



INFLUÊNCIA DAS FONTES DE ALUMÍNIO SECUNDÁRIO NA GERAÇÃO DE ESCÓRIA: UMA ANÁLISE ESTATÍSTICA

INFLUENCE OF SECONDARY ALUMINUM SOURCES IN THE GENERATION OF SCORIA: A STATISTICAL ANALYSIS

Adriana Gresielly Fabrini Diniz, M.

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Departamento de Pós-Graduação

Avenida Monteiro Lobato s/n – km 04 – CEP 84016-210 – Ponta Grossa - Paraná

(42) 9124-1202 – adri.diniz@yahoo.com.br

Ivanir Luiz de Oliveira, Dr

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Departamento de Pós-Graduação

Avenida Monteiro Lobato s/n – km 04 – CEP 84016-210 – Ponta Grossa - Paraná

(42) 3220-4800 – ivanir@pesquisador.cnpq.br

RESUMO

A indústria de reciclagem de alumínio tem se expandido exigindo das ferramentas gerenciais adaptações a este novo segmento de mercado. Para o setor de fundição, o gerenciamento das matérias-primas é fundamental para sua sustentabilidade, alguns aspectos críticos estão relacionados à logística, disponibilidade, custos e qualidade das fontes secundárias de alumínio. Este gerenciamento está relacionado com a produtividade e rentabilidade do processo de fundição, pois influencia diretamente nas perdas de processo. Realizou-se um levantamento de dados sobre o processo produtivo de uma empresa, de pequeno porte, do ramo de fundição de alumínio secundário, situada em Ponta Grossa – Pr, que auxiliou na determinação do atual cenário organizacional em termos de geração de escória. Esta pesquisa teve por objetivo analisar estatisticamente as fontes de alumínio secundário a fim de verificar sua correlação com a geração de escória. O estudo baseou-se em 214 corridas produtivas da liga ASTM B319.1, em forno à indução. Para a análise dos dados foi utilizado o Modelo de Regressão com Variáveis Binárias. O grau de confiabilidade adotado foi de 5% e foram analisadas as corridas produtivas que apresentaram percentuais de geração de escória igual ou superior a 7%. Verificou-se que das 11 fontes de alumínio pesquisadas, 2 apresentaram correlação positiva com a geração de escória: latas e painéis. Os resultados mostraram que a



adição destas matérias-primas eleva a probabilidade de geração de escória acima da média estabelecida em 7,68 e 3,76 vezes respectivamente. Porém, a análise qualitativa através de gráficos de dispersão, apontou que em corridas onde a adição de panela foi superior a 10%, há tendência de correlação negativa em relação à geração de escória. Desta forma, para uma organização que objetiva elevar os índices de produtividade e rentabilidade através da redução da geração de escória, sugere-se a utilização controlada de latas e a adição de panelas em níveis superiores a 10%.

Palavras-chave: reciclagem de alumínio, resíduos sólidos, produtividade e rentabilidade.

ABSTRACT

The industry of aluminum recycling has grown and is demanding some adaptation from the management tools concerning this new segment of the market. For the foundry sector, the management of raw materials is fundamental for its sustainability, some critical aspects are related to logistics availability, costs and quality of secondary aluminum sources. The aforementioned management is related to the productivity and profitability of the foundry process, because it has a direct influence on process losses. Data analysis on the production process has been conducted at a small company of secondary aluminum foundry field located in Ponta Grossa – PR. The analysis has aided to establish the current organizational scenario in terms of scoria generation. This research aimed to statistically analyze the sources of secondary aluminum in order to verify its correlation with the scoria generation. The study was based on 214 production flows of the ASTM B319.1 alloy in induction oven. The Regression Model with Binary Variables was used in order to analyze the data. The degree of liability adopted was 5% and the productive flows that featured scoria generation percentage equal or higher than 7% were analyzed. It has been verified that out of the 11 aluminum sources researched, 2 featured positive correlation with the scoria generation: tins and pots. Results showed that the addition of these raw materials increases the probability of scoria generation above the established average at rates of 7,68 and 3,76 times respectively. However, the qualitative analysis based on dispersion graphics pointed out that in flows where the addition of pot was higher than 10%, there is a tendency of negative correlation in relation to the scoria generation. Thus, for an organization that aims to increase the indices of productivity and profitability through the reduction of scoria generation, the use of controlled tins and addition of pots at levels higher than 10% is advisable.

Key Words: Aluminum recycling, solid residue, productivity and profitability.

1. INTRODUÇÃO

A partir dos anos 90, com a globalização alcançando seu pico e as inovações tecnológicas em franca expansão, houve uma elevação, por parte das empresas, na consciência ambiental, o que permitiu o aperfeiçoamento e desenvolvimento de normas e ferramentas de gestão ambiental, destacam-se a ISO (*International Organization for*



Standardization) 14.000, Avaliações do Ciclo de Vida, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Ecologia Industrial, *Zero Emission Research Initiative* - Zeri, entre outros, Porém, não se pode negar que a falta de conhecimento, recursos ou consciência, muitas vezes excluem empresas de agregarem às suas rotinas iniciativas e ações voltadas à preservação e sustentabilidade ambiental.

Artifícios desenvolvidos a fim de pressionar as empresas a buscarem formas de minimização dos impactos ambientais causados por seus processos produtivos contemplam legislações, tratados, acordos e convenções nacionais ou internacionalmente fixadas. Estes artifícios também se perpetuaram mais rapidamente a partir dos anos 90, principalmente após a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente realizado no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro em 1992.

Atualmente as questões ambientais são tratadas por algumas organizações como diferencial competitivo e agregação de valor aos produtos ou serviços. Esta visão rentável do gerenciamento ambiental ocorreu após amplas pressões de Organizações Não Governamentais – ONG, opinião pública e principalmente pelos consumidores.

Estratégias de gerenciamento ambiental agregam valor aos produtos, pois eleva a produtividade de uma organização através da otimização do processo produtivo, desenvolvimento de produtos ambientalmente sustentáveis ou com matérias-primas recicladas e a redução, eliminação ou reaproveitamento dos resíduos gerados.

O presente estudo objetivou identificar as fontes de alumínio secundário utilizadas como matéria-prima pelas empresas de fundição de alumínio secundário, que afetam diretamente a geração de resíduos sólidos acima da média tolerada pela organização, utilizando-se como base o modelo estatístico de Regressão com Variáveis Binárias.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O PROCESSO PRODUTIVO DO ALUMÍNIO SECUNDÁRIO

As fontes de alumínio secundário derivam-se de duas vertentes: o alumínio de origem industrial que representa 12% da sucata total que é formado por retalhos gerados dentro das próprias fábricas e por usuários que reprocessam o alumínio. E o alumínio pós-consumo, que corresponde a materiais consumidos e que chegaram ao final de sua vida útil. (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - MCT, 1993).



O Brasil é líder mundial na reciclagem de latas de alumínio, em 2006, 94,4% retornou ao mercado na forma de matéria-prima para novos produtos. Este percentual representa um total de 139,1 mil toneladas. (ABAL, 2007, d)

O custo de produção de um lingote de alumínio secundário é aproximadamente 80% menor que a produção de um lingote de alumínio primário, a produção de um lingote de alumínio secundário representa 5% do gasto energético da produção de um lingote de alumínio primário, a cada tonelada de alumínio reciclado aproximadamente quatro toneladas de bauxita são poupadas da extração e o elevado valor do alumínio serve de fonte de renda extra para aqueles que se dispõem a coletá-lo (MCT, 1993). O reprocessamento garante uma elevação na capacidade dos aterros sanitários além de estimular a consciência ecológica e incentivar a reciclagem de outros materiais. (ABAL, 2004, a)

Para se avaliar o impacto social da reciclagem, vale ressaltar que o volume de latas de alumínio reciclado em 2004 significou uma injeção de R\$ 450 milhões na economia nacional através da compra, pelas indústrias, das latas usadas e coletadas pelos catadores. O nível de reciclado daquele ano (270 mil toneladas) se traduziu em uma economia de aproximadamente 3.900 Gwh/ano, ou seja, 1% de toda a energia elétrica gerada no país. De toda sucata de alumínio produzida anualmente, o Brasil recicla cerca de 37%, um bom desempenho comparado com os níveis mundiais que são de aproximadamente 32% (ABAL, 2004, a).

Industrialmente as fontes de alumínio são classificadas seguindo as necessidades de cada organização. A ABAL (2006, c) adota a classificação recomendada pelo *Institute of Scrap Recycling Industries* (ISRI), conforme Tabela 1):

Quadro 1 – Classificação de Sucatas de Alumínio

Tipo	Descrição
Bloco	Blocos de alumínio isentos de contaminantes (ferro e outros), com teor de 2% de óleos e/ou lubrificantes.
Borra	Borra de alumínio com teores variáveis e percentual de recuperação a ser estabelecido entre vendedor e comprador.
Cabo com alma de aço	Retalhos de cabos de alumínio não ligados, usados, com alma de aço.
Cabo sem alma de aço	Retalhos de cabos de alumínio não ligados, usados, sem alma de aço.
Cavaco	Cavacos de alumínio de qualquer tipo de liga, com teor máximo de 5% de umidade/óleo, isentos contaminantes (ferros e outros).
Perfil	Retalhos de perfis sem pintura
Chaparia	Retalhos de chapas e folhas, pintadas ou não, com teor máximo de 3% de impurezas (graxas, óleos, parafusos, rebites etc.); chapas usadas de ônibus e baús, pintadas ou não; tubos aerossol (sem cabeças); antenas limpas de TV; cadeiras de praia limpas (isentas de plástico, rebites e parafusos).
Chaparia mista	Forros, chapas decorativas e persianas limpas (sem corrosões ou outras impurezas).

Continua



Continuação

Chapas off-set	Chapas litográficas soltas, novas ou usadas, da série 1000 e/ou 3000, isentas de papel, plástico e outras impurezas.
Estamparia branca	Retalhos de chapas e folhas, sem pintura e outros contaminantes (graxas, óleos, parafusos, rebites etc.) gerados em atividades industriais.
Latas prensadas	Latas e alumínio usadas decoradas, prensadas com densidade entre 400kg/m ³ , com fardos paletizados ou amarrados em lotes de 1.500kg, em média, com espaço para movimentação por empilhadeira, teor máximo de 2,5% de impurezas, contaminantes e umidade.
Latas soltas ou enfardadas	Latas de alumínio usadas decoradas, soltas ou enfardadas em prensa de baixa densidade (até 100 kg/m ³), com teor máximo de 2,5% de impurezas, contaminantes e umidade.
Panela	Panelas e demais utensílios domésticos (“alumínio mole”), isentos de cabos – baquelita, madeira etc. – e de ferro – parafusos, rebites etc.
Perfil branco	Retalhos de perfis sem pintura ou anodizados, soltos ou prensados, isentos de contaminantes (ferro, graxa, óleo e rebites).
Perfis mistos	Retalhos de perfis pintados, soltos ou prensados, com teor máximo de 2% de contaminantes (ferro, graxa, óleo e rebites).
Pistões	Pistões automotivos isentos de pinos, anéis e bielas de ferro, com teor máximo de 2% de óleos e/ou lubrificantes.
Radiador alumínio-alumínio	Radiadores de veículos automotores desmontados isentos de cobre, “cabeceiras” e outros contaminantes (ferro e plástico).
Radiador alumínio-cobre	Radiadores de veículos automotores desmontados isentos de “cabeceiras” e outros contaminantes (ferro e plástico).
Retalho industrial branco de chapa para latas	Retalho de produção industrial de latas e tampas para bebidas, soltos ou prensados, isentos de pinturas ou impurezas.
Retalho industrial pintado de chapa para latas	Retalho pintado de produção industrial de latas e tampas para bebidas, soltos ou prensados, isentos de impurezas.
Telhas	Retalhos de telhas de alumínio, pintados em um ou em ambos ou lados, isentos de parafusos ou rebites de ferro, revestimentos de espuma ou assemelhados.

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (a). Tabela de classificação de sucatas de alumínio. 2ª ed. São Paulo: Abal, 2006.

Estas sucatas são utilizadas pela indústria de fundição de alumínio secundário como matéria-prima para produção de diversos tipos de ligas secundárias, verifica-se que a Tabela 1 limita o percentual de impurezas e contaminantes presentes em algumas fontes, porém este percentual muitas vezes não é considerado devido à dificuldade de se analisar quimicamente todas as matérias-primas adquiridas. São exemplos de contaminantes: umidade, óleos, tintas aderentes, elementos de liga, entre outras.

Para se demonstrar a contaminação que estes materiais sofrem durante seu processo de consumo, cita-se a presença do elemento químico cálcio (Ca) durante a fusão. Male *et al* (2005) afirma que não há a introdução deste elemento durante a fusão do alumínio primário, porém durante a fusão do alumínio secundário, este elemento está presente com teor de até 0,005%. Além do cálcio, outros elementos contaminantes podem ser encontrados: nitreto de boro (BN), carbeto de silício (SiC), entre outros. Por esta razão, testes laboratoriais são



imprescindíveis, a fim de quantificar os elementos químicos presentes no metal líquido e identificar a necessidade de correção da liga pretendida.

Estes contaminantes além de alterarem o potencial de aplicação das ligas produzidas, elevam a possibilidade de perdas de processo.

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS ORIUNDOS DO PROCESSO PRODUTIVO DO ALUMÍNIO SECUNDÁRIO

Os resíduos sólidos são classificados quanto às suas características físicas, químicas e origem, esta classificação se faz necessária para se definir sua classe e desta forma indicar a forma mais adequada para armazenagem ou destinação dos diferentes tipos de resíduos. Para o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas possui a norma NBR 10.004/2004, estabelece os níveis de periculosidade e as alternativas mais adequadas para destinação dos mesmos, podendo enquadrar-se em três classes:

- classe I: perigosos – apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, exigindo tratamento e disposição especial, pois são classificados como: inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e patogênicos;

- classe II A: não-inertes – não apresentam periculosidade, porém podem ter características como: combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água. Esta classe é composta basicamente pelos lixos domésticos;

- classe II B: inertes – estes resíduos não se degradam ou não se decompõe quando dispostos no solo. Quando estes resíduos são depositados na água, sua potabilidade não é comprometida.

A escória do alumínio é um resíduo industrial de classe I, pois os efeitos do alumínio no organismo humano vão desde anemia por deficiência de ferro à intoxicação crônica. (AMBIENTE BRASIL, 2007). Segundo a norma NBR 10.004/2004, os materiais classificados neste grupo devem ser tratados adequadamente e destinados em locais próprios. Para o recebimento deste tipo de resíduo, os aterros industriais devem conter mantas impermeáveis e camadas a fim de proteger o solo e a água da contaminação.

Segundo a ABAL (2007, b), a atividade de reciclagem do alumínio gera grandes quantidades de escória. Estimou-se que no ano de 2005, o Brasil tenha produzido aproximadamente 50.000 toneladas de escória, uma elevação de 25% em relação ao nível de 1996, que foi de aproximadamente 40.000 toneladas.



Durante o processo de fusão, há a exposição do metal líquido à temperatura do forno e também à atmosfera, esta combinação de fatores resulta em uma camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) na superfície do banho. A composição química desta camada varia grandemente, pois depende basicamente da liga que está sendo produzida e da manipulação das matérias-primas necessárias para o processo, mas basicamente a escória é composta por: óxido de alumínio (25 a 30%), alumínio metálico (65 a 75%), carvão de alumínio (2 e 3%), nitreto de alumínio (3 a 5%), óxido de ferro (0,5 a 2%) e óxido de silício (0,5 e 1,5%). (ABAL, 2007, b)

Verifica-se que o maior percentual presente na escória é de alumínio metálico. A fixação do alumínio metálico à escória se deve a diversos fatores que serão apresentados no item 2.3.

2.3 FATORES QUE AFETAM A FORMAÇÃO DE ESCÓRIAS

A escória é formada principalmente em função da oxidação do metal líquido. A espessura da camada depende fundamentalmente da temperatura em que se encontra o banho líquido. A temperatura ótima de fusão do alumínio oscila entre 700 e 750°C, maiores temperaturas tendem a elevar a espessura da camada de óxido de alumínio durante o processo de fundição. (ABAL, 2007, b)

Outro fator preponderante na geração de escória é a composição química do metal. A presença de magnésio (Mg) na liga de alumínio facilita a geração de escória, pois o magnésio é sensível à oxidação. (ABAL, 2007, b) Ou seja, quanto maior o percentual de magnésio presente em uma liga, maior será a perda de produtividade daquele processo. Um dos materiais recicláveis de alumínio que apresentam teores elevados de magnésio são as latas.

Segundo a ABAL (2007, b), as perdas de produtividade da indústria de transformação do alumínio variam de 0,5 a 1,5% nos processos de fusão do alumínio primário e de 2,0 a 7,5% nos processos oriundos da transformação do alumínio secundário.

Um terceiro fator importante para as perdas de produtividade neste setor é a área da fonte a ser fundida. A oxidação ocorre em maior grau quanto maior for a relação área/peso do material, ou seja, quanto menor a espessura do material a ser fundido, maior será a sua oxidação naquele banho e conseqüentemente maior será a geração de resíduos. (ABAL, 2007, b)

Desta forma, um sistema de gerenciamento deve analisar as diversas variáveis que influenciam a eficiência do processo.



2.4 MODELOS DE REGRESSÃO COM VARIÁVEIS BINÁRIAS

Quando as variáveis do processo são de natureza qualitativa como sexo, raça, cor, religião e devem ser incluídas no modelo, pois podem ter influências significativas no resultado do processo, podem ser utilizados os Modelos de Regressão com Variáveis Binárias.

Na literatura, este tipo de variável é denominada variável nominal, pois representam a presença ou ausência de determinada característica. Desta forma, a quantificação desta variável assume dois valores, 0 e 1, onde segundo Gujarati (2006, p. 241) “o 1 indicando a presença desse atributo e o 0 indicando sua ausência”. A partir da quantificação das variáveis nominais, elas passam a ser denominadas como variáveis binárias.

Hill (2003, p. 427), afirma “esses modelos estatísticos são úteis em qualquer problema econômico em que um agente deva escolher uma dentre duas alternativas”.

Tendo como objetivo encontrar a probabilidade de um indivíduo tomar determinada decisão em detrimento de outra. Desta forma, segundo Gujarati (2006, p. 470), “nosso objetivo é encontrar a probabilidade de que algo aconteça”.

Pindyck e Rubinfeld (2004, p. 344) acrescentam que “desejamos encontrar a relação entre um conjunto de atributos descrevendo um indivíduo e a probabilidade de que o indivíduo faça dada escolha”.

Gujarati (2006) afirma que há três abordagens diferentes para formular um modelo estatístico com variáveis binárias. O primeiro deles, denominado Modelo de Probabilidade Linear, é formulado exatamente como uma regressão linear típica, contudo, as variáveis são expressas de forma binárias, conforme Equação 1.

Equação 1 – Modelo de probabilidade linear

$$P_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon$$

Onde:

P_i é a probabilidade de ocorrência de um fenômeno;

X_i é o i -ésimo valor da variável preditora;

α e β são os parâmetros e;

ε_i é o termo do erro aleatório

Os principais problemas envolvidos com a utilização deste modelo estão na possível ausência de normalidade dos termos de erro (ε_i), a impossibilidade de satisfazer $0 \leq P_i(Y_i/X) \leq 1$ e quando o valor de R^2 como medida de qualidade do ajustamento é questionável.



O segundo modelo possível é aquele denominado Logit. Utilizado quando a probabilidade de ocorrência varia de $-\infty$ para $+\infty$, ou seja, segundo Gujarati (2006, p. 481), “embora as probabilidades se situem (por necessidade) entre 0 e 1, os logits não são submetidos a essa restrição”. Além disso, “enquanto o modelo de probabilidade linear pressupõe uma relação linear entre P_i e X_i , o modelo Logit pressupõe que o logaritmo da razão de chances se relaciona linearmente com X_i ”.

Segundo Pindyck e Rubinfeld (2004, p. 354), o “modelo logit se baseia na função de probabilidade logística acumulada e é especificado conforme Equação 2.

Equação 2 – Modelo de probabilidade logit

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta X_i)}}$$

Onde:

P_i é a probabilidade de ocorrência de um fenômeno;

X_i é o i -ésimo valor da variável preditora;

α e β são os parâmetros e;

ϵ_i é o termo do erro aleatório

E o terceiro modelo possível é denominado Probit, formulado com as mesmas características do Logit, porém neste utiliza a função logística acumulada e aquele utiliza função normal acumulada padronizada. O modelo Probit é expressão pela Equação 3.

Equação 3 – Modelo de probabilidade probit

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_i} e^{-s^2/2} ds$$

Onde:

P_i é a probabilidade de ocorrência de um fenômeno;

Z_i é uma variável aleatória com distribuição normal e;

e é uma função logística.

Para testar o ajustamento dos modelos de probabilidade Logit e Probit, alguns programas estatísticos, geram automaticamente testes que auxiliam o pesquisador na verificação da qualidade do ajustamento dos dados ao modelo escolhido. Estes testes são denominados: *P-value*, *Pearson* e *Hosmer-Lemshow*.



A observação cuidadosa do ajustamento dos dados ao modelo pretendido é fator crítico para obtenção de resultados que se assemelham muito com a realidade que se pretende pesquisar ou retrata de forma matematicamente aceitável o perfil de uma população.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 OBJETO DE PESQUISA

O objeto que norteou a pesquisa, a confecção do instrumento de coleta de dados, o apontamento do modelo estatístico para interpretação dos dados, as análises e discussões acerca dos resultados obtidos, foi o resíduo sólido gerado pelas indústrias do setor a partir do processamento da liga ASTM B319.1, equivalente a liga SAE 329, sob a forma de lingotes. Este resíduo foi escolhido para o estudo por representar diretamente o nível gerencial do processo produtivo, servindo como indicador tanto para qualificar quanto para apontar possíveis melhorias de processo.

A composição química da liga estudada, segundo a norma NBR 13180/1994 pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Esta liga foi escolhida por ser amplamente utilizada pela indústria incluindo a automobilística, é possível de ser obtida por materiais recicláveis, porém apresenta menor preço de mercado, o que exige um elevado controle de processo e de matérias-primas a fim de maximizar sua produtividade.

Tabela 1 – Composição química da liga ASTM 319.1 segundo NBR 13180/1994

Silício%	Ferro%	Cobre%	Manganês%	Magnésio%	Níquel%	Zinco%	Titânio%	Outros%
5,5 a 6,5	1	3 a 4	0,5 a 0,8	0,1 a 0,5	0,5	1	0,25	0,5

Fonte: NBR 13180/1994

3.2 LOCAL DE PESQUISA

A pesquisa foi realizada numa empresa de base tecnológica no ramo de fundição de alumínio secundário atualmente incubada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Unidade de Ponta Grossa. O local foi escolhido devido ao cunho tecnológico empregado no processo produtivo. E pelo fato de operar com estoque zero, o que garante uma melhor tomada e análise dos resultados com base no monitoramento de entradas e saídas do processo.



A facilidade na disponibilidade dos dados coletados, tanto de produção quanto financeiros, foi decisiva na escolha do local de pesquisa. Outro fator importante foi a qualidade dos dados tendo em vista o equipamento de fusão utiliza tecnologia moderna capaz de fornecer informações seguras e completas de cada lote produzido. Estes fatores foram determinantes na escolha do local da pesquisa por fornecer informações relevantes ao setor de fundição.

Com isto, foi possível levantar importantes informações como a produtividade, rentabilidade, a eficiência do processo e a influência da sazonalidade, dos tipos de matérias-primas e dos procedimentos de produção sobre esses fatores.

3.3 INSTRUMENTO PARA COLETA DE DADOS

Para a coleta de dados foi utilizado formulário único que englobou as fases de transformação do alumínio secundário e objetivou o levantamento de dados referente às entradas e saídas do processo. Este formulário foi aplicado para cada corrida produtiva entre os meses de Junho de 2006 e Abril de 2007.

Neste formulário constam os seguintes dados: as datas das coletas de dados, os números das corridas, a liga produzida, horário de ligamento/desligamento do forno e da bomba de resfriamento, o horário de início e término de carregamento do forno com as fontes de alumínio secundário e as temperaturas durante o vazamento do metal líquido.

Foram descritos também, para cada carga, os tipos e quantidades de fontes de alumínio secundário, elementos de liga e escorificantes. Além disso, foi medido o volume de resíduos sólidos oriundo do processo.

Os resíduos sólidos são oriundos de duas vertentes, a primeira, denominada escória de cobertura, é extraída durante do processo de fusão da superfície do metal líquido e a segunda, denominada escória de limpeza do cadinho, é aquela retirada do forno após o processo de lingotamento. Para fins desta pesquisa, foi considerado o total dos resíduos sólidos gerados, ou seja, oriundos das duas vertentes.

Reservou-se um espaço para observações, pois qualquer fato que alterasse a análise dos dados e a confiabilidade dos resultados deveria ser anotado para posterior análise e relato.



3.4 TABULAÇÃO DOS DADOS

A coleta de dados para a realização da pesquisa foi feita entre os meses de Junho de 2006 e Abril de 2007 totalizando 78 dias de coletas de dados e 214 corridas.

No final de cada semana de coleta de dados, as informações foram transcritas para planilhas do Microsoft Office Excel 2003, seguindo exatamente o modelo do formulário para coleta dos dados, ou seja, uma planilha para cada dia de coleta.

Após a coleta e tabulação dos dados, gerou-se uma matriz, contendo as quantidades das fontes de alumínio com a identificação da corrida. Para aplicar o modelo estatístico aos dados coletados e tabulados, houve a necessidade de efetuar uma nova organização destes dados.

O tipo de resposta dada por este modelo estatístico indica se uma determinada fonte de alumínio secundário afeta ou não a geração de escória acima da média imposta. Neste caso, os dados previamente tabulados foram reorganizados e assumiram valores binários de 0 e 1. Onde o número 0 foi atribuído àquelas células que não foram utilizadas na corrida produtiva. E o número 1 foi atribuído às células que possuíam algum valor numérico, ou seja, as fontes de alumínio secundário que, independentemente da quantidade, foram acrescentadas em cada corrida produtiva.

Somente após esta reorganização os dados puderam ser utilizados para aplicação do modelo estatístico escolhido.

3.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Especificamente em uma empresa de transformação de alumínio secundário, há diversas variáveis que afetam na geração de escória durante o processo produtivo. O tempo de fundição, a temperatura média de fundição, o tipo de forno a ser utilizado, o fator humano envolvido no processo, a composição das cargas e o tipo de fonte de alumínio utilizado. Nesta pesquisa, foram pesquisadas quais fontes de alumínio secundário pressionam a geração de escória acima do volume médio estabelecido.

O percentual médio de geração de escória fixado para análise dos dados foi de 7%. Para o estabelecimento deste percentual foi utilizado o *Guia Técnico do Alumínio: Geração e tratamento de escória* (ABAL, 2007, b) que aponta perdas entre 0,5% e 1,5% nos processos



de fusão do alumínio primário e entre 2,0% e 7,5% nos processos oriundos da transformação do alumínio secundário.

O instrumento utilizado para análise dos dados foi o Modelo de Regressão com Variáveis Binárias segundo a abordagem de formulação Probit. Este modelo estatístico auxilia na tomada de decisão, pois a resposta da análise indica a maior probabilidade de ocorrência de um evento.

Duas foram as razões que levaram a escolha deste modelo para a análise dos dados. O primeiro, se deve às restrições quanto à observabilidade dos dados, pois as composições de cargas utilizadas não foram quantitativamente suficientes para o uso de outros modelos estatísticos de análises multivariadas. Ou seja, apesar de um grande número de corridas, suas composições variaram entre si, o que é uma realidade para o setor de fundição onde podem ser utilizadas diversas fontes de matérias-primas no processo.

O segundo fator que propiciou a utilização desse modelo foi o bom ajustamento de dados verificado através dos testes de ajuste de serão apresentados no item 4.

Dentre as variáveis que afetam a geração de resíduos sólidos, as fontes de alumínio secundário foram aquelas avaliadas neste trabalho. Neste sentido, o modelo *Probit* auxiliou na determinação de quanto cada uma das fontes de alumínio secundário afetou na geração de escórias acima do percentual médio estabelecido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ferramenta estatística utilizada foi o Modelo de Regressão com Variáveis Binárias e o processamento dos dados foi realizado com auxílio do programa computacional *Minitab Statistical Software 15*.

Após o lançamento dos dados o sistema emite um relatório contendo as seguintes informações: “*Response Information*”, que indica as quantidades de corridas onde a geração de resíduos sólidos é superior e inferior à média estabelecida atribuindo valores (*Value*) binários de 0 e 1; “*Logistic Regression Table*”, onde são apresentados os cálculos do teste P e a probabilidade de ocorrência de resíduos sólidos acima da média para cada tipo de matéria-prima utilizada e os testes “*Goodness-of-Fit Tests*” que indicam o ajustamento do modelo aos dados coletados.



A Tabela 2 apresenta os resultados fornecidos pelo sistema para a sessão “*Response Information*”.

Tabela 2 – Fatores da sessão resposta

Response Information		
Variable	Value	Count
Escória/%	1	183 (Event)
	0	31
Total		214

O modelo identificou 183 corridas cuja geração de resíduos sólidos esteve acima da média estabelecida de 7% e 31 corridas com geração de escória abaixo desta média, representados na Tabela pelos números 1 e 0 respectivamente. Como o maior número de corridas (183) está associado a geração de resíduos sólidos acima da média o sistema indicou o *Value* 1 como o evento a ser considerado para as análises posteriores.

Após a determinação do evento, iniciou-se a análise das fontes de alumínio secundário que diretamente influenciam a geração de resíduos sólidos. Para tanto foi utilizada a sessão “*Logistic Regression Table*”, apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.3**.

Tabela 3 – Sessão de regressão logística

Logistic Regression Table								
Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI		
						Lower	Upper	
Constant	0,333643	0,714091	0,47	0,640				
Pistão/kg	-0,0990596	0,516283	-0,19	0,848	0,91	0,33	2,49	
Panela/kg	1,32461	0,571081	2,32	0,020	3,76	1,23	11,52	
Cabeçote/kg	-0,212415	0,710507	-0,30	0,765	0,81	0,20	3,25	
Perfil/kg	-0,403049	1,25792	-0,32	0,749	0,67	0,06	7,87	
Cabo/kg	1,58849	1,46862	1,08	0,279	4,90	0,28	87,09	
Lata/kg	2,03805	0,503094	4,05	0,000	7,68	2,86	20,58	
Refusão/kg	-1,04597	0,559506	-1,87	0,062	0,35	0,12	1,05	
Placa/kg	0,160147	0,660092	0,24	0,808	1,17	0,32	4,28	
Al. Mole/kg	-0,480053	0,564418	-0,85	0,395	0,62	0,20	1,87	
Al. Duro/kg	-0,745579	0,562624	-1,33	0,185	0,47	0,16	1,43	
Laminado/kg	0,928573	0,553391	1,68	0,093	2,53	0,86	7,49	

Segundo Penha (2002) o P testa a hipótese dos parâmetros serem diferentes de zero, ou seja, quando o valor P calculado for inferior ao nível de significância, determinado pelo pesquisador, aceita-se a hipótese de haver relacionamento entre as variáveis.

Neste estudo, o nível de significância estabelecido foi de 0,05 (5%). Observa-se na Tabela 5, que as fontes de alumínio secundário que obtiveram valores de P inferiores ao nível de significância foram: Panela e Lata, com respectivamente 0,02 e 0,00. Ou seja, pode-se



afirmar estatisticamente que as fontes de alumínio secundário que pressionam a geração de resíduos sólidos acima da média de 7% (evento) são as latas e as painéis.

Cabe lembrar que o modelo estatístico utilizado analisa o efeito da presença de determinada fonte de alumínio na geração de resíduos sólidos não considerando as quantidades relativas de cada fonte.

Após determinadas as fontes de alumínio secundário que afetam na geração de escória acima da média, identificou-se a probabilidade de ocorrência para cada uma das duas fontes. Este percentual é fornecido pelo modelo através do cálculo do “*odds ratio*”. Segundo Penha (2002, p. 3), a “*odds ratio*” “permite conhecer quais chances um evento tem para acontecer”.

Observa-se que a adição de painéis eleva em 3,76 vezes as chances de ocorrerem formação de escória acima da média de 7% e a para as latas as chances são de 7,68 vezes.

Para verificar a confiabilidade destes resultados foi analisada a sessão “*Goodness-of-fit-tests*” onde constam os testes Pearson, Deviance e Hosmer-Lemeshow que testam a hipótese de não haver ajuste do modelo aos dados amostrais, ou seja, se P for inferior ao nível de significância aceita-se a hipótese de não haver um bom ajuste de dados. (PENHA, 2002)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4 apresenta os valores determinados pelo sistema para a sessão “*Goodness-of-Fit Tests*”.

Tabela 4 – Teste de verificação da validade do modelo

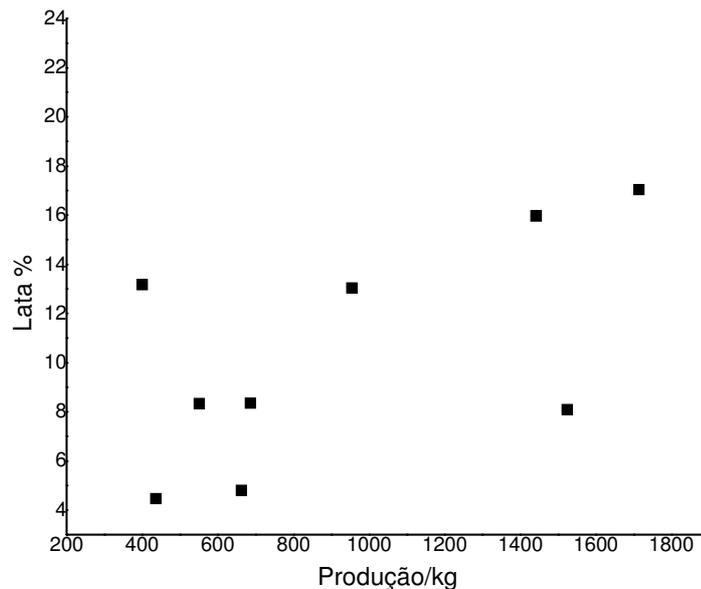
Goodness-of-Fit Tests			
Method	Chi-Square	DF	P
Pearson	88,8185	79	0,211
Deviance	76,2920	79	0,565
Hosmer-Lemeshow	2,9226	8	0,939

Os valores calculados de P apresentaram-se acima do nível de significância, desta forma, rejeita-se a hipótese de não haver ajuste do modelo aos dados coletados.



Para a matéria-prima denominada latas, a influência na geração de escória é bastante significativa e confirma os resultados do Gráfico 1 de dispersão.

Gráfico 1 – Produção x percentual de latas



Este resultado pode estar associado a diversos fatores tais como: composição química, espessura, contaminantes, presença de tintas, forma de carregamento do forno e demais parâmetros da fusão. A composição química das latas pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites de composição química - latas

Nome Comercial	ASTM	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ga	V	Outros	
												cada	total
Lata	5043	0,4	0,7	0,05-0,35	0,7-1,2	0,7-1,3	0,05	0,25	0,1	0,05	0,05	0,05	0,15

Observa-se que o teor de magnésio é elevado, o que pode favorecer a oxidação das ligas de alumínio e consequentemente o volume de resíduos sólidos.

Outra matéria-prima indicada pela análise estatística que apontou uma relação direta com a geração de resíduos sólidos foi a “panela”. No entanto comercialmente este material é identificado como nobre, pois apresenta na sua fabricação, uma composição química com baixos elementos de liga minimizando a oxidação e com isto reduzindo a formação de escória.



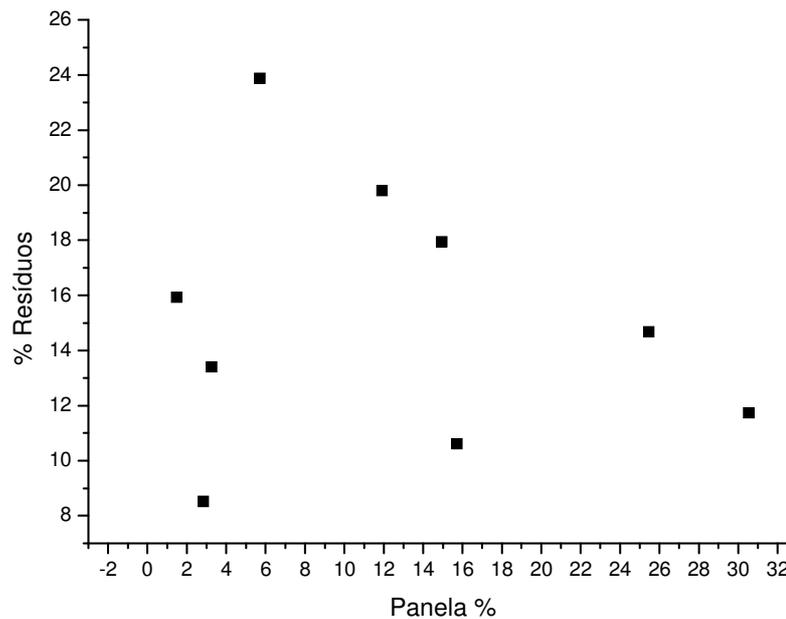
Os limites de composição química das panelas pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites de composição química - panela

Nome Comercial	ASTM	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	Outros	
										cada	total
Panela	1050A	0,2	0,25	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	99,5	0,03	-

Esta contradição pode ser verificada comparando-se o resultado do modelo estatístico com o Gráfico 2 de dispersão, neste verifica-se uma tendência da redução da escória com percentuais de utilização de panelas acima de 10%, como o esperado. A explicação para isto pode estar no fato do modelo estatístico não levar em consideração o percentual da matéria-prima, mas apenas a sua presença na carga.

Gráfico 2 – Percentual de panelas x percentual de resíduos sólidos



Deste modo, sugere-se a utilização controlada das latas e uma elevação do percentual de utilização de panela para níveis acima de 10% a fim de promover elevação na produtividade. No entanto a alteração da composição das cargas deve considerar a disponibilidade e custos de materiais

Observou-se que dos onze materiais pesquisados, somente dois mostraram correlação com a geração de resíduos sólidos. Ou seja, exceto pelas latas e panelas, as outras matérias-primas utilizadas no processo não mostraram correlação entre as fontes de alumínio



secundário e a geração de resíduos acima de uma média, tanto pelo modelo estatístico quanto pelos gráficos de dispersão.

A geração de escória é resultante de uma combinação de fatores como: temperatura, tempo de fusão, composição da liga a ser obtida, procedimento de fundição, tipo de forno, fontes energéticas e composição de carga. Neste trabalho, foi utilizado o fator “composição de carga” devido a sua importância econômica, ambiental, social no ciclo de vida do alumínio e sua forte influência na geração de resíduos sólidos.

5. CONCLUSÃO

No desenvolvimento desta pesquisa foram analisadas 11 fontes de alumínio secundário utilizadas como matérias-primas em 214 corridas produtivas.

Na pesquisa, pode-se verificar que apenas as fontes de alumínio denominadas latas e painéis possuem influência na geração de resíduos sólidos. Para o universo de dados coletados as outras fontes de alumínio pesquisadas não apresentaram a mesma correlação.

Para a fonte denominada latas, o relacionamento positivo com as perdas de processo foi detectado tanto nos gráficos de dispersão quanto no modelo estatístico de Regressão com Variáveis Binárias. Os gráficos apresentaram correlação direta entre a utilização das latas e a elevação das perdas de processo e o modelo estatístico apontou que a probabilidade desta ocorrência é de 7,68.

Para as painéis, o modelo estatístico apontou correlação positiva com as perdas de processo, porém, a análise dos gráficos de dispersão indicou uma tendência de retração na geração de escória com a adição de painéis em níveis superiores a 10%. Esta divergência encontrada nas painéis pode ser explicada, pois o modelo estatístico considera somente a presença desta fonte de alumínio no processo e não sua proporção.



REFERENCIAS

AMBIENTE BRASIL. **Metais pesados.** Disponível em <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/artigos/metais.html>>. Acesso: 11 de Setembro de 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – classificações.** NBR 10004 segunda edição. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (a). **Alumínio para Futuras Gerações: o alumínio nos transportes,** 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (b). **Guia Técnico do Alumínio: geração e tratamento de escória:** vol. 11 – São Paulo, 2007. 80p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (c). **Tabela de classificação de sucatas de alumínio.** 2º ed. São Paulo: Abal, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (d). **Vantagens.** Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/vantagens.asp>>. Acesso: 11 de Setembro de 2007.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Estudo da Competitividade da Indústria Brasileira.** Campinas, 1993. 129p.

GUJARATI, D. **Econometria Básica.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

HILL, R. C. **Econometria.** 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2003.

MALE, A.; ANTRELOWITSCH, H. & KRALY, A. **A Influência do Cálcio na Fusão de Alumínio Secundário.** Fundição e Serviços. São Paulo, Ago. 2005, p. 26-53.

PENHA, R. N. **Um Estudo sobre Regressão Logística Binária.** Universidade Federal de Itajubá – Engenharia de Produção – Trabalho de Formatura 2002.

PINDYCK, R. S. & RUBINFELD, D. L. **Econometria.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

Artigo recebido em 2007 e aceito para publicação em 2008