dos produtos primários, a presença da alta temperatura proporciona um aumento das reações químicas com a incorporação/diminuição de elementos químicos e a presença de porosidade nos produtos (MEDRANI, 2018). No caso dos processos mecânicos que se utiliza dos produtos primários e que podem, eventualmente, passar por processos posteriores a presença de mecanismos de difusão podem participar do processo em função da temperatura e da solubilidade dos elementos envolvidos.

O ferro possui solubilidade máxima no alumínio de 0,05% em massa e dessa forma permite a formação de novas fases acima dessa composição. A presença do ferro que é um átomo intersticial no alumínio ocorre na forma de um intermetálico que no caso das ligas de Alumínio são consideradas como um fator negativo. Esses intermetálicos formados estão em solução sólida estável e são de difícil dissolução. Nas ligas Alumínio-Silício com composições que se aproximam do eutético, no entanto, a adição de ferro apresenta vantagens em algumas propriedades (ALVES, 2016).

No caso das embalagens, o fato de todas pertencerem à mesma classe não interfere na composição química porque todos os produtos são fabricados com a mesma composição da liga com pequenas variações entre as latas. Quando utilizado o critério de separação em classes para produtos que não são as latas de alumínio, a composição nos grupos permite uma grande variação nas ligas utilizadas. Uma unificação das nomenclaturas e nas simbologias facilitaria a comunicação garantindo transparência às operações comerciais da cadeia para fusão de produtos com a mesma liga. Desse modo o controle seria preciso sobre a composição, controlando os teores de ferro (INRI, 2020; CEMPRE, 2020).

3. Metodologia

Para a produção das amostras foram utilizados três classes de sucatas: chaparia (chapas), perfis mistos e cabos sem alma de aço que foram separadas em porções de 1000 gramas e tiveram sua massa medida em uma balança eletrônica de precisão. Esse procedimento foi realizado para garantir que a diferença entre os valores da média das amostras estivessem estatisticamente dentro de valores de desvio admitidos.



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
17 a 19 de novembro de 2020

Para determinação da temperatura de vazamento foram utilizados os valores de referência obtidos a partir da literatura (MATWEB, 2020). O superaquecimento escolhido foi de aproximadamente 10% para evitar a oxidação excessiva e as condições de solidificação escolhidas foram a de solidificação convencional com lingoteiras pré-aquecidas a 200°C. Para a produção dos corpos de prova do material fundido foram utilizados moldes metálicos (lingoteiras) de aço SAE1045. As lingoteiras e as amostras de sucata foram aquecidas em uma estufa a uma temperatura de 150°C para retirada total de umidade que pudesse apresentar risco de acidentes durante o vazamento.

Após a total secagem do material, as lingoteiras foram retiradas da estufa e posicionadas em uma caixa de areia para o vazamento. As amostras de sucata de cada um dos grupos foram colocadas separadamente no interior de cadinhos de carbetto de silício e levados ao forno com temperatura de 720°C até que atingisse o estado líquido. O superaquecimento do Alumínio nessa temperatura é de aproximadamente 40°C acima do indicado para fusão.

No procedimento de vazamento houve a retirada da camada de óxido formada na superfície do material líquido antes que ocorresse o vazamento. O material fundido permaneceu dentro das lingoteiras resfriando em temperatura ambiente até a desmoldagem. A etapa posterior foi a de desmoldagem onde o material fundido foi quantificado por sua massa para posterior comparação. Foram em seguida retiradas amostras para análise química. A Figura 1 apresenta o procedimento de vazamento.



Figura 1: Procedimento de vazamento do material fundido a partir da sucata de alumínio utilizado no trabalho.

Após a produção dos lingotes todas as amostras foram identificadas e tiveram novamente sua massa medida. O objetivo dessa etapa foi a verificação da eficiência do processo empregado na reciclagem e a verificação dos percentuais obtidos. As medidas foram obtidas em uma balança eletrônica de precisão.



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 17 a 19 de novembro de 2020

Para a análise da composição química 3 amostras de cada grupo fundido foram analisadas por espectrometria de emissão atômica (EEA). Os valores médios foram tabelados com o desvio padrão para de cada elemento analisado. A caracterização mecânica dos materiais foi obtida a partir de corpos de prova cilíndricos normalizados de tração obtidos a partir dos lingotes de cada grupo. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios e sala de teste com temperatura controlada para valores entre 19°C a 21°C e umidade relativa do ar de 50%. Os corpos de prova seguiram a norma ASTM E8M-15a e a velocidade de ensaio foi fixada em 5mm/s com limite de 100 KN de força, e deformação máxima até a ruptura. A resistência mecânica, tensão de escoamento e alongamento foram determinadas de acordo com a norma ASTM E8M-15a. Os resultados foram apresentados sob a forma de um gráfico de valores médios obtidos no *software Origin8®*. Para uma melhor visualização dos valores numéricos os resultados também foram apresentados sob a forma de uma tabela.

4. Resultados

A tabela 1 apresenta os valores das medidas de massa obtidos nas porções de sucata durante o processo de reciclagem. Pode ser observada a variação por perdas na oxidação durante o processo que se mostrou mais proeminente na classe dos cabos. Essa classe que também é a classe que apresenta maior variação entre as amostras e que pode estar ligada às altas quantidades de elementos de liga na amostra e que favorecem a formação de fases não metálicas. Ela também possui maior área de superfície que favorece a oxidação. Para um estudo mais completo dessa influencia um estudo específico é necessário.

Tabela 1: valores de medida de massa do material reciclado antes e após o processo

Classe	Massa (g) ¹	Massa (g) ²	Variação (%)	Desvio Padrão
Chaparia (chapas)	1005,67	967,67	3,78	0,66
Perfil misto	1003,00	933,50	6,93	0,65
Cabos sem alma	1003,33	853,83	14,90	1,95

1 - massa da sucata;

2 - massa do produto;

A tabela 2 apresenta os valores de composição química encontrados nas amostras analisadas indicando os valores das médias para cada elemento químico. Pode ser observada uma grande variação entre as composições de todas as amostras. Essa característica evidencia a necessidade de uma metodologia mais apropriada para a separação entre as classes ou series para diminuir a diversidade na presença de elementos químicos. Para efeito prático aos valores incluídos na tabela foram considerados apenas para valores relativos superiores a 0,01 em pelo menos um dos grupos.

Tabela 2: Valores de composição química dentro dos grupos nas classes de sucata utilizados.

Classe	Al	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Ti	Pb
Chaparia (chapas)	98,00	0,81	0,01	0,48	0,22	0,19	0,21	0,02	0,02
Perfil misto	99,53	0,14	0,01	0,10	0,13	0,01	0,02	0,05	0,01
Cabos sem alma	88,57	5,21	0,17	0,27	0,16	0,01	3,00	0,16	-



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 17 a 19 de novembro de 2020

A figura 2 apresenta as curvas médias obtidas nos ensaios de tensão *versus* deformação realizada nas amostras obtidas dentro dos grupos nas classes de sucata utilizadas no trabalho. Pelo gráfico, é possível observar que o maior valor de resistência é observado na classe dos cabos sem alma. Essa característica pode estar associada aos elevados valores de elementos de liga dentre os quais o Silício que é um elemento que, no Alumínio, promove o aumento da resistência mecânica. O grupo que apresenta os menores valores de resistência é encontrado na classe dos perfis mistos.

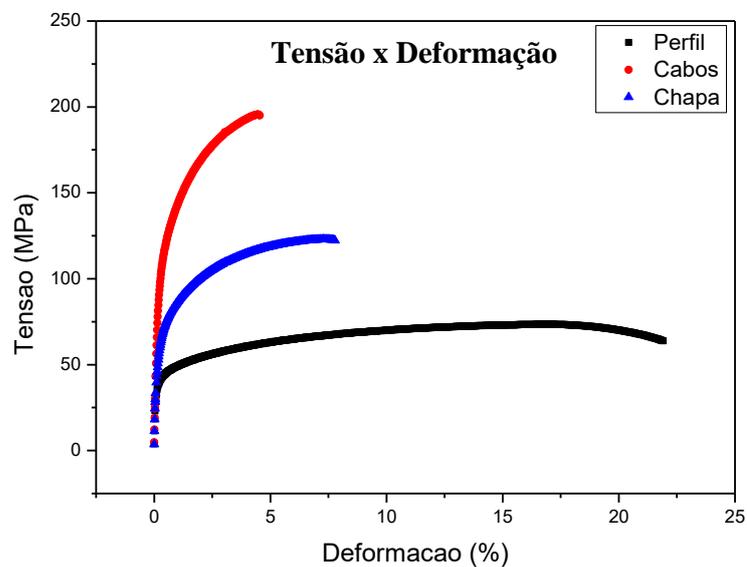


Figura 2: curvas médias de tração encontradas dentro dos grupos nas classes de sucata utilizados para o trabalho.

O gráfico apresenta também elevado valor de deformação dentro da classe do perfil misto. Essa característica está provavelmente associada aos baixos teores de elementos de liga que aumentam a plasticidade do material pela menor presença de fases no material produzido.

Tabela 3: Valores de propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios Tensão X Deformação encontrada nas classes de sucata utilizada para o trabalho

Classe	Tensão Máxima (Mpa)	Tensão de Ruptura (Mpa)	Deformação Máxima (%)
Cabos sem alma	193	110	4
Chaparia (chapas)	145	80	7,5
Perfil misto	73	52	22

Os valores médios de Tensão máxima, Deformação máxima e Tensão de ruptura são apresentados na tabela 3. Os valores encontrados foram comparados com os valores de tensão média das faixas observadas na literatura (MATWEB, 2020).



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 17 a 19 de novembro de 2020

Na classe dos cabos o valor de Tensão máxima e Tensão de ruptura são compatíveis com os valores das ligas da série 3000 (Alumínio-Manganês) apresentando, no entanto, valores de deformação muito inferiores aos valores médios das ligas dessa série. Na classe das chapas mistas o valor de Tensão máxima e Tensão de ruptura são levemente superiores aos valores das ligas da série 1000 (Alumínio comercialmente puro) apresentando também os valores de deformação inferiores. Na classe dos perfis mistos o valor de Tensão máxima e Tensão de ruptura também são próximos aos valores do alumínio comercialmente puro apresentando aqui valores de deformação proporcionais (ABNT/CB-035, 2010).

A figura 3 apresenta os gráficos de análise fatorial para os efeitos principais nos valores de tensão máxima. É possível observar pelo gráfico que o percentual de ferro não acompanha o desempenho da mudança das classes.

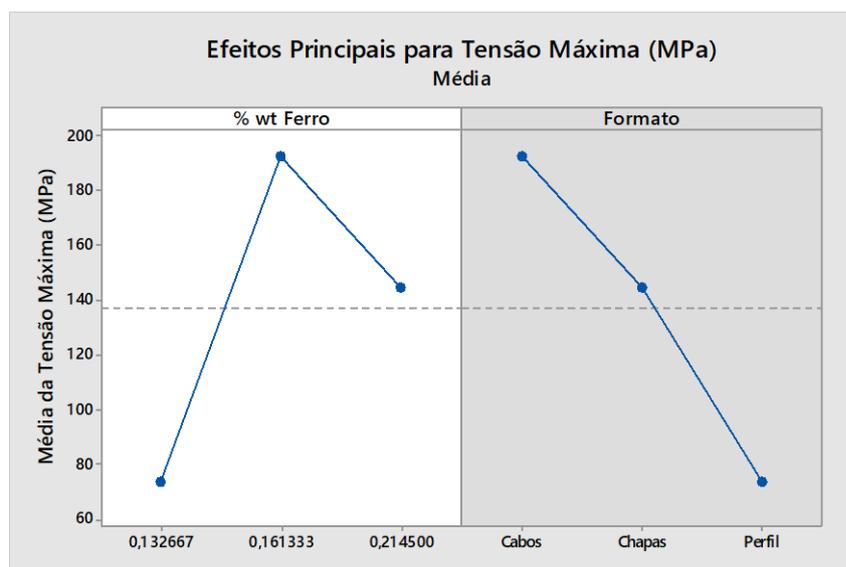


Figura 3: Gráficos de análise fatorial dos efeitos principais nos valores de tensão máxima para os parâmetros formato (classe) composição química de ferro.

Para valores percentuais de ferro crescentes a partir a influencia do elemento cresce de 0,13% para valores para 0,16%. Esse aumento já foi observado anteriormente e é explicado pela presença de Manganês (presente na composição da classe as chapas). A presença desse elemento auxilia na formação de intermetálicos α -Fe e são menos prejudiciais que a fase intermetálicos β -Fe por sua morfologia. Sua presença sempre é sempre positiva na formação de estruturas fundidas (TASH, 2007). A partir de valores de 0,16% ocorre a diminuição da influencia do teor de Fe nos valores para Tensão máxima dos corpos de prova ensaiados. Outra vez a presença do Manganês na classe dos perfis mistos acentua a tendência observada.

A figura 4 apresenta os gráficos de análise fatorial para os valores de tensão de ruptura. O gráfico acompanha o desempenho observado na análise de tensão máxima e mostra a interferência direta da composição nos valores de Tensão.



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 17 a 19 de novembro de 2020

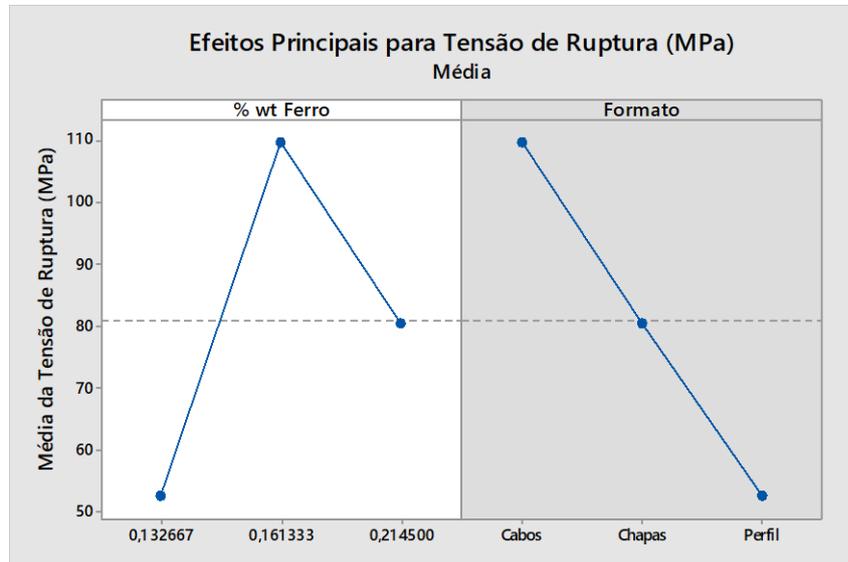


Figura 4: Gráficos de análise fatorial dos efeitos principais nos valores de tensão de ruptura para os parâmetros formato (classe) composição química de ferro.

A análise mostra que os teores crescentes no teor de ferro apresentam poucos efeitos nas tensões de rupturas. Essa correlação pode estar relacionada a grande variação de composição química e a formação de fases diversas ocasionada pela grande variação de elementos.

5. Conclusões

Os resultados mostram que a divisão utilizada para as classes de sucata não permitem um controle adequado sobre os fundidos obtidos diretamente nos processo de reciclagem;

A variação de composição química na reciclagem acarreta em uma variação nos valores de aproveitamento do processo diminuindo seu rendimento;

A variação apresentada na composição química final dos materiais reciclados esta relacionada à variação nas propriedades mecânicas em cada uma das classes e os valores encontrados podem ser associados nas séries previstas pelas normas;

A análise fatorial mostrou uma forte correlação entre a variação do teor de ferro e os valores de propriedades mecânicas dentro de ligas com composições semelhantes;

A criação de uma metodologia de classificação de sucatas baseadas em grupos de composição química contribui para a sustentabilidade dinamizando o processo de reciclagem através da valorização dos recursos naturais.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado e suportado pelo Centro Universitário Campo Limpo Paulista e teve a colaboração da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Campus Sorocaba.



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas
V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
17 a 19 de novembro de 2020

7. Referências bibliográficas

ABAL. **Associação brasileira do Alumínio**, 2020. Perfil da indústria. Disponível em: <http://abal.org.br>. Acesso em: 31 out. 2020.

ABNT/CB-035. **Alumínio, Alumínio e suas ligas – Composição química**, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, Brasil, 2010.

ABRALATAS. **Associação brasileira dos fabricantes de latas de alta reciclabilidade**. Reciclagem. Disponível em: www.abralatas.org.br. Acesso em: 31 out. 2020.

ALVES, C. ; VILAS BOAS, B. ; SEPTIMIO, R. S. ; GATAMORTA, F. **Influence of iron contents on the tixoability of AA 356 Aluminum Alloy**. In: XV Brazilian MRS Meeting - SBPMAT, 2016, Campinas. XV Brazilian MRS Meeting, 2016.

ASTM E8 / E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

CALDERONI, Sabetai; Os Bilhões Perdidos no Lixo, 4ª Edição, São Paulo, Editora Humanitas – USP, 2003

CALLISTER, JR, W.D.; Ciência e engenharia de Materiais: Uma introdução. 8ª Ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.

CEMPRE. **Compromisso Empresarial para Reciclagem**. Disponível em: <http://cempre.org.br/sobre/id/1/institucional>. Acesso em: 31 out. 2020.

ISRI. **Institute of Scrap Recycling**, aluminum-advantages. Disponível em: <http://www.drivealuminum.org>. Acesso em: 31 out. 2020.

MATWEB. **Material property data**. Aluminum. Disponível em: <http://www.matweb.com>. Acesso em: 31 out. 2020.

MEDRANI, T. F., OLIVEIRA, M. C., GATAMORTA, F. **Influência da umidade relativa do ar na Porosidade de rodas de liga leve**. In: X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2018, Salvador, Bahia. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2018.

RECICLOTECA. **Centro de Informações sobre Reciclagem e Meio Ambiente**. Metal-Alumínio. Disponível em: <http://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/metall/aluminio>. Acesso em: 31 out. 2020.

TASH, M.; SAMUEL, F. H.; MUCCIARDI, F.; DOTY, H. W. **Effect of Metallurgical Parameters on the Hardness and microestrutural characterization of as – cast and heat – treated 356 and 319 aluminum alloys**. Materials Science and Engineering A. 2007. V. 443. p. 185-201, 2007.