

UNESP

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2000



*"Influência do Teor de
Chumbo no Processamento a
Quente da Liga
de Alumínio AA3104"*

WAILTON DE CARVALHO

127

1110000428



DE QUANTIDADE

INFLUÊNCIA DO TEOR DE CHUMBO NO PROCESSAMENTO A QUENTE DA LIGA DE ALUMÍNIO AA3104

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

Autor: Wailton de Carvalho

Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica

428

Orientador : Prof. Dr Aécio Zangrandi

428

Guaratinguetá
2000

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA



C331i **Carvalho, Wailton de**
Influência do teor de chumbo no processamento a quente
da liga de alumínio AA3104 / Wailton de Carvalho.
Guaratinguetá, 2000.
68f.: il.; 30 cm

Bibliografia: f.65- 68
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2000.
Orientador: Prof. Dr. Aécio Zangrandi

1. Ligas de alumínio I. Título

CDU 669.715

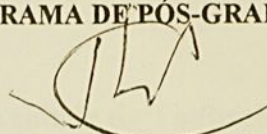
**“INFLUÊNCIA DO TEOR DE CHUMBO NO PROCESSAMENTO A
QUENTE DA LIGA DE ALUMÍNIO AA3104”**

WAILTON DE CARVALHO

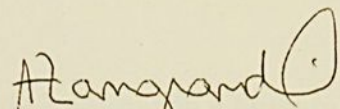
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

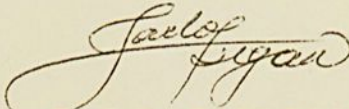
**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS**

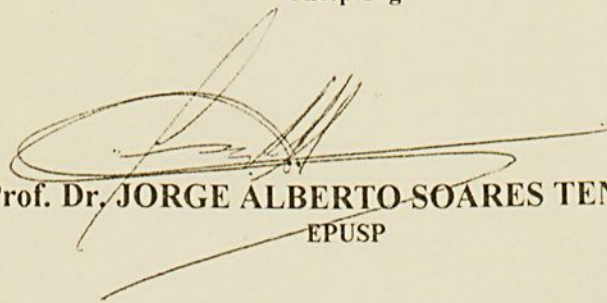
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. AÉLCIO ZANGRANDI
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. CARLOS KIYAN
Unesp-Feg


Prof. Dr. JORGE ALBERTO SOARES TENÓRIO
EPUSP

Junho de 2000

DADOS CURRICULARES**WAILTON DE CARVALHO****NASCIMENTO** 12/05/1968 – SÃO PAULO / SP**FILIAÇÃO** Joaquim de Carvalho
Belarmina de Carvalho**1987/1992** Curso de Graduação
Engenharia Mecânica – Universidade de Taubaté - UNITAU**1997/2000** Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de
Mestrado na UNESP - Campus de Guaratinguetá**1995/2000** Engenheiro Pleno, na área de Laminação a Quente da Alcan
Aluminio do Brasil LTDA

De modo especial, a página dedica-se
grande fonte de luz e motivação, de modo
por meus filhos Fabiano e Gustavo e por
minha esposa Sílvia Rosana.

AGRADECIMENTOS

- Em primeiro lugar agradeço a Deus, a quem devo tudo o que tenho e sou. Agradeço por minha família e meus amigos.
- Aos meus pais, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre me incentivaram a estudar e superar as dificuldades da vida.
- Ao meu orientador Prof. Dr. Aécio Zangrandi, que sempre com grande disposição e entusiasmo participou deste projeto.
- À Alcan Alumínio do Brasil LTDA, em particular aos pessoas do gerente de tecnologia Eng^o Edgard Leir Pontado, pela disponibilização dos recursos laboratoriais e principalmente na solução de dúvidas pertinentes a este estudo. Ao Eng^o Carlos Gaspa da Nobrega, pela ajuda com o analisador de imagem, ao gerente da refusão Eng^o Angelo Francisco Argueles, por seu incentivo, apoio.
- À UNESP – Campus de Guaratinguetá, em particular aos Srs Eli de Almeida Formigano, Humberto Lopes Rodrigues, José Manuel Bernardes e Odir Vieira da Silva pela usinagem das placas.
- Ao DEFMAR- Departamento de Engenharia de Materiais da Faequim, em especial aos professores Dr Derval Rodrigues Jr e Dr Carlos Alberto Baldea e ao assistente Alfeu Saraiva Ramos pela gentileza e prestatividade.
- As amigas Sra Carmem Cabral, pelo auxílio na formatação das referências bibliográficas, e Sra Ana Elise Sorilha, pela revisão do texto.
- Sem a contribuição de cada um após estudo a realização deste trabalho seria impossível.

De modo especial, à pequena equipe, grande fonte de força e motivação, formada por meus filhos Fabiane e Gustavo e por minha esposa Silvia Rosana.

AGRADECIMENTOS

- Em primeiro lugar agradeço a Deus, a quem devo tudo o que tenho e sou. Agradeço por minha família e meus amigos.
- Aos meus pais, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre me incentivaram a estudar e superar as dificuldades da vida.
- Ao meu orientador Prof. Dr. Aécio Zangrandi, que sempre com grande disposição e entusiasmo participou deste projeto.
- À Alcan Alumínio do Brasil LTDA, em particular nas pessoas do gerente de tecnologia Eng^o Edgard Leite Penteado, pela disponibilização dos recursos laboratoriais e principalmente na solução de dúvidas pertinentes a este estudo. Ao Eng^o Carlos Gaspar da Nóbrega, pela ajuda com o analisador de imagem, ao gerente da refusão Eng^o Angelo Francisco Argueles, por seu incentivo, apoio.
- À UNESP – Campus de Guaratinguetá, em particular aos Srs Eli de Almeida Fornitano, Humberto Lopes Rodrigues, José Manuel Bernardes e Odir Viera da Silva pela usinagem das placas.
- Ao DEMAR- Departamento de Engenharia de Materiais da Faenquil, em especial aos professores Dr Durval Rodrigues Jr e Dr Carlos Alberto Baldan e ao mestrando Alfeu Saraiva Ramos pela gentileza e prestatividade.
- Às amigas Srta Carmem Cabral, pelo auxílio na formatação das referências bibliográficas, e Srta Ana Elisa Sorrilha, pela revisão do texto.
- Sem a contribuição de cada um aqui citado a realização deste trabalho seria impossível.

Vinde a mim todos os que estais cansados e sobrecarregados, e eu os aliviarei. (S. Mateus 11:28)

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XII
Resumo.....	XII
Abstract.....	XIV
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Origem e Obtenção do Alumínio - Aspectos Históricos.....	1
1.2 - A Indústria do Alumínio no Brasil - Aspectos Históricos.....	2
1.3 - Perfil da Produção e do Consumo de Alumínio no Brasil.....	4
1.4 - Características Gerais, Produtos Típicos e Principais Usos do Alumínio.....	5
1.5 - Classificação das Ligas de Alumínio.....	6
1.5.1 - Classificação quanto ao processo de fabricação.....	6
1.5.2 - Classificação quanto ao tratamento térmico.....	7
1.5.3 - Classificação quanto à composição química - principais elementos de liga.....	10
1.6 - Embalagens em Alumínio para Bebidas - Aspectos Históricos.....	12
1.6.1 - Processo de fabricação das latas.....	14
1.7 - Reciclagem do Alumínio.....	15
1.7.1 - Reciclagem do alumínio nos EUA.....	15
1.7.2 - Reciclagem do alumínio no Brasil e índices de contaminação da suela.....	17
1.8 - Influência do clorito nas propriedades das ligas de alumínio.....	20
1.9 - Processo de fabricação da Liga AA3104 - H19, com Suporta de Lata.....	20
1.9.1 - Processo de limpeza e fusão da suela.....	21
1.9.2 - Carga para fusão da liga e processo de fabricação.....	22
1.9.3 - Tratamento térmico de homogeneização.....	23
1.9.4 - Laminação a quente das placas homogeneizadas.....	29
1.9.5 - Laminação a frio das placas laminadas a quente.....	31

Vinde a mim todos os que estais cansados e sobrecarregados, e eu os aliviarei. (S. Mateus 11 : 28)

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XII
Resumo.....	XII
Abstract.....	XIV
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1– Origem e Obtenção do Alumínio – Aspectos Históricos.....	1
1.2 – A Indústria do Alumínio no Brasil – Aspectos Históricos.....	2
1.3 – Perfil da Produção e do Consumo de Alumínio no Brasil	4
1.4 – Características Gerais, Produtos Típicos e Principais Usos do Alumínio.....	5
1.5 – Classificação das Ligas de Alumínio	6
1.5.1– Classificação quanto ao processo de fabricação.....	6
1.5.2 – Classificação quanto ao tratamento térmico	7
1.5.3 – Classificação quanto composição química – principais elementos de liga.....	10
1.6 – Embalagens em Alumínio para Bebidas – Aspectos Históricos.....	12
1.6.1– Processo de fabricação das latas.....	14
1.7 – Reciclagem do Alumínio.....	15
1.7.1 – Reciclagem do alumínio nos EUA.....	15
1.7.2 – Reciclagem do alumínio no Brasil e índices de contaminação da sucata.....	17
1.8 – Influência do chumbo nas propriedades das ligas de alumínio.....	20
1.9 – Processo de Fabricação da Liga AA3104 – H19, com Sucata de Latas.....	20
1.9.1 – Processo de limpeza e fusão da sucata.....	20
1.9.2 – Carga para fusão da liga e processo de produção das placas.....	22
1.9.3 – Tratamento térmico de homogeneização das placas.....	28
1.9.4 – Laminação a quente das placas homogeneizadas.....	29
1.9.5 – Laminação a frio das placas laminadas a quente.....	31

1.9.6 – Inclusões mais comuns na liga AA3104.....	31
1.10 – Justificativa e Objetivos do Trabalho.....	32
2 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
2.1 – Preparação da Liga AA3104 com Contaminações de Chumbo.....	34
2.2 – Homogeneização das Placas.....	36
2.3 – Usinagem das Placas.....	37
2.4 – Laminação a Quente e Recozimento das Tiras.....	38
2.5 – Metodologia usada para a Medida das Rachaduras Laterais das Tiras.....	40
2.6 – Ensaios de Tração.....	42
2.7 – Microscopia Óptica (MO).....	42
2.8 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	42
3- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
3.1- Efeito da concentração de chumbo na geração de rachaduras laterais durante a laminação a quente.....	44
3.2- Efeito da concentração de chumbo no alargamento das tiras durante a laminação a quente.....	48
3.3- Efeito da concentração de chumbo nas propriedades mecânicas.....	50
3.4- Morfologia e distribuição do chumbo.....	53
3.4.1 – Distribuição do chumbo no estado bruto de fusão.....	53
3.4.2 – Distribuição do chumbo após a laminação a quente.....	56
3.4.3 – Caracterização das rachaduras.....	58
3.4.4 – Tamanho e distribuição das partículas de segunda fase.....	60
4- CONCLUSÕES.....	62
4.1- Sugestões para futuros trabalhos.....	63
5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – Produção norte-americana anual de latas de bebida.....	14
FIGURA 2 – Porcentagem de UBC na composição de sucata velha.....	16
FIGURA 3 – Porcentagem de rejeição por contaminação de Pb, Zn e Fe nos lingotes.....	19
FIGURA 4 – Índice de reciclagem de latas de alumínio.....	19
FIGURA 5 – Composição média da carga para fusão da liga AA3104 – Alcoa Co.....	22
FIGURA 6 – Forno de fusão Brasimet.....	23
FIGURA 7 – Forno de espera Seco-Warwick.....	24
FIGURA 8 – Bed filter Pichiney.....	25
FIGURA 9 – Processo DC e equipamento Wagstaff.....	26
FIGURA 10 – Placas produzidas pelo processo DC.....	27
FIGURA 11 – Fases apresentadas na liga de alumínio AA3104 – ataque 0,5% HF com aumento de 500X.....	27
FIGURA 12 – Forno pusher Ebner.....	28
FIGURA 13 – Laminação a quente Alcan.....	30
FIGURA 14 – Tandem mill Alcan Brasil (fase final de montagem).....	30
FIGURA 15 – Comportamento do earing em função do grau de encruamento.....	31
FIGURA 16 – Redução da espessura da chapa para o corpo da lata de 1976 a 1998.....	33
FIGURA 17 – Etapas de produção das placas contaminadas com Pb.....	35
FIGURA 18 – Partículas de segunda fase($\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$ e $\text{Al}_6(\text{FeMn})$) e vazios – liga AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal da placa, sem ataque.....	36
FIGURA 19 – Ciclo de homogeneização das placas 2, 4, 6 e 8.....	37
FIGURA 20 – Placas usinadas, prontas para laminação a quente.....	38
FIGURA 21 – Equipamentos do DEMAR, usados na laminação a quente das placas. a) laminador FENN 4-105-3; b) forno de aquecimento.....	30
FIGURA 22 – Procedimento adotado para medida da largura e	



	X
profundidade das rachaduras.....	41
FIGURA 23 – Tiras laminadas a quente enfileiradas sequencialmente por teor de Pb.....	45
FIGURA 24 – Relação entre profundidade média de rachadura e teor de Pb – liga não homogeneizada.....	46
FIGURA 25 - Relação entre profundidade média de Rachadura e teor de Pb – liga homogeneizada	47
FIGURA 26 - Relação entre descontinuidade lateral e teor de Pb – liga não homogeneizada	48
FIGURA 27 - Relação entre descontinuidade lateral e teor de Pb – liga homogeneizada.....	48
FIGURA 28 – Relação entre alargamento lateral e teor de Pb – liga não homogeneizada.....	49
FIGURA 29 – Relação entre alargamento lateral e teor de Pb –liga homogeneizada.....	49
FIGURA 30 – Efeito do teor de Pb nas propriedades mecânicas – liga homogeneizada.....	51
FIGURA 31 – Efeito do Pb no “spread” – liga homogeneizada.....	51
FIGURA 32 - Efeito do teor de Pb nas propriedades mecânicas – liga não homogeneizada.....	52
FIGURA 33 - Efeito do Pb no “spread” – liga não homogeneizada.....	52
FIGURA 34 – Chumbo Segregado em vazio – AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do da seção transversal da placas, sem ataque.....	53
FIGURA 35 – Chumbo segregado na partícula de segunda Fase $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ – AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal, sem ataque.....	54
FIGURA 36 – Chumbo segregado na partícula de segunda Fase $Al_6(FeMn)$ – AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra da lateral da seção transversal da placa, sem ataque.....	54
FIGURA 37 – Chumbo Segregado em vazio – AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra lateral da seção transversal da placa, sem ataque.....	55
FIGURA 38 – Presença de MgO , Al_2O_3 , e SiO_2 em vazio – AA3104	

com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal da placa, sem ataque.....	55
FIGURA 39 - Presença de MgO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ e BaO em vazios de uma partícula de segunda fase do tipo Al ₆ (FeMn) – AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal da placa, sem ataque.....	56
FIGURA 40 – Pb segregado em partícula de segunda fase – AA3104 homogeneizado com 240 ppm de Pb, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.....	57
FIGURA 41 – Pb segregado fora e dentro da partícula de segunda – liga AA3104 não homogeneizada com 190 ppm de Pb, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.....	57
FIGURA 42 – Propagação da trinca, contornando as partículas grosseiras fase –liga AA3104 homogeneizada com 240 ppm de Pb, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.....	58
FIGURA 43 – Propagação das trincas em partículas de segunda fase, com aspecto bruto de fusão - – liga AA3104 não homogeneizada, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.....	59
FIGURA 44 – Densidade de partículas maiores que 100 μm^2 em função do teor de Pb – liga 3104 homogeneizada.....	60
FIGURA 45 – Densidade de partículas maiores que 100 μm^2 em função do teor de Pb – liga 3104 não homogeneizada.....	61

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – Consumo de alumínio no Brasil por produto e setor no ano de 1998.....	4
TABELA 2 – Grau de encruamento das ligas de alumínio.....	9
TABELA 3 – Principais elementos por grupo de liga.....	10
TABELA 4 – Limites aceitáveis de contaminação para alumínio reciclado destinado à fundição e fabricação de latas.....	18
TABELA 5 – Composição química da liga de alumínio AA3104.....	23
TABELA 6 – Adições de chumbo e níveis de contaminação das placas.....	34
TABELA 7 – Parâmetros do processo de laminação das placas não homogeneizadas.....	40
TABELA 8 – Parâmetros do processo de laminação das placas homogeneizadas.....	41

PALAVRAS-CHAVE: contaminação com chumbo, liga de alumínio 3104, rachaduras, laminação a quente, reciclagem de alumínio.



DE CARVALHO, W. Influência do teor de chumbo no processamento a quente da liga de alumínio AA3104. Guaratinguetá, 2000, 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar os efeitos dos níveis de contaminação de chumbo no processo de laminação a quente da liga de alumínio 3104 usada na fabricação de latas para bebidas. Para tanto foram produzidas nove placas em coquilha, com peso aproximado de 2,5 kg, com metal líquido da linha de produção da Alcan Alumínio do Brasil Ltda, em Pindamonhangaba. – SP. Cada placa foi contaminada com chumbo, com teores variando de 30 a 240 ppm. Parte dessas amostras foram homogeneizadas a 590°C por cinco horas. Depois todas as placas foram laminadas a quente em cinco passes até a espessura de três milímetros, quando foi observado o aparecimento de rachaduras laterais. A partir desta constatação passou-se então a analisar os seguintes tópicos: caracterização das rachaduras, propriedades mecânicas, distribuição de chumbo e tamanho das partículas de segunda fase. Para análise desses aspectos foram utilizados um macro “view”, microscópios óptico e eletrônico (MEV), além de um analisador de imagem. Os resultados demonstraram que antes da homogeneização o chumbo apresenta-se segregado nas partículas de segunda fase e nos vazios. Após a homogeneização encontrou-se chumbo apenas nas partículas de segunda fase, provocando o coalescimento dessas partículas. Ficou evidenciado que a profundidade das rachaduras é proporcional à densidade das partículas grosseiras, maiores que 100 μm^2 , a qual se eleva com o aumento do nível de chumbo na liga. Outros efeitos do crescimento das partículas de segunda fase foram a redução do alongamento, para teores de chumbo acima de 60 ppm, e da conformabilidade da liga laminada a quente.

PALAVRAS-CHAVE: contaminação com chumbo, liga de alumínio 3104, rachaduras, laminação a quente, reciclagem do alumínio.



DE CARVALHO, W. The influence of lead chemical content on hot working processing in AA3104 aluminum alloy. Guaratinguetá, 2000, 68 p. Thesis (Mechanical Engineering Master). Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

The present work aims to study the effects of the lead contamination level on the hot rolling of AA3104 aluminum alloy, that is used to make beverage cans. The work began with the cast of ingots (2,5 kg), in iron mold, with liquid metal of the Alcan Alumínio do Brasil Ltda production line in Pindamonhangaba – SP. Each ingot was contaminated with lead of 30 to 240 ppm. Some ingots were homogenized at 590 °C during five hours, after that all ingots were hot rolled in five pass, until three millimeters, when was observed the presence of cracking in the strip side. Then the following topics were investigated: the cracking features, mechanical properties, lead distribution, before and after of homogenization, and second phase particle size. To analyze these aspects were used a micro view, optical and eletronical (SEM) microscopy and a image analyzer. Results showed that before of homogenizing the lead was segregated in void and second phase particles. And after homogenization the lead was only in the second phase particle, causing particle growth. It was demonstrated that the cracking depth was proportional to the density of particles greater than $100 \mu\text{m}^2$, which was increased with the lead level in alloy. Other effects of the particle growth were reduction in the elongation, to lead level above 60 ppm, and in conformability of alloy.

KEYWORDS : chemical content lead, AA3104 aluminum alloy, cracking, hot rolling, aluminum recycling.

1 – INTRODUÇÃO

1.1– Origem e Obtenção do Alumínio - Aspectos Históricos

A história da descoberta do alumínio data das mais recentes e, em meio a várias razões, porque o alumínio não se encontra no estado nativo.

A bauxita, jazida que deu nome ao minério de alumínio, foi identificada pela primeira vez em 1821, na localidade de Les Baux, ao Sul da França, por Berthier, numa época em que o metal alumínio ainda não existia no mundo civilizado. O metal foi isolado alguns anos mais tarde (1825) pelo químico Oersted, porém, a primeira obtenção industrial do alumínio por via química foi realizada por Sainte-Claire Deville, em 06/02/1854 [1].

A bauxita extraída no século passado, antes do advento da indústria do alumínio, era originária do Sul da França, do Norte da Irlanda e dos Estados Unidos, chegando a atingir cerca de 70 mil toneladas em 1900, sendo que apenas 40% desse total eram destinados à produção do metal não-ferroso alumínio.

O primeiro milhão de toneladas anual de bauxita extraída foi atingido em 1917, quase no fim da Primeira Guerra Mundial, época em que a mineração havia se expandido para a Áustria, Hungria, Alemanha e Guiana Britânica, na América do Sul.

Na época da Segunda Guerra Mundial, por volta de 1943, os maiores produtores de bauxita eram os Estados Unidos, a Guiana Britânica, Hungria, Iugoslávia, Itália, Grécia, Rússia, Suriname, Guiana, Indonésia e Malásia.

Em 1952, a Jamaica iniciou intensa mineração de bauxita, ultrapassando o Suriname, por anos o maior produtor. Na década de 60, a Austrália e Guiné ao lado desses países tornaram-se também grandes produtores de bauxita.

A bauxita é, atualmente, o minério responsável pela quase totalidade da produção de alumínio primário e seus principais componentes são hidratos e óxidos de alumínio, além de vários outros óxidos considerados impurezas.

As primeiras referências sobre a bauxita no Brasil datam de 1928 e, estão nos Anais da Escola de Minas de Ouro Preto.

O processo químico inicial, utilizado por Sainte-Claire Deville, que utilizava cloreto duplo de alumínio e sódio fundido, reduzindo-o com sódio, foi substituído com sucesso pelo processo eletrolítico, utilizando corrente elétrica para a obtenção do alumínio. O



processo eletrolítico, conhecido como processo Hall e Héroult, foi descoberto ao mesmo tempo pelo francês Paul Louis Toussaint Heroult (Normandia - França) e pelo norte americano, que não se conheciam, Charles Martin Hall (Ohio - Estados Unidos).

O processo Hall e Héroult, atualmente utilizado na produção comercial do alumínio, por eletrólise da alumina anidra dissolvida em banho de criolita ($\text{NaF}_3 \cdot \text{AlF}_3$) fundida a 960°C , foi patenteado por ambos os descobridores em 1886[2 e 3].

1.2 – A Indústria do Alumínio no Brasil – Aspectos Históricos [1]

A primeira utilização desse minério, a bauxita, para a produção de alumina e, a partir desta, o alumínio, em escala industrial, foi feita pela antiga **ELQUISA - Eletro Química Brasileira S. A.**, empresa posteriormente incorporada à **ALCAN - Aluminium Limited of Canadá**, em 1944, durante a 2ª Grande Guerra.

Duas iniciativas contribuíram para implantar a produção do alumínio no Brasil, ou seja, uma da **ELQUISA**, em Ouro Preto (MG) e, outra da **CBA - Companhia Brasileira do Alumínio**, em Cidade do Alumínio, antiga Mairinque (SP).

A **ELQUISA** enfrentou sérias dificuldades para a comercialização do alumínio, devido ao excesso de produção mundial e, somente em 1938, com o apoio do governo Getúlio Vargas, começou em definitivo a produção do metal em Ouro Preto. A empresa acabou sendo adquirida pela **ALCAN** canadense em Junho de 1950.

A **CBA** foi fundada em 1941 e a unidade industrial para produção de alumínio primário, a partir das reservas de bauxita de Poços de Caldas (MG), acabou sendo localizada na área de Rodovelho, próxima de Sorocaba (SP), onde a disponibilidade de energia elétrica e o combustível utilizado (lenha) eram mais abundantes. A empresa paulista foi, das duas pioneiras, a única que permaneceu até hoje.

A atual **ALCAN Alumínio do Brasil Ltda** foi a primeira empresa multinacional a entrar no mercado brasileiro do alumínio com a aquisição da **ELQUISA**, em 1950, produzindo não só o alumínio primário, como também produtos transformados de alumínio.

A **ALCOA - Aluminium Company of America**, empresa líder americana e mundial do setor de alumínio, estabeleceu representação no Brasil em 1915 e iniciou operações comerciais somente em 1940. A **ALCOA** voltou a se interessar pelo mercado



brasileiro do alumínio no início da década de 60, quando adquiriu a Companhia Geral de Minas, detentora de jazidas de bauxita em Poços de Caldas (MG).

A instalação da primeira empresa de "redução" da **ALCOA**, em Minas Gerais, para produzir alumínio no Brasil, em nível modesto de atendimento ao mercado interno, entre 1967 e 1970, coincidiu com a descoberta das grandes reservas comerciais de bauxita da Amazônia, feita pela **ALCAN**, em 1967.

A quarta empresa produtora de alumínio primário que se instalou no Brasil foi a **VALESUL Alumínio S. A.**, iniciando suas operações em janeiro de 1982, por iniciativa da **CVRD - Companhia Vale do Rio Doce**, empresa estatal de mineração de ferro e, da **BILLITON Metais S. A.**, subsidiária do Grupo **SHELL**. A **VALESUL** teve uma atuação importante, amenizando as importações brasileiras de alumínio, mostrando um crescimento acentuado naquela época.

Um pouco antes, em 1979, a **ALCOMINAS - Companhia Mineira de Alumínio**, apresentou ao governo federal um projeto de grandes proporções, voltado para a produção de alumina e exportação de alumínio primário, sem localização definida: Barcarena (PA), São Luís (MA), Recife (PE) ou Paranaguá (PR). Esse projeto foi o responsável pela alteração do nome da empresa, passando para **ALCOA Alumínio S.A.**.

Em 1981, a **BILLITON Metais S. A.**, engajou-se no projeto **ALCOA**, transformando-o no Consórcio de Alumínio do Maranhão - **ALUMAR**, que iniciou suas operações somente em 1984 (produção de alumina em maio e, redução em julho de 1984).

Enquanto isso o Projeto **ALBRAS**, formado pelo consórcio japonês **NAAC - Nippon Amazon Aluminium Co Ltda** e pela **CVRD**, através de sua subsidiária a **ALUVALE - Vale do Rio Doce Alumínio S.A.**, prosseguia através de estudos de viabilidade, contratos de tecnologia e de financiamento, da construção de Tucuruí, etc. A **ALBRAS** iniciou suas operações em 1985.

Desde a produção do primeiro lingote comercial de alumínio no Brasil, em 1945, a indústria do alumínio percorreu um longo caminho, com muito trabalho, investimentos e busca de competitividade, chegando até aos nossos dias, legando ao país a marca de 6º produtor mundial de alumínio, além de repetidos recordes de consumo de produtos transformados de alumínio no mercado interno.



O Brasil possui a 3ª maior reserva mundial de bauxita, minério do qual se extrai a alumina, matéria prima para a obtenção do alumínio, além de um grande potencial hidrelétrico, considerados dois dos principais quesitos, que levaram o país ao atual estágio de desenvolvimento da indústria do alumínio.

1.3 – Perfil de Produção e do Consumo de Alumínio no Brasil

A indústria do alumínio é hoje a segunda maior indústria metalúrgica do país, superada apenas pela siderúrgica. Extrai anualmente cerca de 11,0 milhões de toneladas de bauxita (base seca), produz cerca de 2,8 milhões de toneladas de alumina e 1,2 milhão de toneladas de alumínio primário, enquanto o consumo brasileiro de produtos transformados de alumínio atingiu da ordem de 556,0 mil toneladas em 1996. [1]

O parque industrial brasileiro é formado por seis empresas produtoras de alumínio primário, cerca de trinta empresas produtoras de alumínio secundário (reciclado), aproximadamente 300 empresas transformadoras de alumínio e da ordem de 35.000 pequenas e micro empresas entre aplicadoras, transformadoras e revendedoras de produtos de alumínio.

A tabela 1 mostra o consumo de alumínio no país em 1998, por produto e setor, onde se nota que a maior quantidade foi destinada ao setor de embalagens (189,8 kton), com cerca de 75% para latas de bebida (chapas para embalagens) [4].

TABELA 1- Consumo de alumínio no Brasil por produto e por setor no ano 1998 (em 1000 ton) [4]

Produto	Setor							
	Const. Civil	Trans- portes	Ind. Eletric.	Bens. de Consumo	Embala- gens	Maq. Equip.	Outros	Total
Chapas e Lâminas	29,2	28,7	6,6	40,5	145,9	14,2	12,5	277,6
Folhas	0,7	2,4	1,1	4,1	42,7	1,5	1,2	53,7
Extrudados	87,6	21,2	11,9	10,7	0,0	6,8	3,4	141,6
Fios e Cabos	0,0	0,0	90,3	0,0	0,0	0,0	0,0	90,3
Fundidos e Forjados	1,9	72,6	0,9	0,6	0,0	6,3	0,3	82,6
Pó	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,3	17,3
Usos Destrutivos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,7	30,7
Outros	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	9,1	10,3
Total	119,4	124,9	110,8	55,9	189,8	28,8	74,5	704,1

1.4 – Características Gerais, Produtos Típicos e Principais Usos do Alumínio

Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, físicas e químicas como, por exemplo, elevada resistência (na forma de ligas), bom condutor de eletricidade e boa resistência à corrosão, respectivamente, o alumínio apresenta ainda outras propriedades tais como baixa densidade, pois é bastante leve e, excelente aspecto estético, além da reciclabilidade infinita, sem perder suas qualidades.

O alumínio está presente nas mais diversas formas em nosso dia-a-dia. Assim, encontramos o alumínio nos veículos, nos carpetes e assentos de aviões, no tratamento da água das piscinas, na forma de sulfato de alumínio, nos cabos que levam energia elétrica a todos os recantos do país, nas luminárias, nas persianas e numa infinidade de outras aplicações.

De uma forma mais técnica, a produção de transformados de alumínio abrange os seguintes processos e produtos:

a) Chapas e Lâminas

- Laminação Pura: para latas de alumínio, pisos e carrocerias para ônibus e caminhões, telhas, fachadas, etc.
- Laminação Artefatos: para utensílios domésticos.
- Laminação Impactados: tubos e bisnagas para pasta de dente, aerosóis, etc.

b) Folhas

- Laminados planos de seção transversal retangular e, espessura igual ou menor a 0,15mm, destinados aos mais diversos tipos de embalagens rígidas, flexíveis, descartáveis etc.

c) Extrudados

- Perfis com diversas formas de seção transversal, destinados ao uso em portas, janelas, box de banheiro, etc.

d) Fios e Cabos Condutores

- Produtos que se destinam à condução de corrente elétrica em residências e linhas de transmissão.



e) Fundidos e Forjados

- Produtos obtidos por processos metalúrgicos como, por exemplo, caixas de câmbio, carcaça de motores, rodas para automóveis, etc.

f) Alumínio em Pó

- Usado na fabricação de tintas, produtos químicos e farmacêuticos, etc.

Usos destrutivos

- Como desoxidantes na indústria siderúrgica

A cada dia novos produtos de alumínio estão sendo desenvolvidos no mundo e, sem dúvida, pela sua contribuição à preservação ambiental, poderão estar cada vez mais presentes na vida do consumidor [1].

1.5 – Classificação das Ligas de Alumínio

Em virtude da grande variedade de ligas de alumínio e tratamentos térmicos existentes, uma classificação se fez necessária, sendo que a mais comum adotada na América do Norte e por muitos outros países do mundo é a **AA - ALUMINUM ASSOCIATION**. No Brasil a **NBR 6834**, adota uma classificação compatível com a AA.

A **ALUMINUM ASSOCIATION** classifica o alumínio e suas ligas segundo três critérios, ou seja, quanto ao processo de fabricação, têmpera e composição química:

1.5.1 – Classificação quanto ao processo de fabricação [5]

Dependendo do processo pelo qual as ligas de alumínio são produzidas, desde o lingote até o produto final, destacam-se dois grandes grupos:

- a) Ligas Fundidas
- b) Ligas Trabalháveis

A diferença básica que existe entre os dois grupos é que no primeiro, as ligas possuem baixo alongamento, tendo praticamente sua aplicação restrita a produtos fundidos como, por exemplo, as ligas de alto Si destinadas à fundição de bloco de motores. No segundo grupo estão as ligas de alto alongamento, permitindo posterior trabalho a quente ou a frio.



As ligas trabalháveis são aquelas em que a forma final do produto acabado é obtida a partir de transformações de semimanufaturados (lâmina, chapa, folha, perfil, vergalhão, forjado), oriundos de transformação mecânica a quente ou a frio de um tarugo ou placa.

Os processos de transformação mecânica mais comuns na produção de semimanufaturados são:

- Laminação
- Extrusão
- Trefilação
- Forjamento

As ligas trabalháveis são ainda subdivididas em função de sua têmpera.

1.5.2 – Classificação quanto ao tratamento térmico [5]

As ligas de alumínio trabalháveis são classificadas em tratáveis termicamente e não-tratáveis termicamente.

As ligas **tratáveis termicamente** são aquelas que permitem aumento da resistência mecânica e mudança da microestrutura por meio do fornecimento de energia térmica e resfriamento brusco. A designação deste tratamento para estas ligas é definido pela letra “T”, seguida de um número, variando de 1 a 10, que define a sequência de tratamentos básicos aos quais a liga foi submetida, conforme indicado abaixo:

- **T1-** resfriamento após o processo de fabricação a partir de uma temperatura elevada e envelhecida naturalmente até uma condição estável.
- **T2-** resfriamento após processo de fabricação a partir de uma temperatura elevada, seguido de deformação plástica a frio e, finalmente envelhecida naturalmente até a condição estável.
- **T3-** solubilizada, deformada plasticamente a frio e envelhecida naturalmente até a condição estável.
- **T4-** solubilizada e envelhecida naturalmente até a condição estável.
- **T5-** resfriado após o processo a partir de uma temperatura elevada e envelhecida artificialmente.
- **T6-** solubilizada e envelhecida artificialmente.



- **T7-** solubilizada e estabilizada (superenvelhecimento).
- **T8-** solubilizada, deformada plasticamente a frio e envelhecida artificialmente.
- **T9-** solubilizada, envelhecida artificialmente, seguida de deformação

plasticamente a frio.

- **T10-** resfriada após o processo a partir de uma temperatura elevada, deformada plasticamente a frio e, posteriormente, envelhecida artificialmente.

As designações “**T1**” a “**T10**” podem ser seguidas de dígitos adicionais, dos quais o primeiro não pode ser zero, a fim de indicar uma variação do tratamento básico, alterando assim significativamente as características do produto.

Exemplos :

TX51 ou TXX51 – aplica-se aos produtos, que são submetidos a alívio de tensões por estiramento.

TX52 ou TXX52 – aplica-se aos produtos, que são submetidos a alívio de tensões por compressão.

As ligas **não-tratáveis termicamente** são aquelas em que o incremento de resistência mecânica só é possível mediante a realização de um trabalho a frio. Este é o caso da maioria dos produtos laminados de alumínio no Brasil, cuja classificação é definida conforme indicado abaixo:

- **“F”- Como fabricado.** Aplica-se aos produtos obtidos por conformação mecânica, não havendo nenhum controle térmico ou de encruamento especial durante o processamento e, nestes casos não se especifica as propriedades mecânicas.

- **“O”- Recozido.** Aplica-se aos produtos na condição de menor resistência mecânica.

- **“H”- Encruado.** Aplicável à maioria dos produtos laminados não-tratáveis termicamente, indicando que o aumento na propriedade mecânica se deu por trabalho a frio. A letra “H” é acompanhada de mais dois algarismos, que permitem identificar o processo aplicado e o seu grau de encruamento, conforme indicado abaixo:

HXX

	_____	Grau de encruamento (1, 2, 4, 6, 8 e 9)
	_____	Processo aplicado (1, 2 e 3)

Os números 1, 2 e 3 indicativos do Processo Aplicado significam:

- 1- Liga apenas encruada. As propriedades mecânicas obtidas, neste caso, são resultantes exclusivamente do trabalho a frio.
- 2- Liga encruada e recozida parcialmente. Neste caso, a liga é encruada até um grau de encruamento definido e, em seguida recozida parcialmente, reduzindo as propriedades mecânicas até um grau requerido. Este processo não é muito usual, em função das dificuldades de controle do processo de recozimento parcial.
- 3 – Liga encruada e estabilizada. A liga foi trabalhada a frio e em seguida submetida a um tratamento térmico a baixa temperatura, visando apenas um alívio das tensões geradas durante o processo de trabalho a frio. Este tratamento, normalmente, é aplicado a fim de promover a estabilidade dimensional e das propriedades mecânicas das ligas de alumínio-magnésio.

Os números 1, 2, 4, 6, 8 e 9 indicativos do Grau de Encruamento fornecem uma idéia do grau de endurecimento por trabalho a frio, que o produto foi submetido e, quanto ainda é permitido ao cliente prosseguir com alguma conformação posterior. A tabela 2 mostra vários graus de encruamento, com os respectivos significados comerciais e os graus aproximados de redução por trabalho a frio correspondentes.

TABELA 2- Grau de Encruamento das Ligas de Alumínio [5]

GRAU	TERMO COMERCIAL	GRAU APROX. DE REDUÇÃO
		(%)
1	1/8 DURO	15
2	1/4 DURO	20
4	1/2 DURO	35
6	3/4 DURO	60
8	DURO	75
9	EXTRA- DURO	85

1.5.3 – Classificação quanto composição química - principais elementos de liga[5]

A classificação do alumínio e suas ligas, designada pela ANSI H35.1 da AA e adotada pela ABNT (NBR 6834), é constituída de 4 dígitos, abrangendo tanto as ligas não-trabalháveis, quanto as trabalháveis por processos de conformação mecânica.

O primeiro dígito define sempre o grupo de ligas e indica o seu principal elemento, como indicado na tabela 3.

TABELA 3- Principais Elementos por Grupo de Liga [5]

GRUPO	DESIGNAÇÃO
Alumínio (mín. 99,00% de pureza)	1XXX
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio e Silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros elementos	8XXX
Séries não utilizadas	9XXX

O grupo 1XXX corresponde ao alumínio puro, não-ligado com no mínimo 99,00% de pureza. Os grupos de 2XXX a 7XXX classificam as ligas de alumínio em função do principal ou principais elementos de liga. O segundo dígito indica se a liga ainda é a original, quando zero, ou, se foi modificada, quando de 1 a 9.

Grupo 1XXX

Alumínio com grau de pureza maior ou igual a 99,00%, tem várias aplicações, principalmente, na área elétrica e química. Este grupo é caracterizado por possuir excelente resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e excelente trabalhabilidade. Os elementos ferro e silício são as principais impurezas.

Grupo 2XXX

Este grupo possui como principal elemento de liga o cobre. Estas ligas apresentam melhores propriedades mecânicas, quando submetidas a tratamento térmico adequado. Em alguns casos, a resistência mecânica obtida com tratamento térmico excede até a resistência dos aços de médio carbono.

Não possui boa resistência à corrosão, como outras ligas de alumínio e, sob certas condições podem apresentar corrosão intergranular. Para minimizar este problema, normalmente, no caso de chapas, utilizam-se o “clad” (chapa revestida), com revestimento superficial de alumínio (1XXX) ou liga de alumínio, magnésio-silício (6XXX), que conferem à liga base uma proteção galvânica, aumentando, consideravelmente, a resistência à corrosão. A liga mais conhecida deste grupo 2XXX é a 2024, a qual tem larga aplicação na indústria aeronáutica.

Grupo 3XXX

Este grupo tem o manganês como principal elemento de liga, não sendo tratável termicamente, pois o manganês apenas para níveis acima de 1,5% torna-se efetivo para este propósito e, nas ligas deste grupo, raramente se ultrapassa este limite. Uma das mais conhecidas ligas grupo 3XXX é a liga 3003, destinada a vários fins, particularmente, onde se requer moderada resistência e boa trabalhabilidade como, por exemplo, no caso de utensílios domésticos.

Grupo 4XXX

Neste grupo o principal elemento de liga é o silício, o qual é acrescentado em quantidade suficiente para causar substancial redução do ponto de fusão, sem produzir fragilidade nas ligas. Por esta razão, as ligas deste grupo são usadas para fabricação de arames de solda e para brazagem, cujo ponto de fusão deve ser menor que do metal base.

Muitas ligas deste grupo não são tratáveis termicamente, porém, com a adição de outros elementos esta característica pode ser conferida à liga, principalmente, para os casos de soldagem de ligas tratáveis termicamente.



Grupo 5XXX

O magnésio é um dos elementos de liga mais efetivos e, largamente, usado nas ligas de alumínio. Quando usado como principal elemento de liga ou, com manganês, confere à liga de moderada a alta resistência mecânica. O magnésio é ainda considerado o melhor elemento endurecedor, quando comparado com o manganês. Assim, uma liga com 0,8% de Mg possui a mesma dureza que outra com 1,25% de Mn e, além disso pode ser acrescentado ao alumínio em apreciáveis quantidades. As ligas deste grupo possuem boa resistência à corrosão em atmosfera marinha e boa soldagem, porém, com elevados teores de Mg e sob condições de tensão torna-se suscetível ao fenômeno de corrosão sob tensão “stress corrosion”. Estas ligas são largamente utilizadas nas áreas de transporte, embarcações e na indústria automobilística.

Grupo 6XXX

As ligas deste grupo contém silício e magnésio em proporções aproximadamente iguais para formar silicato de magnésio, tornando a liga tratável termicamente. Embora seja uma liga menos resistente que as ligas das séries 2XXX e 7XXX, apresentam boas características de conformabilidade e resistência à corrosão. A liga 6061 é a mais usada deste grupo, sendo uma das mais versáteis entre as tratáveis termicamente.

Grupo 7XXX

Este grupo apresenta o zinco como principal elemento de liga e, quando presente pequenas quantidades de magnésio, torna-se uma liga tratável termicamente, com alta resistência mecânica. Normalmente, outros elementos como o cobre e o cromo são também acrescentados em pequenas quantidades. A liga 7075 é a mais conhecida e, possui a mais elevada resistência mecânica entre as ligas deste grupo, sendo utilizada em estruturas aeronáuticas.

1.6 – Embalagem em Alumínio para Bebidas – Aspectos Históricos [6]

A lata de bebida em alumínio é descendente direta da lata em aço. A primeira embalagem surgiu em 1935, comercializada pela Kreuger Brewing Company, em Richmond - VA (U.S.A). Semelhante a lata para alimentos, era composta de três partes: um

corpo cilíndrico soldado e duas partes circulares fechando as extremidades do corpo. Durante a Segunda Guerra o governo norte-americano comprou grandes quantidades de cerveja em latas de aço para abastecer os soldados nos campos de batalha. Depois da guerra, boa parte dos fabricantes de cerveja reverteram suas embalagens para garrafas, pois o custo de fabricação das latas era elevado, quando comparado ao vidro, porém, as latas não desapareceram totalmente por causa dos veteranos de guerra, que preferiam a bebida em lata. As primeiras latas de bebida em alumínio foram desenvolvidas por Adolph Coors Company no Golden – Colorado (U.S.A.) e colocadas no mercado em 1958 pela cervejaria Hawalian.

O processo de fabricação adotado pela Adolph Coors foi a extrusão por impacto, que parte de uma pastilha cilíndrica em alumínio com o mesmo diâmetro da lata. Esta pastilha recebe um forte impacto de um punção e, o material escoia ao redor deste, formando o “copo” da lata. Este processo é hoje utilizado na fabricação de embalagens para creme dental, aerossóis e cápsulas para munições. A tampa era agregada a lata depois de envasada.

Esta técnica logo se tornou imprópria para produção de latas em larga escala devido a lentidão do processo e aos problemas constantes no ferramental utilizado. Além disso, o produto resultante pesava em torno de 200g, visto que a base não poderia ter espessura menor que 0,75 mm para resistir às forças internas geradas pela bebida gaseificada e, ainda não possuía estrutura suficiente para armazenar mais do que 200ml de bebida.

A popularidade do produto encorajou a Coors e outras companhias a procurar novas alternativas para a produção de latas. Pouco tempo depois a Reynolds Metals, pioneira no processo convencional de produção de latas para bebidas, fabricou as primeiras latas comerciais de 350ml, em 1963. Logo depois, no ano seguinte, em 1964, Hamms Brewery iniciou a comercialização de cerveja em latas de alumínio de 350ml, seguida, posteriormente, pela Coca-Cola e Pepsi-Cola em 1967.

Hoje o alumínio praticamente substituiu o aço no setor de embalagem para bebidas. As latas em aço constituídas de três partes, hoje raramente são produzidas e, atingiram seu pico, com cerca de 30 bilhões de latas, em 1973. O número de latas em aço constituída de duas partes atingiu o topo de produção, com cerca de 10 bilhões de latas, nos anos 70. Hoje este produto ocupa uma fatia menor que um por cento do mercado norte-americano (tendo



sua popularidade maior na Europa, onde chega a atingir 50% do mercado), como pode ser visto na figura 1.

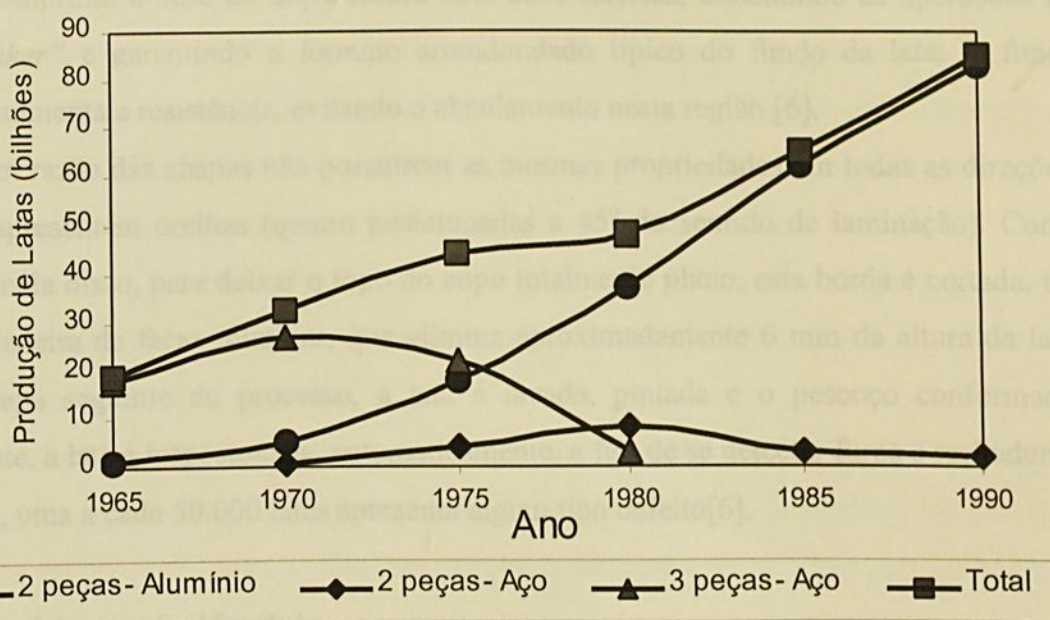


Figura 1- Produção norte-americana anual de latas de Bebida [6]

1.6.1 – Processo de Fabricação das Latas

O processo iniciado pela Reynolds é conhecido como **“two-piece drawing and wall ironing”** e o material utilizado atualmente é a liga AA3104-H19 na forma de chapa. A primeira etapa inicia com o corte discos circulares, de 149mm de diâmetro. Obviamente, forma-se um esqueleto, que constitui a sucata, a qual na teoria é da ordem de 9%, porém, na prática esta perda chega a atingir cerca 14%. Para reduzir esta perda de metal, passou-se a trabalhar com chapas mais largas, permitindo o corte e a conformação em um mesmo equipamento (Cupper), gerando em cada descida da prensa 14 copos com diâmetro de 84mm. As próximas três operações de conformação são realizadas em um segundo equipamento (Can Maker), durante o curso contínuo de um punção, num tempo aproximado de um quinto de segundo. Primeiramente, o copo é reestampado para um diâmetro de 66mm, o que aumenta sua altura de 33mm para 57mm.

Em seguida, numa seqüência de operações, de tres “ironings”(anéis que com folga entre eles e o punção menor que a espessura da parede da lata), reduz-se a espessura da parede do copo, elevando a altura de 57mm para 127mm. Na última etapa do processo um punção comprime a base do copo contra uma base esférica, concluindo as operações no “Can Maker” e garantindo o formato arredondado típico do fundo da lata. O fundo convexo aumenta a resistência, evitando o abaulamento nesta região [6].

Em razão das chapas não possuírem as mesmas propriedades em todas as direções, as latas apresentam orelhas (quatro posicionadas a 45° do sentido de laminação). Como consequência disso, para deixar o topo do copo totalmente plano, esta borda é cortada, em uma refiladeira de facas rotativas, que elimina aproximadamente 6 mm da altura da lata. Numa etapa seguinte do processo, a lata é lavada, pintada e o pescoço conformado. Finalmente, a lata é inspecionada, automaticamente, a fim de se detectar furos e rachaduras. Em geral, uma a cada 50.000 latas apresenta algum tipo defeito[6].

1.7- A Reciclagem do Alumínio

1.7.1 – Reciclagem do Alumínio nos Estados Unidos da América [7]

Antes da I Guerra Mundial o aproveitamento do alumínio estava restrito a pequenas instalações localizadas próximas aos fornos de primeira fusão e, ao aproveitamento de rejeitos do processo, até porque a disponibilidade de sucatas no mercado era extremamente baixa. Um tímido crescimento foi registrado entre a I e a II Guerra Mundial, com grande avanço, após este período, quando o monopólio do alumínio foi quebrado. Com a entrada de mais duas empresas neste ramo, o que gerou uma expansão do mercado de alumínio primário e, novos fornos foram implantados para o reaproveitamento de sucatas de aviões e de outros produtos manufaturados.

Na verdade, os rejeitos não são propositadamente criados. Eles são gerados pelas perdas nos processos de fabricação ou por obsolescência dos produtos. Os rejeitos gerados durante os processos de fabricação são comumente chamados de “sucata nova” e os de obsolescência dos produtos são chamados de “sucata velha”.

O alumínio recuperado de retalhos tornou-se um importante componente na relação entre fornecimento e demanda nos Estados Unidos. Entre 1950 e 1974, o alumínio



recuperado, a partir de retalhos velhos, era de aproximadamente 5% do total do consumo interno. Com o aumento do custo da energia elétrica e da preocupação com o meio ambiente, esta porcentagem atingiu 20% em 1988.

Esta expansão foi possível graças aos avanços da tecnologia de reciclagem, desde a coleta até a fusão e, a inclusão no mercado, no início dos anos 70, das latas de bebidas. Antes destes fatos as aplicações do alumínio estavam basicamente concentradas nos veículos de transportes, construção e indústrias elétricas, onde, de modo geral, a vida dos produtos são longas e, portanto, com baixa geração de sucatas velhas.

As latas de bebidas possuem um ciclo de vida de aproximadamente um ano, mudando, assim, drasticamente o potencial de fornecimento de retalhos. Estes retalhos são denominados como sucata de latas.

Nos Estados Unidos, devido ao grau de consciência de proteção ao meio ambiente, a coleta seletiva de lixo é responsável pelo fornecimento de 45% das latas recolhidas, ao lado do sistema "buy-back", onde as latas vazias são compradas pelos supermercados, o que confere à sucata de latas norte-americana um nível de sujeira em torno de 4%.

Atualmente, nos EUA cerca de 60% do que se recicla de alumínio é originado de latas usadas, conforme pode ser visto no diagrama mostrado na figura 2.

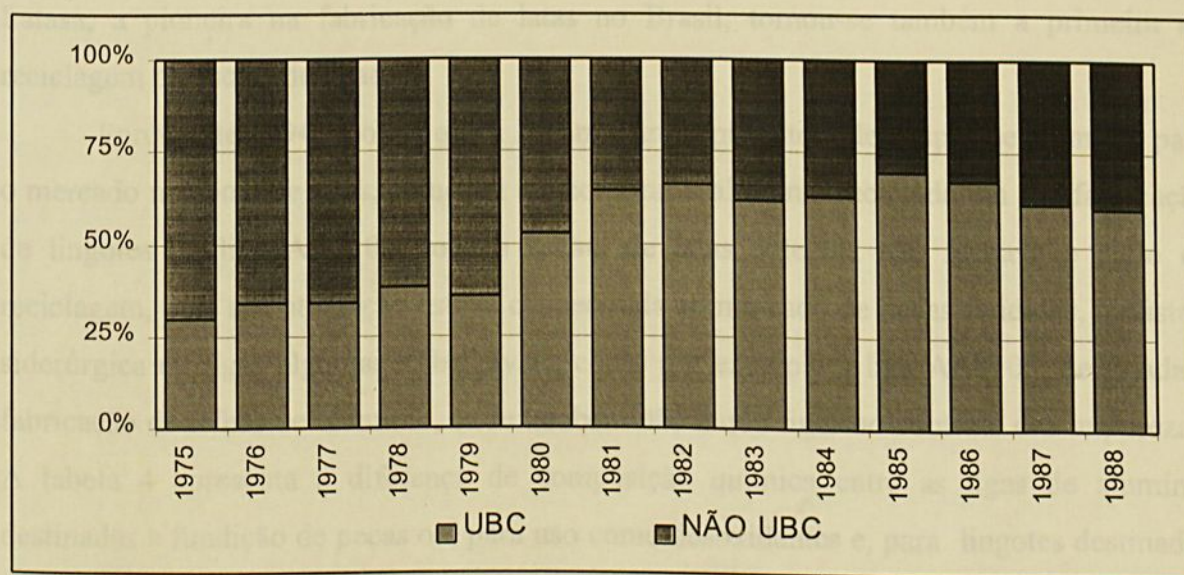


FIGURA 2 – Porcentagem de latas de bebida usadas (UBC) na composição de sucata velha [7]

A indústria secundária do alumínio vem se tornando uma das maiores forças na indústria do alumínio. A reciclagem do alumínio tem contribuído para a redução do consumo de energia e para uma considerável redução dos níveis de extração da bauxita, além do que, com a crescente preocupação mundial com o problema da conservação da energia e disposição do lixo, o alumínio e sua indústria de reaproveitamento tem demonstrado ser uma alternativa viável e exemplar para os materiais recicláveis.

Para cada tonelada de alumínio reciclado deixa-se de extrair da natureza 4 toneladas de bauxita e, consumindo 95% menos de energia elétrica [8].

1.7.2 – Reciclagem do alumínio no Brasil e índices de contaminação da sucata

A entrada das latas de alumínio no mercado brasileiro, sendo este um produto de alto volume e giro rápido, gerou outro seguimento de mercado: o da reciclagem das latas de alumínio, mercado este que movimenta aproximadamente de US\$ 64 milhões por ano [8].

As latas para bebidas em alumínio começaram a ser produzidas no Brasil em 1989, atingindo em cerca de dez anos depois, uma produção de aproximadamente 9 bilhões de latas, correspondendo a 135 mil toneladas de alumínio [1]. A partir de 1991, a Reynolds-Latasa, a pioneira na fabricação de latas no Brasil, tornou-se também a primeira na reciclagem da sucata de latas.

Porém, até 1994, ano em que a Alcan, a única produtora de chapas de alumínio para o mercado nacional de latas, começou a incorporar o alumínio reciclado em sua fabricação de lingotes da liga AA3104, toda a sucata de latas coletada não fechava o ciclo de reciclagem, pois sua utilização estava concentrada ao mercado de peças fundidas, indústria siderúrgica ou ligas algumas trabalháveis, como por exemplo a liga AA3105, destinada a fabricação de telhas de alumínio, onde também não havia rigor no controle das impurezas. A tabela 4 apresenta a diferença de composição química entre as ligas de alumínio destinadas a fundição de peças ou, para uso como desoxidantes e, para lingotes destinados a produção de chapas para fabricação de latas [9].



TABELA 4 - Limites aceitáveis de contaminação para alumínio reciclado destinado à fundição e fabricação de Latas (em %) [8]

Produto	Fe	Si	Cu	Sn	Zn	Pb	Ca	Na
Liga A380 (Fundição)	0,7-1,1	7,5-9,5	3,0-4,0	0,35	0,10	0,05	0,05	0,05
Liga 3104 (Lata)	0,48	0,23	0,24	0,005	0,05	0,009	0,0003	0,0001

Como ainda não há um programa maciço de coleta seletiva de lixo, grande parte das latas são coletadas em aterro sanitário, logradouros públicos e privados. Estima-se que cerca de 5000 famílias sobrevivem hoje de coletas de latas, repassando-as para os sucateiros, que enfardam estas latas sem qualquer processo de limpeza anterior. Nesta condição as latas são enviadas para as fundições com grau de sujeira que varia de 5 a 25%. As sujeiras mais comuns são terra, areia, pedra, plástico, vidro, aço e material orgânico.

Além dos problemas gerados com a coleta em aterros, há outra preocupação com as práticas “desonestas”, em que muitos catadores e negociadores de sucata acrescentam outros metais aos fardos de latas a fim de aumentarem seus ganhos. Entre esses metais acrescentados aos fardos encontra-se produtos de aço como pregos por exemplo e, chumbo dentro das latas [9]. A figura 3 mostra os índices de rejeições ocorridos no período entre 1995 e 1997, onde pode-se notar a marca predominante de contaminações por Zn e Pb, onerando o custo de fabricação [9].

A figura 4 apresenta os índices de reciclagem de latas no mundo, onde pode-se notar que o nível de reciclagem nacional é similar ao norte-americano. Porém, muito ainda tem-se a fazer quanto a limpeza da sucata de latas.

A média nacional de contaminação nos fardos está em torno de 8% contra 4% nos Estados Unidos [7 e 9]. A direção escolhida pela Alcan e Reynolds-Latasa tem sido aquela de promover e intensificar a coleta institucional. Esta é a forma mais inteligente de captação e a que apresenta menores índices de contaminações.

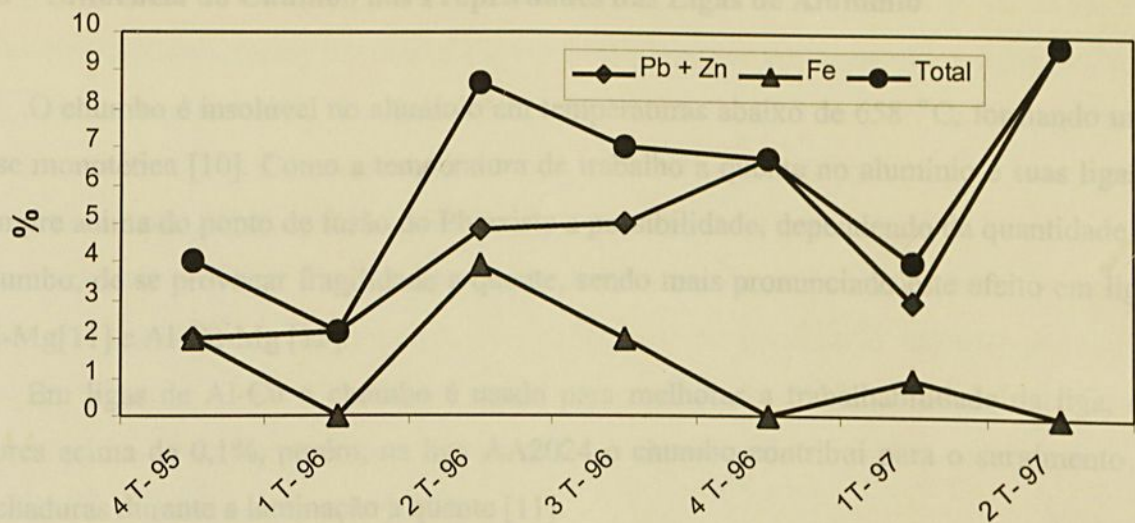


FIGURA 3 – Porcentagem de Rejeição por Contaminação de Pb, Zn e Fe nos lingotes [9]

No Brasil essa atividade é parcialmente divulgada, face a extensão territorial de nosso país. O programa é baseado no incentivo de coletas em escolas, supermercados, entidades assistenciais, etc., disseminando o conceito de conservação ambiental e geração de recursos para estes centros, baseados na troca de produtos pelas latas recolhidas [9].

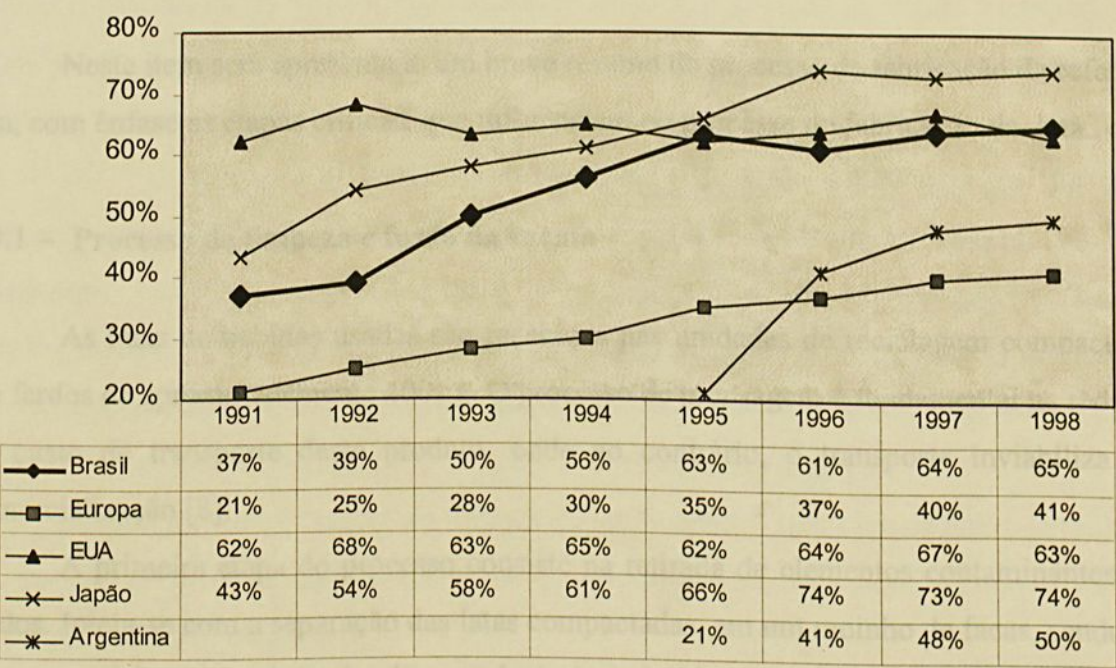


FIGURA 4 – Índice de Reciclagem de Latas de Alumínio [1]

1.8 – Influência do Chumbo nas Propriedades das Ligas de Alumínio

O chumbo é insolúvel no alumínio em temperaturas abaixo de 658 °C, formando uma fase monotética [10]. Como a temperatura de trabalho a quente no alumínio e suas ligas é sempre acima do ponto de fusão do Pb existe a possibilidade, dependendo da quantidade de chumbo, de se provocar fragilidade a quente, sendo mais pronunciado este efeito em ligas Al-Mg[11] e Al-Cu-Mg [12].

Em ligas de Al-Cu o chumbo é usado para melhorar a trabalhabilidade da liga, em teores acima de 0,1%, porém, na liga AA2024 o chumbo contribui para o surgimento de rachaduras durante a laminação a quente [11].

Ensaio de fluência em ligas Al-Mg-Si tem demonstrado que pequenas quantidades de chumbo podem induzir a fragilização. Estes ensaios foram realizados a 100°C com teores variando de 10 a 165 ppm. Ensaio de impacto, à temperatura ambiente, mostraram que o seu efeito é muito pequeno [11]. Também a taxa de propagação de trincas na temperatura ambiente aumenta com a presença de Pb [13].

1.9 – Processo de Fabricação da Liga de Alumínio AA3104 - H19 com Sucata de Latas

Neste item será apresentado um breve resumo do processo de fabricação da referida liga, com ênfase as etapas críticas, que influenciam no processo de fabricação da lata.

1.9.1 – Processo de limpeza e fusão da sucata

As latas de bebidas usadas são recebidas nas unidades de reciclagem compactadas em fardos de aproximadamente 400kg. O processo de prensagem é fundamental na redução do custo de transporte deste produto, onde ao contrário, o transporte inviabiliza sua comercialização [8].

A primeira etapa do processo consiste na retirada de elementos contaminantes dos fardos. Inicia-se com a separação das latas compactadas, em um moinho de facas, sendo em posterior equipamento (moinho de martelos) picotadas e amassadas, formando aglomerados de aproximadamente 40mm de diâmetro. Este aglomeramento visa facilitar a limpeza



durante os processos seguintes, além de assegurar uma redução na perda de metal por oxidação durante a fusão. Em seguida o material passa por um separador magnético, para remoção de contaminantes ferrosos. Através de um sistema de ar forçado são segregados os metais pesados, por diferença de densidade, como zinco e chumbo. Mesas vibratórias promovem a retirada de elementos finos, como areia, por exemplo.

Depois de limpo o produto passa por um processo de remoção de tintas e vernizes, onde são usados hoje, basicamente, dois processos: no primeiro o material permanece durante um longo tempo de exposição a uma temperatura de 450°C , no segundo o metal é exposto a uma temperatura pouco menor que o ponto de fusão da liga, a um tempo muito menor que no primeiro processo.

No primeiro caso, o metal é depositado em um reservatório, de 200mm de profundidade, passando em seguida por uma câmara quente mantida a 520°C . O segundo processo emprega um forno rotativo com um sistema de recirculação de gás aquecido, a 615°C , com vários pontos de entrada. Ambos os sistemas possuem problemas de controle e, não garantem a total remoção das camadas de tinta e verniz.

Temperaturas muito baixas ou baixos tempos de exposição em temperaturas adequadas permitem que a sucata de latas carregue pintura queimada ao forno, o que provoca aumento na perda de metal durante a fusão. A exposição da sucata a temperaturas elevadas ou a temperaturas apropriadas por tempos maiores, aumenta a oxidação do alumínio, gerando também redução na eficiência da fusão [14].

Por fim, tem-se a fusão da sucata de latas. Esta fusão é realizada em um forno protegido com fluxo de sal fundido. Este fluxo de sal é usualmente baseado em uma composição equimolar de NaCl e KCl, correspondendo a uma composição eutética. A função básica do fluxo é promover a quebra do filme de óxido de alumínio, permitindo que ocorra a coalescência do metal fundido. O fluxo de sal torna-se progressivamente viscoso, o que permite ao filme de óxido quebrado permanecer em suspensão [15].

Por fim o metal é vazado em lingoteiras ou, transferido para um cadinho, permitindo seu transporte na forma líquida para o forno fusão da Alcan, onde fará parte da carga para preparação da liga AA3104.

Tem sido desenvolvidas novas tecnologias com objetivo de melhorar a eficiência na limpeza das latas, bem como melhorar o rendimento dos fornos de fusão e, garantir as vantagens competitivas da reciclagem [15-16].

1.9.2 – Carga para refusão da liga e processo de produção das placas

O processo de refusão começa pela correta seleção da matéria prima, visando evitar contaminações e inclusões, além das medidas preventivas para reduzir os riscos de explosões no forno de fusão, se a sucata contiver água. Com a crescente utilização de latas usadas nesta liga, provenientes de vários fornecedores, aumenta a preocupação quanto ao controle dos elementos contaminantes. A figura 5 apresenta a composição média da carga para produção da liga 3104, na Alcoa Company. Nota-se que mais de 50% da carga é formada por material oriundo da reciclagem [17].

A carga é então carregada em forno de fusão, conforme mostrado na figura 6, normalmente com abóboda móvel, cuja capacidade varia de 20 a 120 toneladas,. O metal é fundido, esquimado (remoção da escória) e além de corrigida sua composição química conforme tabela 5.

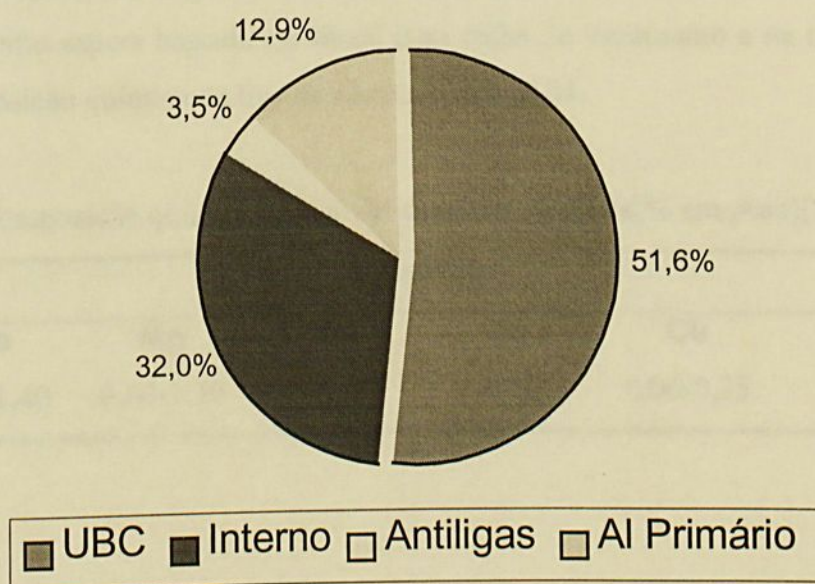


FIGURA 5 – Composição média da carga para fusão da AA3104 - Alcoa Co [17]

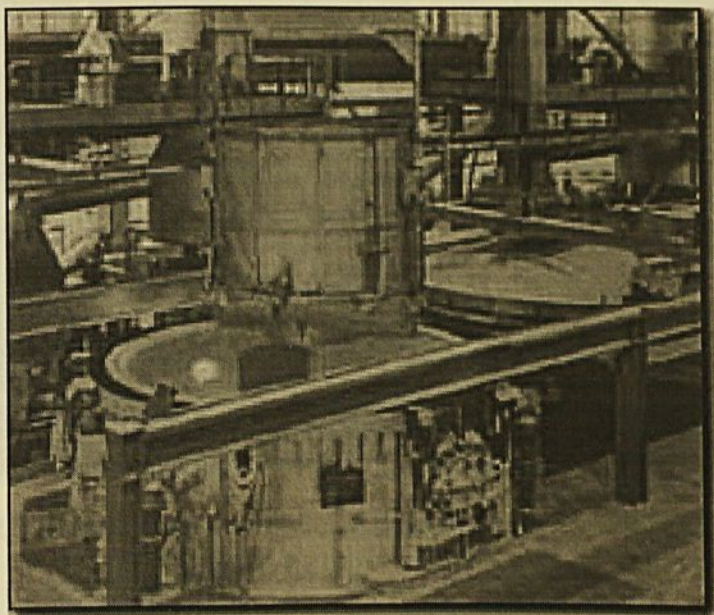


FIGURA 6 - Forno de fusão Brasimet, capacidade 40 ton[18]

A carga do forno de fusão é então transferida, por gravidade, para um “forno de espera” (Holder), onde é feita a fluxação do metal líquido, com cloro, a fim de reduzir o teor de hidrogênio dissolvido e inclusões. Também o repouso permite que as inclusões pesadas decantem, por gravidade, reduzindo assim sua quantidade no banho líquido durante a transferência para a próxima etapa.

Pequenas correções de composição química podem ser feitas neste forno. Na figura 7 é apresentado o forno espera basculando metal para calha de vazamento e na tabela 5 é apresentado a composição química da liga de alumínio AA 3104.

Tabela 5 – Composição química da liga de alumínio AA3104(% em peso)[20]

Liga	Elemento					
	Mn	Mg	Si	Fe	Cu	Zn
AA3104	0,80-1,40	0,80-1,30	0,60	0,70	0,06-0,25	0,25



FIGURA 7 - Forno de espera Seco-Warwick[19]

O metal é basculado do Holder para o DC (Direct Chill) por acionamento hidráulico. Entre o forno de espera e o DC está posicionado o mecanismo de filtragem do metal, onde se objetiva reter inclusões, os quais são reconhecidas como um problema na indústria do alumínio.

A presença das inclusões nas ligas de alumínio reduz suas propriedades mecânicas, não permite a obtenção de um bom acabamento superficial, aumenta o nível de porosidade e a tendência à corrosão. O equipamento mais comumente utilizado para este fim é o “Bed Filter”.

O “Bed Filter”, apresentado esquematicamente na figura 8, é constituído basicamente de uma caixa refratária com várias camadas de esferas de alumina, com o mesmo diâmetro em cada camada e um filtro cerâmico no fundo da caixa.

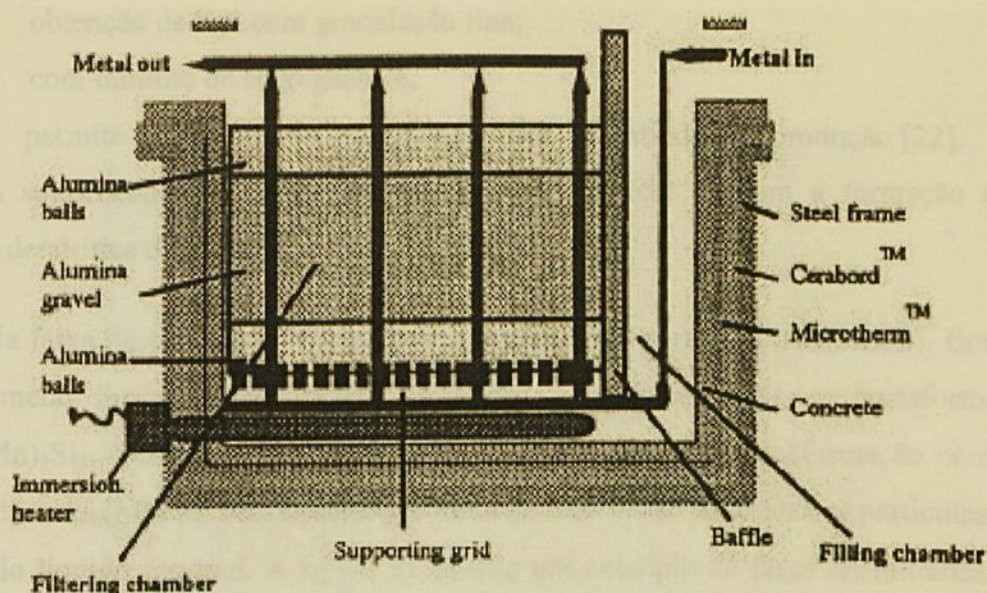


FIGURA 8 - Bed filter Pichiney [21]

O fluxo do metal se dá de baixo para cima, em função de uma chicana posicionada na entrada do filtro, onde as partículas são capturadas por absorção nas paredes do filtro e nas esferas de alumina [21]. Um metal de alto grau de limpeza apresenta valores de inclusões bem abaixo de um ppm [22].

O processo DC (direct chill), desenvolvido por W. T. Enor, tem sido largamente usado na indústria do alumínio para fabricação de placas e tarugos. Este processo é composto de um molde, que possui o formato transversal do fundido (placa ou tarugo), com comprimento aproximado de 250mm. Normalmente sua área interna, que entra em contato com metal líquido, é revestida com grafita, para evitar caldeamento de metal no molde.

A base do molde é composta por uma sapata, fixada num sistema hidráulico, que desce a uma velocidade controlada, dando o comprimento desejado ao produto. Imediatamente após a saída do molde, o metal recebe um jato de água, o que garante o controle da "casca sólida", que contém o metal líquido.

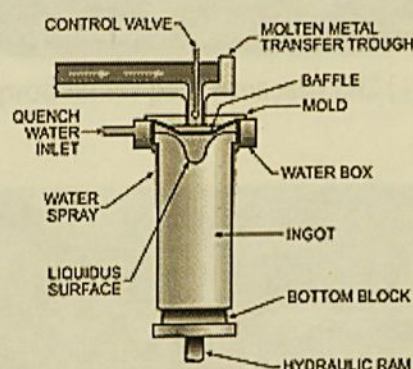
A alimentação de metal é controlada por uma válvula acionada por flutuadores, que ficam sobre o metal líquido no molde, controlando assim o nível de metal. Na figura 9 é apresentado um esquema do processo e um exemplo do equipamento DC. A figura 10 apresenta as placas fundidas por este processo.

As principais vantagens deste processo são :

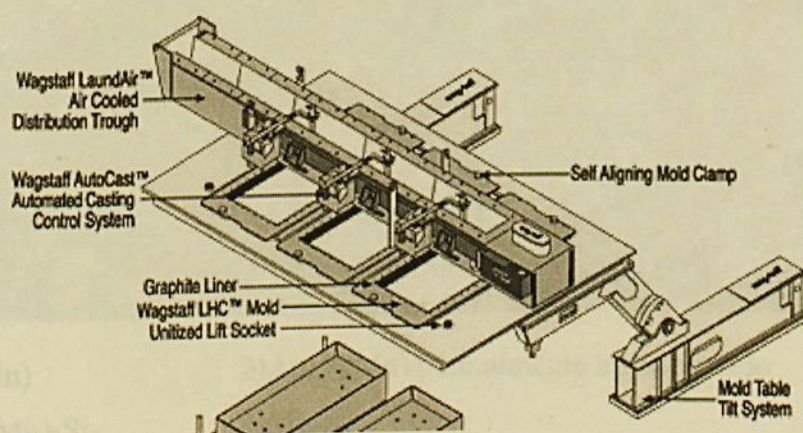
- obtenção de liga com granulação fina;
- com mínimo de segregação e,
- permite a utilização de múltiplos moldes, garantindo alta produção [22].

A solidificação da liga inicia-se por volta de 652°C , com a formação de uma estrutura dendrítica de alumínio.

Na faixa de 643 a 644°C é notada a presença de partículas $\text{Al}_6(\text{MnFe})$. Em reação com o metal líquido, parte destas partículas de segunda fase se transformam em $\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$. Quando a taxa de resfriamento é elevada, esta transformação ocorre para quase todo o $\text{Al}_6(\text{MnFe})$. Finalmente, por volta de 589°C são formadas as partículas Mg_2Si , a partir do líquido residual. A figura 11 mostra um exemplo de fases encontradas na liga AA3104 [24].



a) esquema do processo DC



b) equipamento Wagstaff

FIGURA 9 - Processo DC e Equipamento Wagstaff[23]

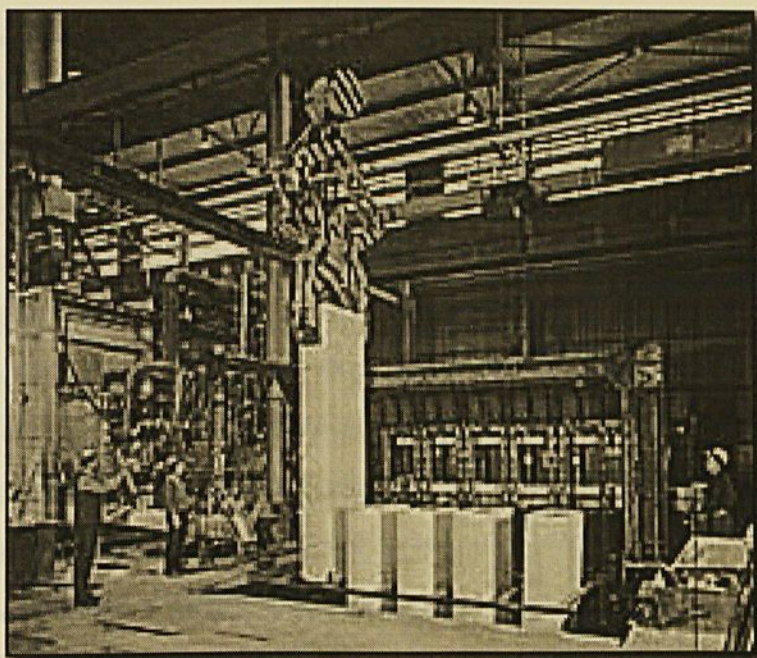


FIGURA 10- Placas produzidas pelo processo DC [18]



1) $\text{Al}_6(\text{FeMn})$

2) $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ parcialmente transformado

3) $\text{Al}_{15}(\text{Fe Mn})_3\text{Si}_2$

4) Mg_2Si

FIGURA 11 - Fases apresentadas na liga de alumínio AA3104- Ataque : 0,5% HF. [24]

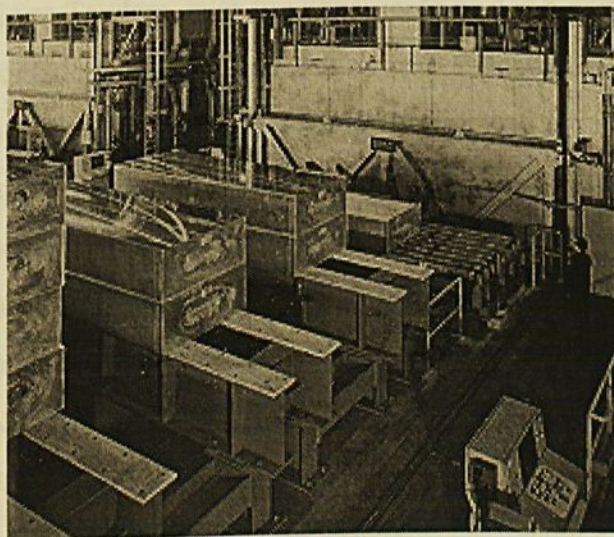
1.9.3 – Tratamento térmico de homogeneização das placas

A homogeneização é um processo de exposição térmica a elevadas temperaturas, proporcionando ao fundido equilíbrio em sua micro estrutura. Isto ocorre em função da solubilidade e razão de difusão dos elementos de liga.

As práticas de homogeneização usadas na liga AA3104 variam, de 560 a 600 °C, com tempo de 5 a 10 h [25]. Por meio deste processo reduz se a micro segregação dos elementos, o grau de supersaturação e modifica-se a morfologia e distribuição das partículas de segunda fase, $Al_6(MnFe)$, $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ e Mg_2Si . Durante o processamento ocorre o surgimento de finas partículas intermetálicas do tipo $Al_{12}(FeMn)_3Si$, denominadas dispersóides. Após o tratamento, os tamanhos das partículas de segunda fase variam de 1 a 10 μm e dos dispersóides são sempre menores que 0,5 μm [26].

A forma, tamanho e distribuição destas partículas intermetálicas são características muito importantes na liga de alumínio AA3104, pois exercem grande influência no controle do recozimento e no comportamento das propriedades mecânicas e anisotrópica (earing).

O equipamento mais utilizado na indústria do alumínio para tratamento das placas é o forno “Pusher”, por permitir alta produtividade e excelente controle térmico. Seu sistema de aquecimento é controlado por zonas, onde cada uma delas comportam 5 placas. A figura 12 apresenta um exemplo deste equipamento, fabricado pela Ebner.



Pusher-Type Furnace

FIGURA 12- Forno pusher Ebner [27]

1.9.4 – Laminação a quente

A laminação a quente é uma fase do processo muito importante na fabricação de chapas para latas de bebidas. O desenvolvimento da micro estrutura e textura da liga AA3104 é inteiramente dependente do processo adotado, impactando diretamente na anisotropia.

Pesquisas tem demonstrado que após a laminação a quente há uma predominância da textura “Cu”, $\{112\}\langle 111 \rangle$, próximo à superfície e “Brass”, $\{110\}\langle 112 \rangle$, na região central da chapa (com relação a espessura) [28].

Durante o recozimento, posterior a laminação a quente, é observado que a cinética de recristalização é maior próximo a superfície que no meio da espessura, gerando um produto totalmente recristalizado nas extremidades e deformado no centro. As texturas apresentadas no final do recozimento são cúbica, $\{100\}\langle 001 \rangle$, próximo à superfície e “goss” na região central. Os melhores resultados de “earing” (anisotropia) no produto acabado são observados nas chapas com maiores frações de textura cúbica [28].

A deformação a quente é iniciada por um laminador desbastador quadruo reversível, sendo a lâmina posteriormente transferida para um laminador “Tandem” (trem de laminação). A temperatura de transferência, bem como a espessura dependem da quantidade de cadeiras do “Tandem”. A unidade de laminados da Alcan localizada em Pindamonhangaba, possui um Tandem, cujo funcionamento se deu a partir de abril de 1999, de 4 cadeiras, tendo capacidade para receber a lâmina com espessura de 25 a 50 mm e em quatro passes consecutivos reduzir a espessura para uma faixa de 2 a 8 mm[29]. A figura 13 apresenta a laminação em um laminador desbastador reversível e a Figura 14 um Tandem (fase de montagem em Pindamonhangaba).

O recozimento mais adotado na fabricação de chapas para latas de bebida é o “self annealing”, onde a temperatura de bobinamento no Tandem fica na faixa de 300 a 360 °C [28], fornecendo assim energia suficiente para promover o recozimento, eliminando a necessidade de operação subsequente em forno.

FIGURA 14- Tandem para Alcoa Pindamonhangaba (29)





FIGURA 13- Laminação a quente Alcan [30]



FIGURA 14 - Tandem mill Alcan Brasil (fase final de montagem) [29]

1.9.5 – Laminação a frio

O processo de laminação a frio, que não é objetivo deste estudo, é importante para a qualidade final da liga AA3104. Através da deformação a frio, aplicando-se uma redução de aproximadamente 85% (H19), aumenta-se a resistência mecânica do laminado, bem como reduz a sua anisotropia.

Um gráfico esquemático de comportamento da anisotropia (earring) em função do grau de encruamento é apresentado na figura 15. O produto estampado apresenta sempre quatro “orelhas” (exceto na zona de transição), posicionando-se a 90° ou 45° em relação ao sentido de laminação.

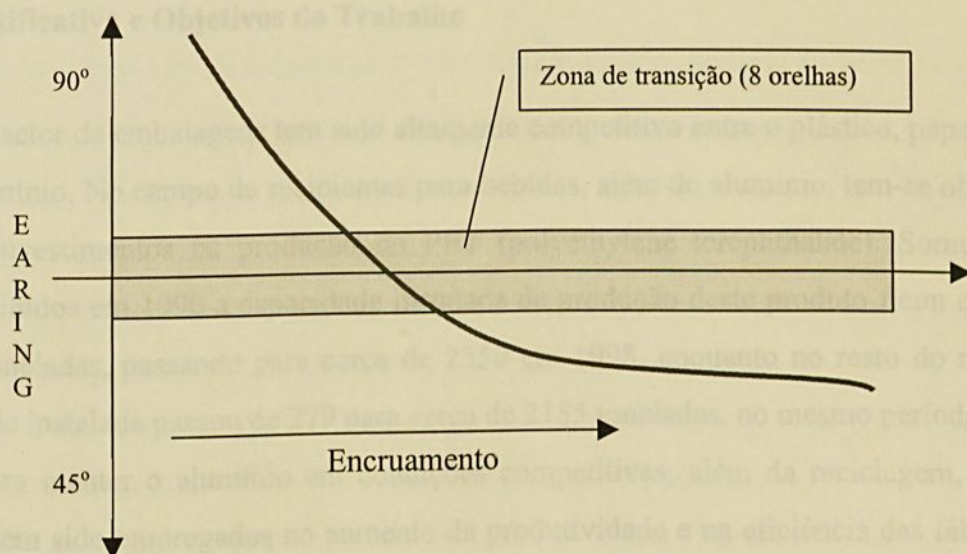


FIGURA 15 – Comportamento do earring em função do grau de encruamento

1.9.6 – Inclusões mais comuns na liga AA3104

No caso das ligas destinadas ao mercado de latas, a presença de inclusões impõem severas restrições ao processo de redução de espessura, por ser a causa principal de quebra da lata durante a estampagem, bem como pela presença de furos no produto acabado, gerando rejeições nos processos de fabricação das latas. Por estas razões a limpeza do metal tem recebido uma atenção especial na indústria do alumínio, contribuindo para a otimização de processos e equipamentos.

Os tipos de inclusões mais comuns encontrados na liga AA3104 obtida a partir de sucata são as seguintes:

a) Spinel ($MgAl_2O_4$). Este é o tipo mais comum de inclusão, sendo extremamente dura e incoerente com a matriz, podendo ser proveniente da sucata, oxidação durante a fusão do metal ou erosão do refratário;

b) Sílica (SiO_2). Esse tipo de inclusão é proveniente de erosões de partes cerâmicas como fibra de vidro, usada em elementos filtrantes. Sua presença pode ainda, quando decomposta, contribuir para a formação de Al_2O_3 e silicatos;

c) Inclusões metálicas. São compostos do tipo $TiAl_3$, Al-Ti-B, provenientes do refinador de grão (liga Al-Ti-B) [22].

1.10- Justificativa e Objetivos do Trabalho

O setor de embalagens tem sido altamente competitivo entre o plástico, papel, vidro, aço e alumínio. No campo de recipientes para bebidas, além do alumínio, tem-se observado grandes investimentos na produção do PET (polyethylene terephthalate). Somente nos Estados Unidos em 1990 a capacidade instalada de produção deste produto ficou em torno de 835 toneladas, passando para cerca de 2350 em 1998, enquanto no resto do mundo a capacidade instalada passou de 279 para cerca de 2155 toneladas, no mesmo período[32].

Para manter o alumínio em condições competitivas, além da reciclagem, grandes esforços tem sido empregados no aumento da produtividade e na eficiência das fábricas de latas. Neste sentido, a principal meta tem sido a redução da espessura da chapa utilizada na fabricação do corpo das latas[17]. A figura 16 mostra como evoluiu a redução de espessura da chapa no período compreendido entre 1976 a 1998.

A redução na espessura da matéria prima usada na fabricação de latas para bebidas tem exigido dos fornecedores de chapas constantes melhorias do produto, a fim de garantir os seguintes aspectos:

- altos valores de resistência a tração;
- baixo earing (anisotropia);
- excelente conformabilidade com mínimo de quebra e fissura durante a estampagem;

- estreitos limites dimensionais;
- excelente qualidade superficial da chapa.

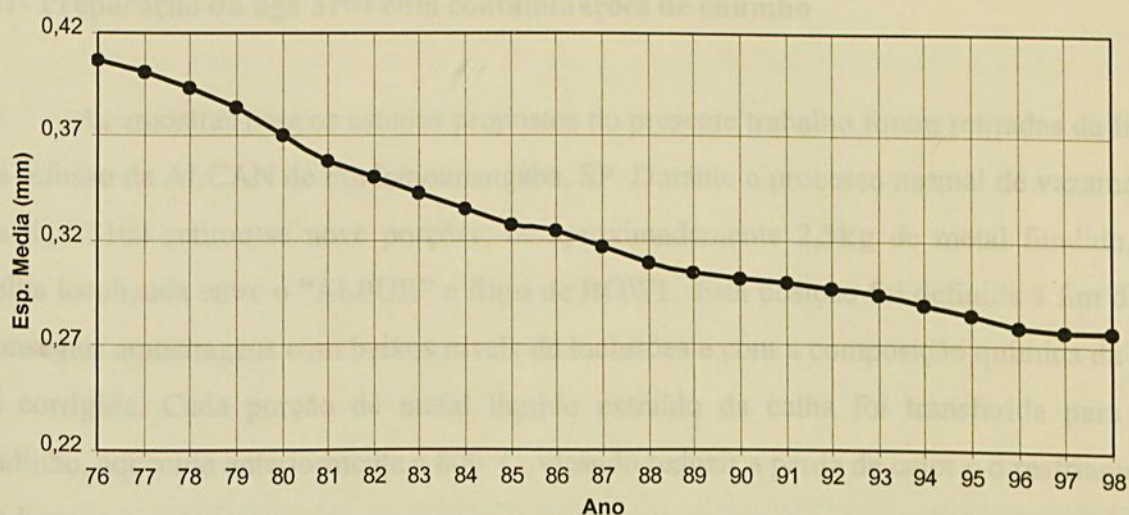


FIGURA 16 – Redução da Espessura da Chapa para o Corpo da Lata de 1976 a 1998 [17]

À medida que a espessura é reduzida, aumenta-se a sensibilidade do processo, quanto às variações de composição química, aspectos microestrutural e dimensional, além da qualidade superficial. Consequentemente, estudos sob a influência dos elementos contaminantes e seus limites passam a ser de extrema importância neste processo de melhoria das características da chapa para produção do corpo das latas.

O chumbo é um elemento contaminante comum na reciclagem de latas de alumínio [7, 8 e 9], porém os estudos, até então realizados com esse objetivo, referem-se às ligas de tipo Al-Mg-Si (AA6262) [13 e 33] e às ligas tratáveis termicamente como, tais como, a Al-Cu (AA2011) e Al-Mg-Cu (AA2024) [11].

Na liga em estudo, o limite máximo aceitável para o chumbo é de 90ppm, valor esse estabelecido pelo setor de embalagens norte-americano [34]. Dados fornecidos pela Alcoa mostram que, a concentração de chumbo varia de 57 a 102 ppm no metal reciclado, caindo para aproximadamente 50 ppm na placa fundida [17]. Nos lingotes da Alcan Alumínio do Brasil Ltda os níveis de Pb tem se apresentado em torno de 30 ppm.

Este trabalho tem como objetivos estudar os efeitos do chumbo no processo de laminação a quente da liga de alumínio AA3104 e nas propriedades mecânicas, com concentrações variando de 30 a 240ppm, em duas condições diferentes, ou seja, uma previamente homogeneizada e outra não-homogeneizada.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

2.1- Preparação da liga 3104 com contaminações de chumbo

As amostras para os estudos propostos no presente trabalho foram retiradas da linha da refusão da ALCAN de Pindamonhangaba, SP. Durante o processo normal de vazamento da liga 3104 retirou-se nove porções, de aproximadamente 2,5kg de metal fundido, na calha localizada entre o “ALPUR” e filtro de BOWL. Esta posição foi definida a fim de se conseguir amostragens com baixos níveis de inclusões e com a composição química da liga já corrigida. Cada porção de metal líquido extraído da calha foi transferida para um cadinho, aquecido anteriormente a 800°C, visando reduzir a perda de calor e o resfriamento da liga.

As duas primeiras porções extraídas não foram contaminadas e, nas demais, foram adicionadas chumbo, conforme indicado na tabela 6, sempre agitando o metal dentro do cadinho, por 30 segundos com uma haste de aço.

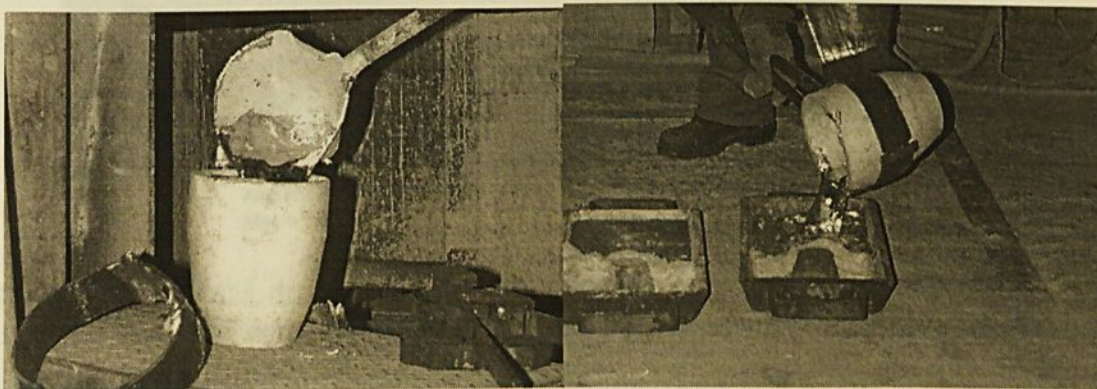
TABELA 6 – Adições de Chumbo e Níveis de Contaminação das Placas

Ident.	Adição de Pb (g)	Temp. do Metal na calha (° C)	Composição Química da Liga (% em peso)					
			Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Pb
1	0	685	1,14	0,86	0,37	0,19	0,16	0,003
2	0	687	1,14	0,86	0,37	0,19	0,16	0,003
3	0,3981	687	1,13	0,87	0,38	0,20	0,16	0,019
4	0,4045	691	1,20	0,86	0,37	0,20	0,17	0,014
5	0,8060	696	1,19	0,87	0,38	0,21	0,17	0,016
6	0,8048	697	1,19	0,89	0,40	0,20	0,16	0,024
7	1,1926	696	1,22	0,89	0,40	0,20	0,17	0,008
8	1,1994	698	1,19	0,89	0,39	0,19	0,17	0,020
9	1,2039	702	1,20	0,89	0,40	0,20	0,17	0,006

Depois deste procedimento para contaminação com chumbo, o metal líquido foi vazado em uma coquilha de ferro fundido, obtendo-se as placas com dimensões aproximadas de 28 x 170 x 220 mm.

Na seção transversal da região central das placas foram retiradas amostras com a finalidade de se verificar a composição química e a microestrutura da liga bruta de fusão. As análises químicas foram realizadas num Espectômetro de Emissão Óptica ARL 3560 e os resultados estão mostrados na tabela 7.

A figura 17 mostra as fotografias das principais fases do processo de preparação das placas da liga 3104 contaminadas com chumbo utilizadas no trabalho. Na figura 18 é apresentado a microestrutura da placa.



(a) alimentação do cadinho

(b) vazamento na coquilha



(c) placas contaminadas com chumbo

FIGURA 17- Etapas de Produção da Placas Contaminadas com Pb.

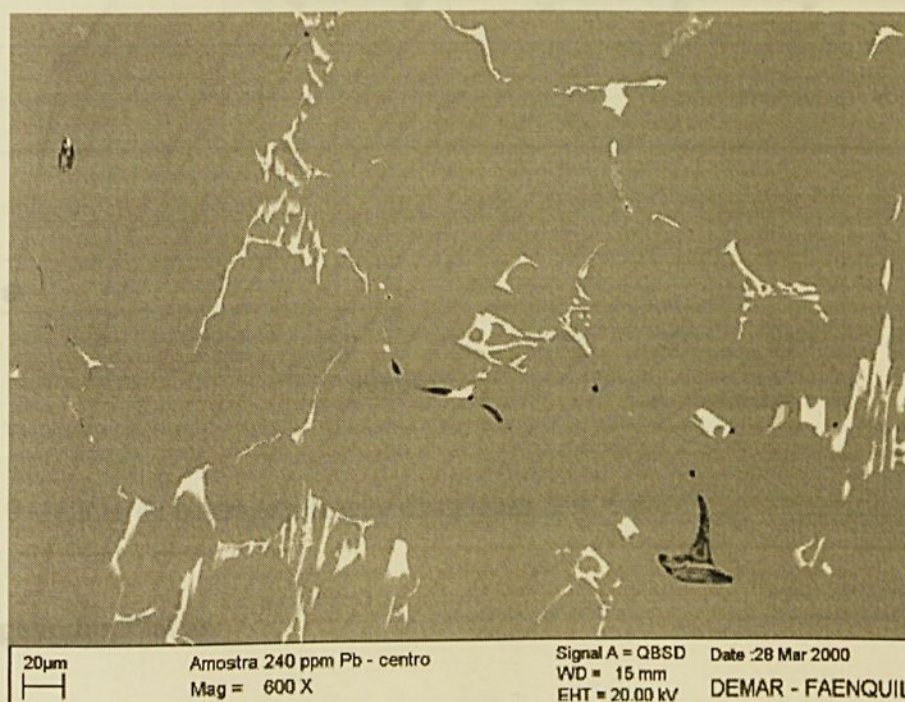


FIGURA 18 – Partículas de segunda fase ($\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$ e $\text{Al}_6(\text{FeMn})$) e vazios – liga AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal da placa, sem ataque.

2.2- Homogeneização das placas

As amostras de números 2, 4, 6 e 8 foram homogeneizadas a uma temperatura de 590°C , durante cinco horas, em uma mufla, conforme os parâmetros usuais do processamento térmico industrial desta liga, cuja aplicação destina-se a fabricação de latas para bebidas. A figura 19 apresenta a taxa de aquecimento utilizada na homogeneização das placas. Após decorrido o tempo de cinco horas na temperatura de 590°C as placas foram retiradas da mufla e resfriadas ao ar, até atingir a temperatura ambiente.

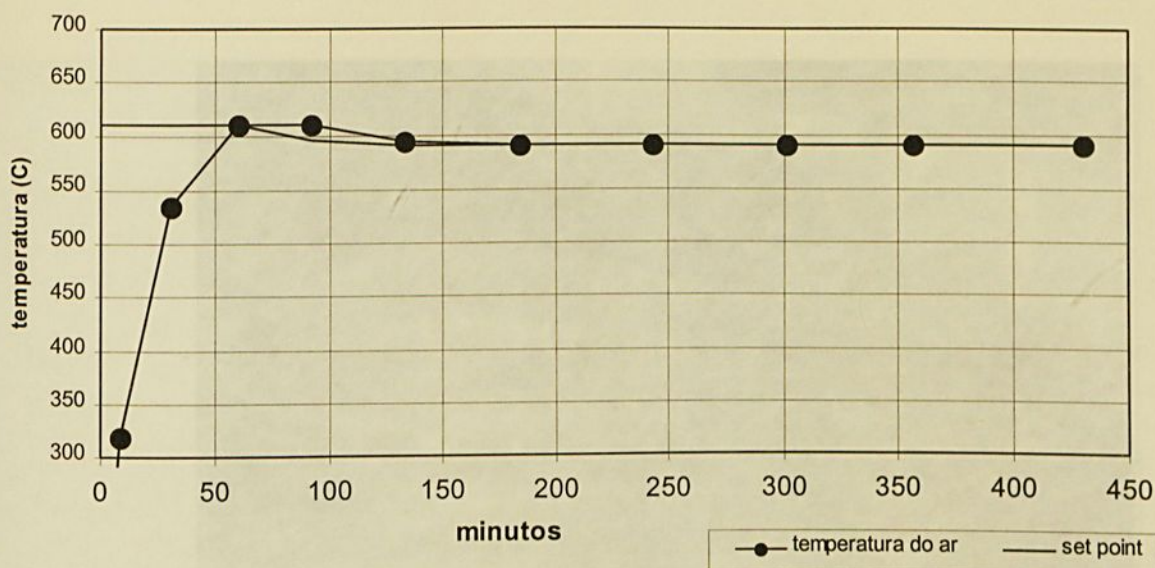


FIGURA 19 – Ciclo de homogeneização das placas 2, 4, 6 e 8

2.3- Usinagem das Placas

Todas as placas foram usinadas, as de números 2, 4, 6 e 8 (homogeneizadas) e as de números 1, 3, 5 e 9 (não homogeneizadas). A placa 7 não foi utilizada no estudo, pois durante o vazamento ela apresentou um comportamento atípico em relação às demais: sua solidificação iniciou-se no cadinho, sendo vazado em estado “pastoso”.

A usinagem das placas foi realizada no laboratório de usinagem do DMT – Departamento de Materiais e Tecnologia, na UNESP – Campus Guaratinguetá, com a finalidade de padronizar as dimensões das placas e eliminar as irregularidades da superfície bruta de fusão.

As placas foram usinadas, resultando em superfícies planas e paralelas, onde as laterais ao longo do maior comprimento do retângulo arredondados, com raio de arredondamento de 125,0 mm.

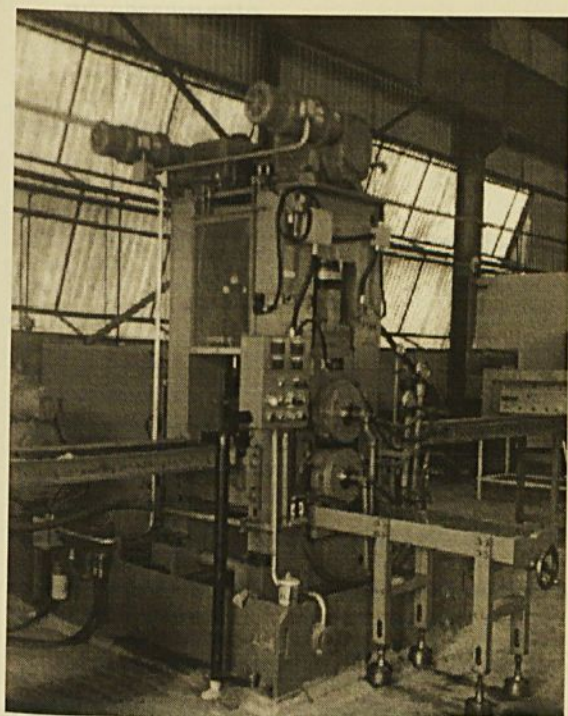
A curvatura na lateral das placas, teve como objetivo reduzir a possibilidade de nucleação de trincas em função da existência de cantos vivos, que se tornariam pontos de concentração de tensão durante o processo de laminação. As placas após a usinagem ficaram com as seguintes dimensões finais: 170 mm de comprimento, 140 mm de largura por 22 mm de espessura. A figura 20 mostra o aspecto das placas após usinagem.



FIGURA 20 – Placas usinadas, prontas para a laminação a quente

2.4- Laminação a Quente e Recozimento das Tiras

A laminação a quente das placas foi realizada no DEMAR – Departamento de Engenharia de Materiais, na FAENQUIL, em Lorena, SP, num laminador duo de alta precisão FENN 4-105 – 3 ½"x 12"x 15'. O aquecimento das placas foi realizado num forno com aquecimento resistivo, cilíndrico, de aproximadamente 300mm de diâmetro interno por 800mm de altura, com temperatura máxima de operação 1200°C, dotado de um sistema controlador de temperaturas. A figura 21 mostra a fotografia do laminador de alta precisão e, do forno cilíndrico, usados na laminação a quente.



a)



b)

FIGURA 21 – Equipamentos do DEMAR usados na laminação a quente das placas.

a) Laminador FENN 4-105 – 3; b) forno para aquecimento.

A temperatura de laminação foi de 480°C e, após cada passe, com redução de aproximadamente 30%, as placas retornavam ao forno, onde eram reaquecidas para a temperatura de laminação a quente. Todos os passes foram realizados a seco (sem emulsão). A tabela 8 mostra os parâmetros do processo de laminação a quente das placas. É importante ressaltar que alguns cuidados foram tomados, ou seja:

- mediu-se a temperatura das placas na entrada e saída do laminador, ou seja, antes e após cada passe, utilizando-se um pirômetro de contato manual;
- as guias laterais da entrada do laminador foram fechadas, próximo à largura das placas, garantido a centralização das mesmas durante a laminação;
- após o 4º passe as tiras atingiram cerca de 690 mm de comprimento, quando então foram todas recortadas para 250 mm, descartando-se as pontas. Este procedimento teve duas finalidades: reduzir a probabilidade de “entortamento” das tiras durante a

laminação no passe posterior e, a minimizar a perda de temperatura durante o processamento.

Após a laminação a quente, como a temperatura final das tiras ficou abaixo da temperatura de recristalização da liga (340°C) , todas as tiras foram recozidas, em uma mufla, a 370°C por 1 hora.

Os parâmetros e resultados da Laminação a Quente são apresentados nas tabelas 7 e 8.

Para facilitar a análise, correlacionando o teor de chumbo com os resultados obtidos, com relação ao aspecto das rachaduras nas bordas das tiras laminadas, deste ponto para frente será usada uma identificação alfa numérica para as placas.

O valor numérico corresponde ao teor de chumbo em ppm e, a letra posterior indica se a placa foi homogeneizada (H) ou não homogeneizada (N).

2.5- Metodologia usada para Medida das Rachaduras Laterais das Tiras

As rachaduras laterais das tiras após concluído o processo de laminação a quente foram avaliadas sob três aspectos: profundidade, largura e distribuição.

TABELA 7 –Parâmetros do processo de laminação das placas não homogeneizadas

ID	Passe 1			Passe 2			Passe 3			Passe 4			Passe 5		
	AC	TEMP		AC	TEMP		AC	TEMP		AC	TEMP		AC	TEMP	
		E	S		E	S		E	S		E	S		E	S
30N	15	480	338	10,5	485	321	7,5	487	305	5,25	468	248	2,25	494	199
60N	15	490	332	10,5	456	320	7,5	471	298	5,25	483	254	2,25	491	203
160N	15	490	352	10,5	475	321	7,5	485	294	5,25	490	258	2,25	492	209
190N	15	480	359	10,5	493	326	7,5	498	300	5,25	467	253	2,25	495	192

Legenda: ID - Identificação da Placa; AC – Abertura dos cilindros (mm); TEMP- Temperatura (°C); E - Entrada; S - Saída

TABELA 8 - Parâmetros do processo de laminação das placas homogeneizadas

ID	Passe 1			Passe 2			Passe 3			Passe 4			Passe 5		
	AC	TEMP		AC	TEMP		AC	TEMP		AC	TEMP		AC	TEMP	
		E	S		E	S		E	S		E	S		E	S
30H	15	480	338	10,5	486	324	7,5	498	282	5,25	440	244	2,25	492	190
140H	15	480	348	10,5	493	325	7,5	500	303	5,25	490	253	2,25	492	196
200H	15	490	354	10,5	487	333	7,5	458	289	5,25	486	254	2,25	487	208
240H	15	490	348	10,5	480	348	7,5	482	297	5,25	490	253	2,25	496	195

Legenda: ID - Identificação da Placa; AC – Abertura dos cilindros (mm); TEMP- Temperatura (°C); E - Entrada; S - Saída

O comprimento das tiras após o último passe foi de 415 mm. Desprezou-se 50mm de cada extremidade das tiras e mediu-se as profundidades de todas as rachaduras, em ambas as laterais de cada tira, bem como as larguras das descontinuidades laterais maiores que 4 mm. Este trabalho foi realizado projetando-se a lateral da tira em um analisador de imagem CLEMEX versão 2.2.096, por meio de um MACRO VIEW Elmo EV 500, com aumento aproximado de 7X. A figura 22 apresenta um exemplo da mensuração destes valores.

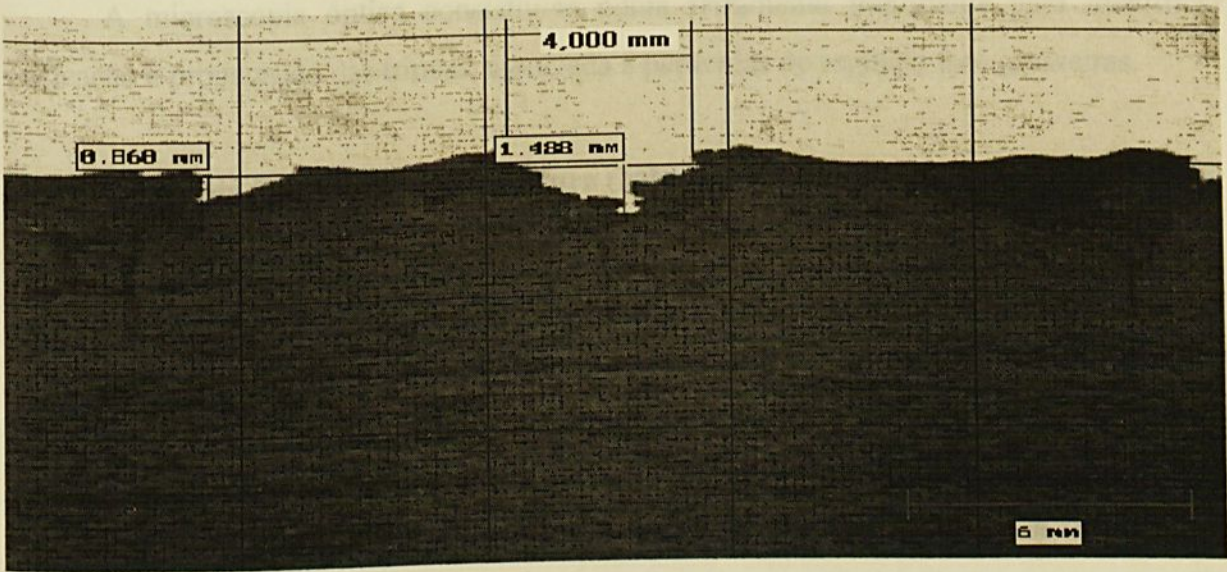


FIGURA 22 – Procedimento adotado para medida da largura e profundidade das rachaduras

2.6- Ensaio de Tração

De cada tira laminada foram retirados três corpos de prova para ensaios de tração, de acordo com a ASTM E 8M, na direção de laminação das tiras, a fim de avaliar a influência do chumbo também nas propriedades mecânicas da liga AA3104, nas condições estudadas. Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da ALCAN, em Pindamonhangaba, SP, numa máquina de tração universal, marca Veb Thuringuer, com capacidade de 10.000 kgf.

2.7- Microscopia Óptica (MO)

Todas as amostras analisadas por microscopia foram analisadas na condição polida, as quais seguiram o seguinte processo de preparação:

1. corte em serra de fita, lubrificada com parafina;
2. lixamento com lixa 360 para eliminação de rebarba e garantir paralelismo da face a ser analisada;
3. embutimento em baquelite;
4. lixamento automático, com carga de cinco libras, na sequência de lixas 220/400/600;
5. Polimento automático, com carga de 6 libras, em pasta de diamante, por nove minutos. Usou-se etileno glicol 25% como refrigerante.

A microscopia óptica consistiu-se numa ferramenta importante para identificar nucleação e propagação das trincas, associada a partículas de segunda fase grosseiras.

2.8- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As amostras preparadas para microscopia óptica foram analisadas, na condição polida, com técnicas de microscopia eletrônica de varredura, com o objetivo de identificar a presença e distribuição do chumbo, possibilitando assim a associação com os efeitos analisados na microscopia óptica.

A análise quantitativa química dessas partículas de segunda fase foi realizada no DEMAR – Departamento de Engenharia de Materiais, na FAENQUIL, em Lorena, SP,



num microscópio eletrônico de varredura LEO 1450 VP. Este equipamento é composto também por um sistema de micro análise EDS (Oxford), por meio do qual se obteve indicativos de composição química, que possibilitou a identificação de chumbo, partículas de segunda fase e óxidos.

A determinação do tamanho das partículas de segunda fase foi feita no laboratório de Metalografia da ALCAN em Pindamonhangaba, SP, com auxílio de um analisador de imagem CLEMEX acoplado ao microscópio óptico. A análise foi realizada com um aumento de 200X, em 14 diferentes pontos da amostra.

- * Efeito do Pb nas propriedades mecânicas da liga AA3104, na condição laminada a quente;
- * Identificação e localização do Pb na micro estrutura da liga AA3104 contaminada;
- * Influência do Pb sobre as partículas precipitadas de segunda fase e o efeito destes compostos intermetálicos nas microestruturas laterais das lamelas a quente, usando a técnica de microscopia eletrônica de varredura.

3.1- Efeito da concentração de chumbo na geração de rachaduras laterais durante a laminação a quente.

Foi observado durante a laminação a quente que as placas homogeneizadas e com teor de chumbo de 200 e 240 ppm apresentaram rachaduras laterais já no primeiro passo (com 30% de redução, passando de 22 para 15 mm), aumentando em quantidade e profundidade a cada passo. As amostras com 30 ppm apresentaram rachaduras somente no último passo (espessura final de 3,15 mm) e as demais nos passos intermediários.

Foi observado também que na condição homogeneizada a profundidade média das rachaduras aumentou proporcionalmente com teores de chumbo, passando de 0,55 mm com 30 ppm para 4,36 mm com 240 ppm, representando um aumento em torno de oito vezes.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados referentes aos seguintes aspectos :

- Efeito do chumbo (Pb) na geração e profundidade das rachaduras laterais das tiras laminadas a quente;
- Efeito do Pb no alargamento da tiras;
- Efeito do Pb nas propriedades mecânicas da liga AA3104, na condição laminada a quente;
- Identificação e localização do Pb na micro estrutura da liga AA3104 contaminada;
- Influência do Pb sobre as partículas grosseiras de segunda fase e o efeito destes compostos intermetálicos nas rachaduras laterais das tiras laminadas a quente, usando técnica de microscopia eletrônica de varredura.

3.1- Efeito da concentração de chumbo na geração de rachaduras laterais durante a laminação a quente

Foi observado durante a laminação a quente que as placas homogeneizadas e com teor de chumbo de 200 e 240 ppm apresentaram rachaduras laterais já no primeiro passe (com 30% de redução, passando de 22 para 15 mm), aumentando em quantidade e profundidade a cada passe. As amostras com 30 ppm apresentaram rachaduras somente no último passe (espessura final de 3,15 mm) e as demais nos passes intermediários.

Foi observado também que na condição homogeneizada a profundidade média das rachaduras aumentou proporcionalmente com teores de chumbo, passando de 0,55 mm com 30 ppm para 4,36 mm com 240 ppm, representando um aumento em torno de oito vezes.



Na figura 23 são apresentas as tiras laminadas, enfileiradas na seqüência crescente de teores de Pb. Nota-se que as rachaduras aumentam à medida que se eleva a quantidade de chumbo contida na liga AA3104.

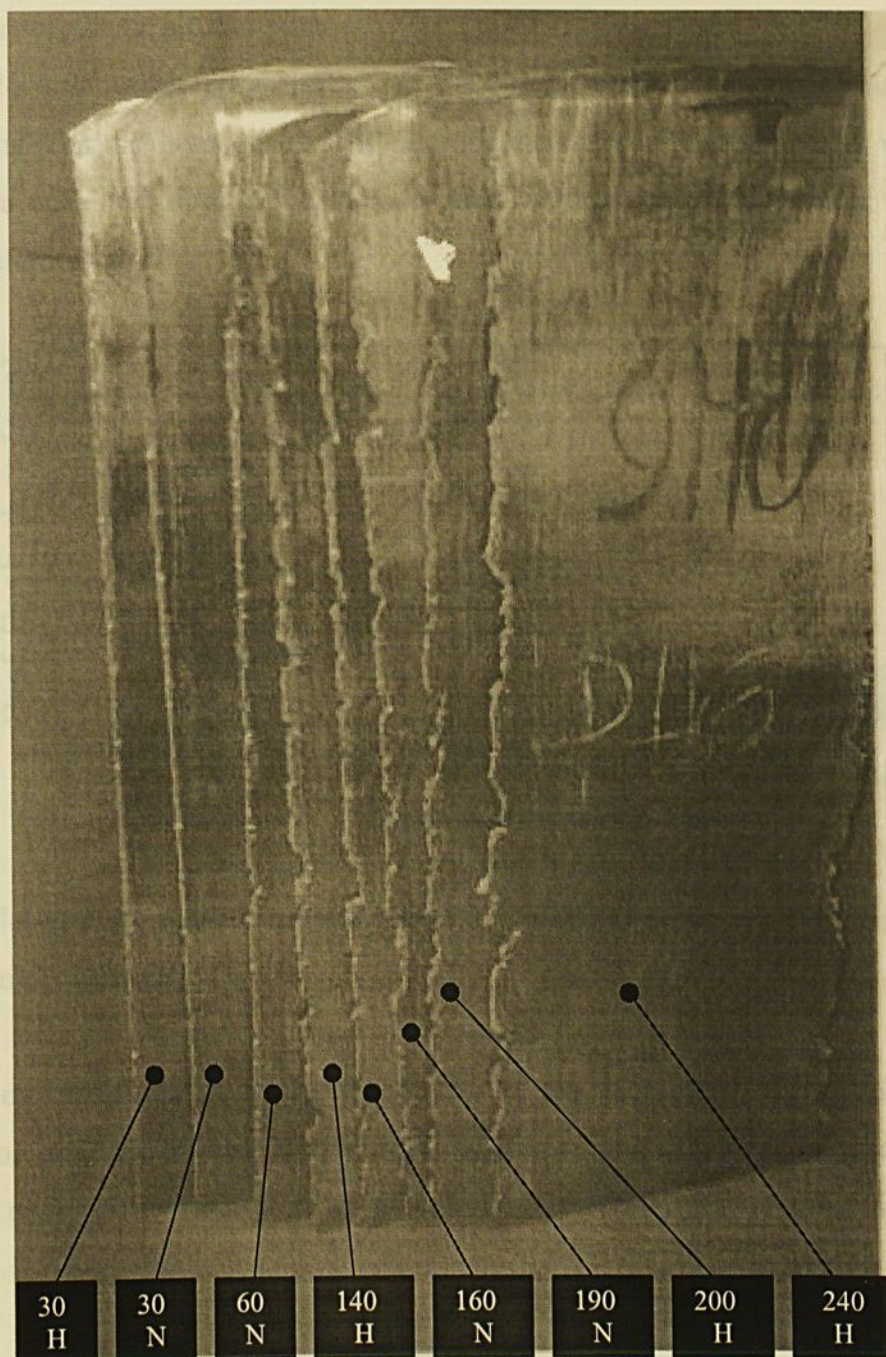


FIGURA 23 - Tiras laminadas a quente enfileiradas sequencialmente por teor de Pb

Nas amostras não homogeneizadas também foi observado um crescimento do defeito, ou seja, da profundidade média das rachaduras com o aumento do teor de chumbo, porém a tira com 190 ppm de chumbo apresentou valores médios menores que a amostra de 160 ppm, divergindo assim da tendência observada para os casos homogeneizados, cuja tendência foi sempre crescente até 240 ppm.

Nas Figuras 24 e 25 estão representados os valores médios das profundidades das rachaduras, nas condições não homogeneizadas e homogeneizadas, respectivamente, versus o teor de Pb. Para cada teor foram considerados dois valores de profundidade, sendo referentes a cada lateral da tira.

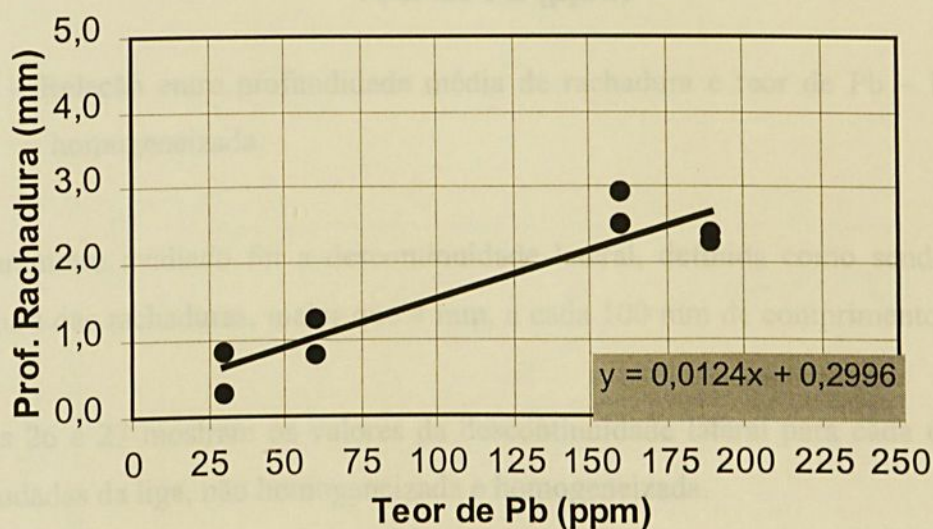


FIGURA 24 – Relação entre a profundidade média de rachadura e teor de Pb – liga não homogeneizada

Comparando os resultados da profundidade média das rachaduras em relação aos teores de chumbo, pode-se afirmar que a liga AA3104 apresentou rachaduras mais profundas que no caso não homogeneizado, pois o coeficiente angular da reta ter se apresentado maior.

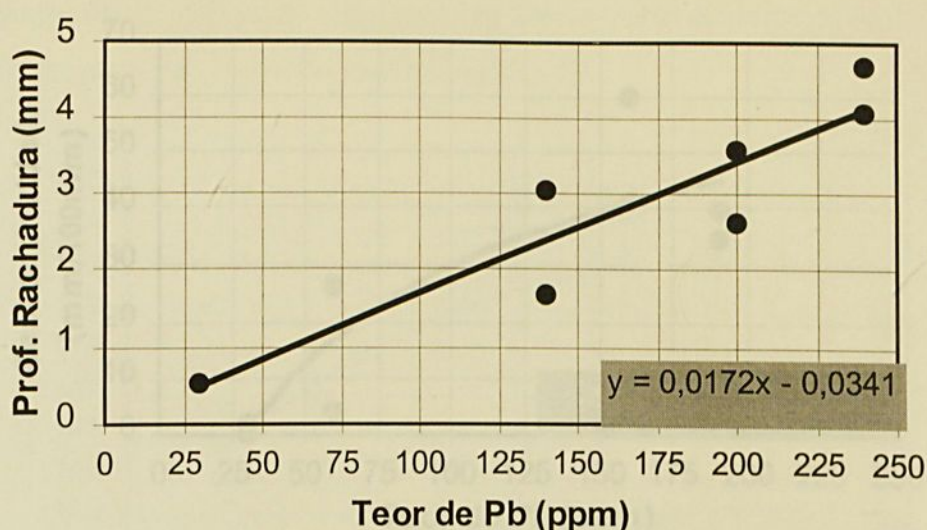


FIGURA 25 – Relação entre profundidade média de rachadura e teor de Pb – liga homogeneizada

Um outro parâmetro avaliado foi a descontinuidade lateral, definida como sendo o somatório da largura das rachaduras, maior que 4 mm, a cada 100 mm de comprimento da tira.

As Figuras 26 e 27 mostram os valores da descontinuidade lateral para cada uma das condições estudadas da liga, não homogeneizada e homogeneizada.

Foi notado que houve um crescimento gradativo da largura das rachaduras, acompanhando o incremento de Pb na liga, até sua estabilização em torno de 60 mm, no caso da liga homogeneizada. Esta estabilização se deu a partir de 200 ppm de chumbo, permanecendo praticamente constante acima deste valor de contaminação.

No caso da liga não homogeneizada também foi observado esta tendência, porém a estabilização ocorreu a um valor menor e não apresentou uma relação tão bem caracterizada como na liga homogeneizada. Outra observação é que novamente a amostra 190N apresentou resultado melhor que a 160N.

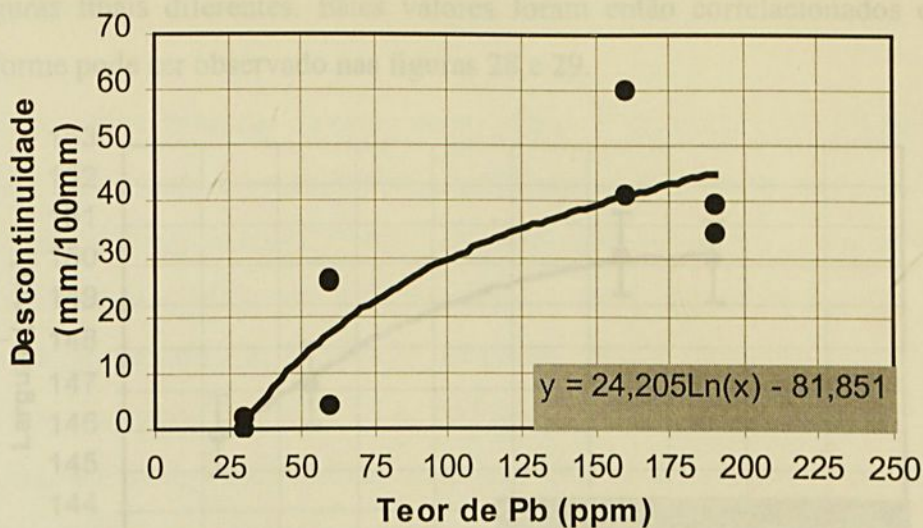


FIGURA 26 – Relação entre a descontinuidade lateral e o teor de Pb – liga não homogeneizada

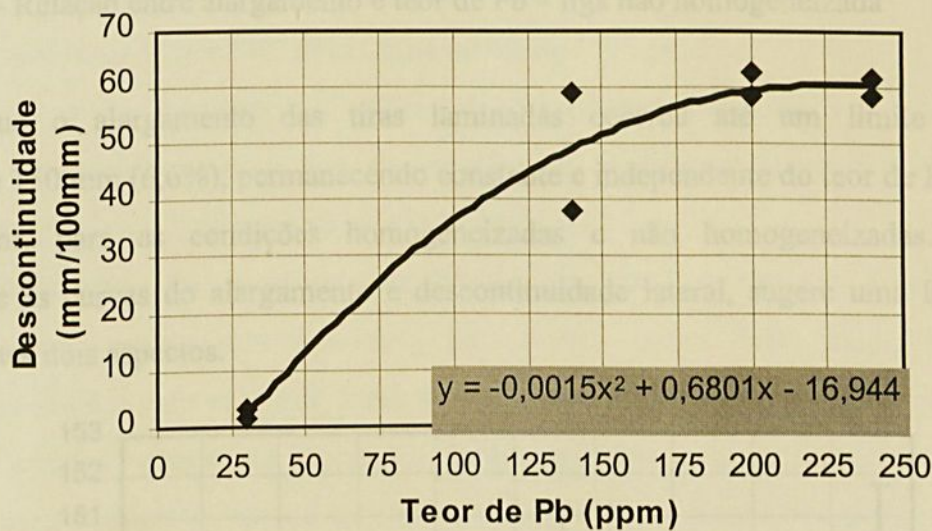


FIGURA 27 – Relação entre a descontinuidade lateral e o teor de Pb – liga homogeneizada

3.2- Efeito da concentração chumbo no alargamento das tiras durante a laminação a quente

Durante a laminação a quente o material se deforma também no sentido transversal à direção de laminação. Apesar de ser ter sido utilizado o mesmo processo, sob as mesmas condições e mantidos os mesmos parâmetros de ensaio, o que se observou foi que as tiras

apresentaram larguras finais diferentes. Estes valores foram então correlacionados com teores de Pb, conforme pode ser observado nas figuras 28 e 29.

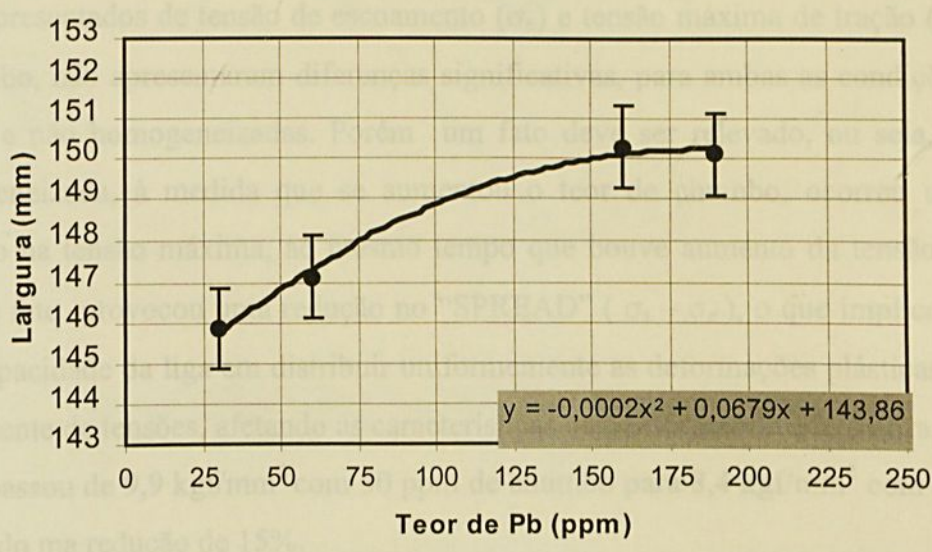


FIGURA 28– Relação entre alargamento e teor de Pb – liga não homogênea

Notou-se que o alargamento das tiras laminadas ocorreu até um limite de aproximadamente 150 mm (6,6%), permanecendo constante e independente do teor de Pb a partir deste valor, para as condições homogêneas e não homogêneas. A similaridade entre as curvas do alargamento e descontinuidade lateral, sugere uma forte interação entre estes dois aspectos.

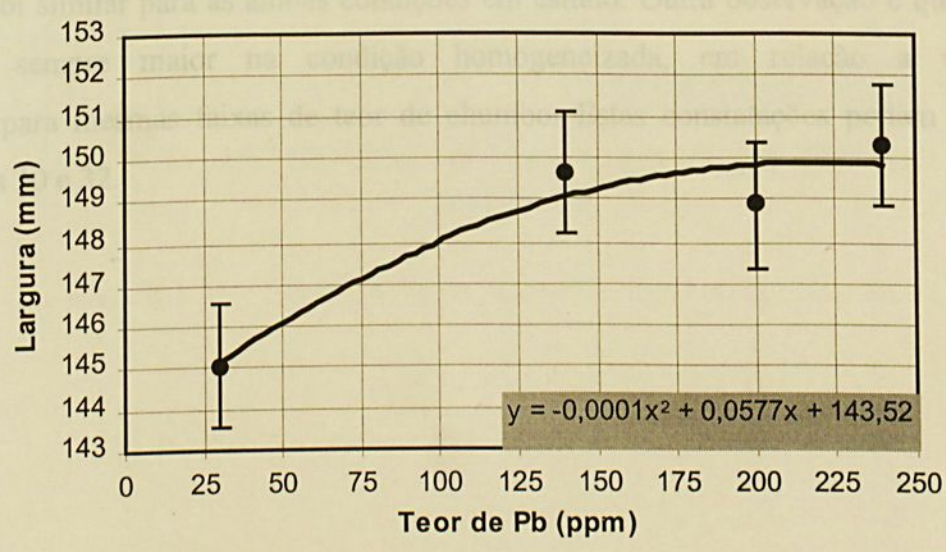


FIGURA 29 - Relação entre alargamento e teor de Pb – liga homogênea

3.3- Efeito da concentração de chumbo nas propriedades mecânicas de tração

Os valores apresentados de tensão de escoamento (σ_e) e tensão máxima de tração (σ_t), por teor de chumbo, não apresentaram diferenças significativas, para ambas as condições, homogeneizadas e não homogeneizadas. Porém um fato deve ser relevado, ou seja, na condição homogeneizada, à medida que se aumentou o teor de chumbo, ocorreu uma gradativa redução na tensão máxima, ao mesmo tempo que houve aumento da tensão de escoamento. Este fato provocou uma redução no "SPREAD" ($\sigma_t - \sigma_e$), o que implica na diminuição da capacidade da liga em distribuir uniformemente as deformações plásticas na presença de gradiente de tensões, afetando as características de conformabilidade da tira.

O "spread" passou de 9,9 kgf/mm² com 30 ppm de chumbo para 8,4 kgf/mm² com 240 ppm, representando uma redução de 15%.

Na condição não homogeneizada a tendência citada acima também foi observada, tornando-se mais acentuada para níveis de chumbo acima de 150 ppm.

As Figuras 30 e 31 mostram os valores de resistência mecânica e spread, respectivamente, relacionados com o teor de chumbo na condição homogeneizada. A condição não homogeneizada é apresentada nas Figuras 32 e 33.

Quanto ao alongamento, foi observado uma leve tendência de aumento, para níveis de chumbo até 60 ppm, caindo drasticamente para teores acima deste valor. Esse comportamento foi similar para as ambas condições em estudo. Outra observação é que o alongamento é sempre maior na condição homogeneizada, em relação a não homogeneizada, para mesmas faixas de teor de chumbo. Estas constatações podem ser vistas nas Figuras 30 e 32.

FIGURA 31 - Efeito do Pb no "spread" - liga homogeneizada

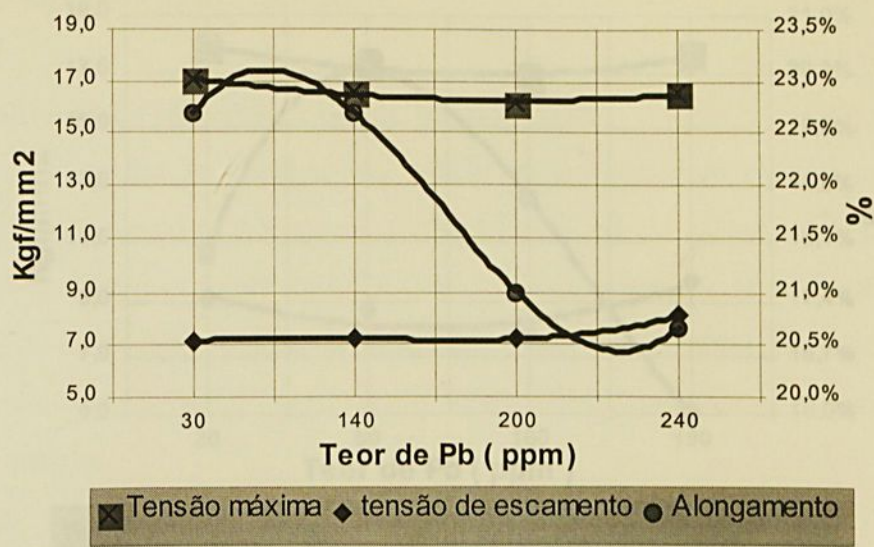


FIGURA 30 – Efeito do Pb nas propriedades mecânicas – liga homogeneizada

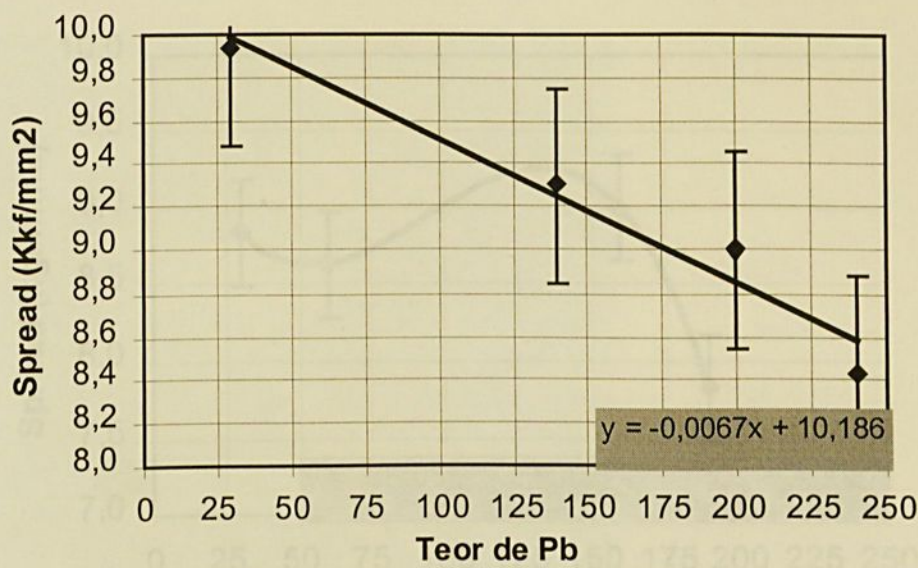


FIGURA 31 – Efeito do Pb no “spread” – liga homogeneizada

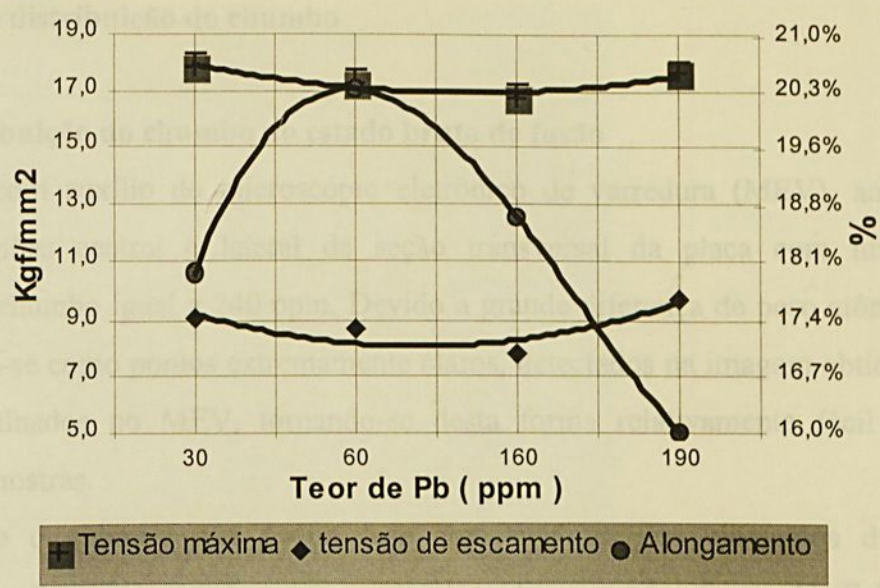


FIGURA 32 – Efeito do Pb nas propriedades mecânicas – liga não homogeneizada

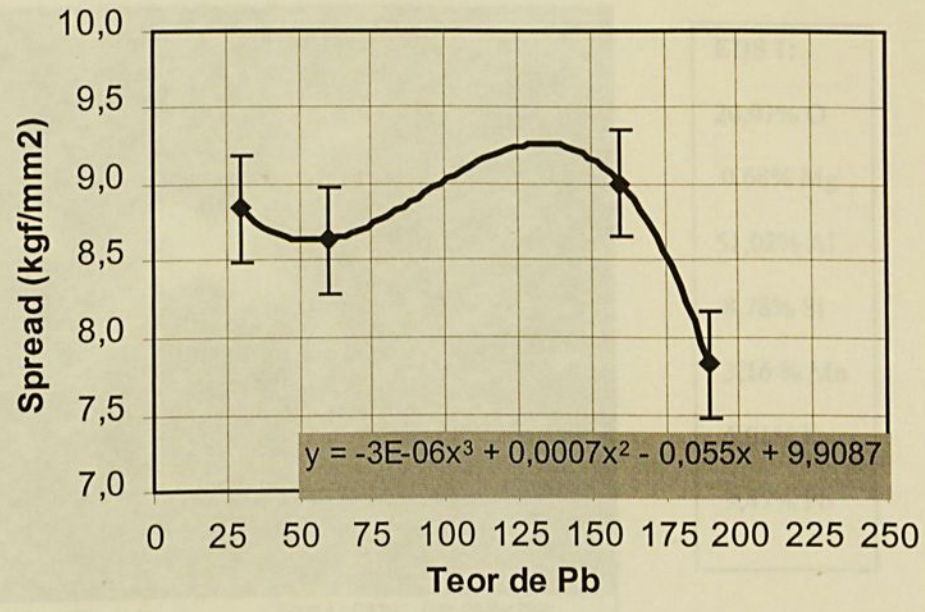


FIGURA 33 – Efeito do Pb no “spread” – liga não homogeneizada

3.4- Morfologia e distribuição do chumbo

3.4.1 – Distribuição do chumbo no estado bruto de fusão

Analizou-se com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), amostras retiradas das regiões central e lateral da seção transversal da placa com nível de contaminação de chumbo igual a 240 ppm. Devido a grande diferença de peso atômico, o chumbo apresenta-se como pontos extremamente claros, detectados na imagem obtida com elétrons retroespalhados no MEV, tornando-se desta forma relativamente fácil a sua localização nas amostras.

Notou-se que o chumbo não forma fase com nenhum dos elementos de liga, apresentando-se sempre segregado, nas partículas de segunda fase, $Al_6(FeMn)$ e $Al_{12}(FeMn)_3Si_2$, ou em vazios. Não foi notado diferença na quantidade de segregações entre a lateral e centro. As Figuras 34, 35, 36 e 37 ilustram estas condições.

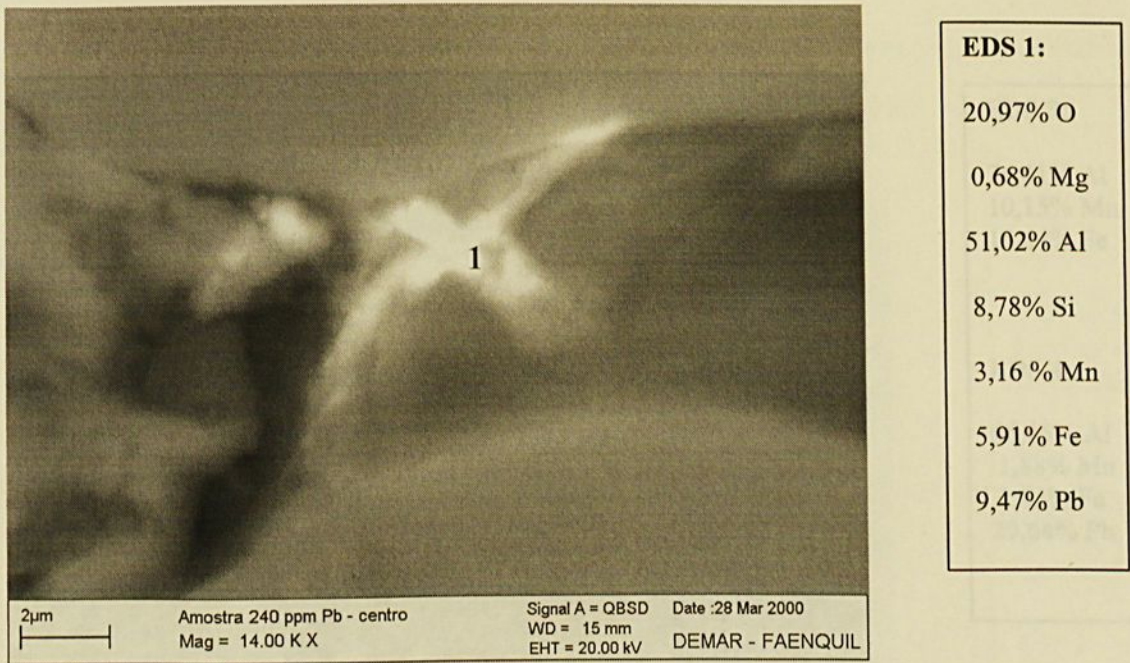
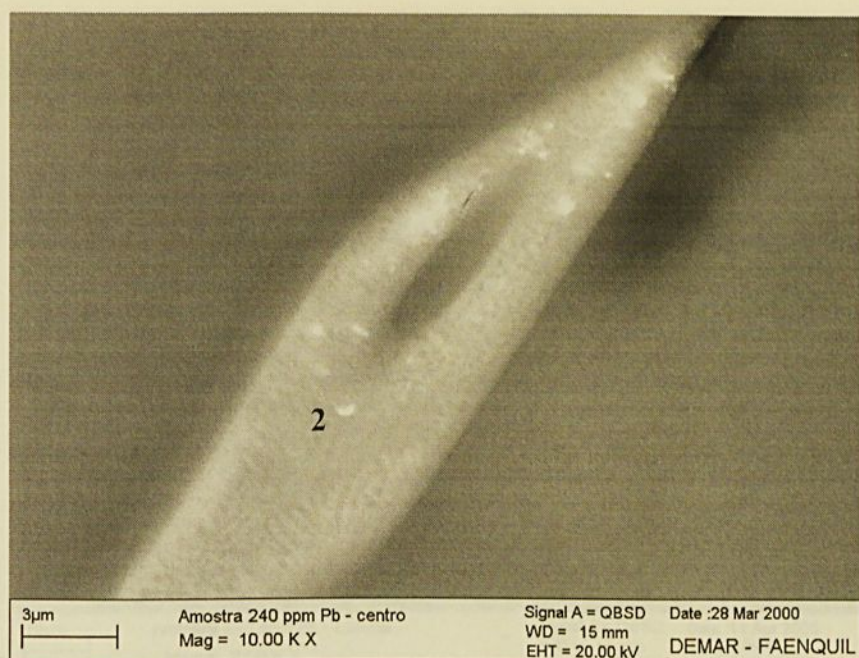


FIGURA 34- Chumbo segregado em vazio –liga AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal da placa, sem ataque.

**EDS 2 :**

71,59% Al

2,82% Si

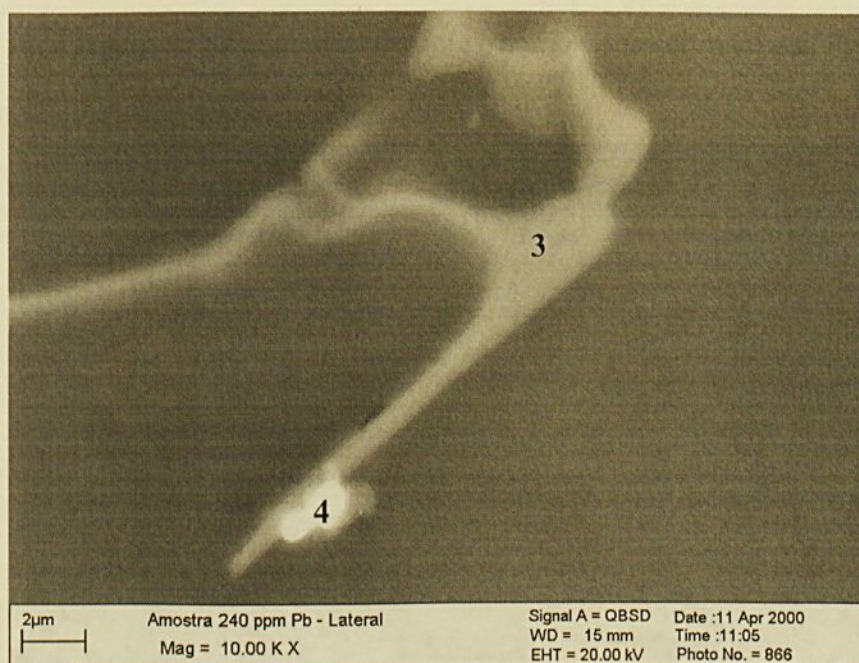
10,28% Mn

14,97% Fe

0,10% Pb

3 μm Amostra 240 ppm Pb - centro
Mag = 10.00 K X
Signal A = QBSD Date :28 Mar 2000
WD = 15 mm
EHT = 20.00 kV DEMAR - FAENQUIL

FIGURA 35 - Chumbo segregado na partícula de segunda fase $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ – liga AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal, sem ataque.

**EDS 3:**

74,41% Al

10,15% Mn

15,44% Fe

EDS 4 :

66,45% Al

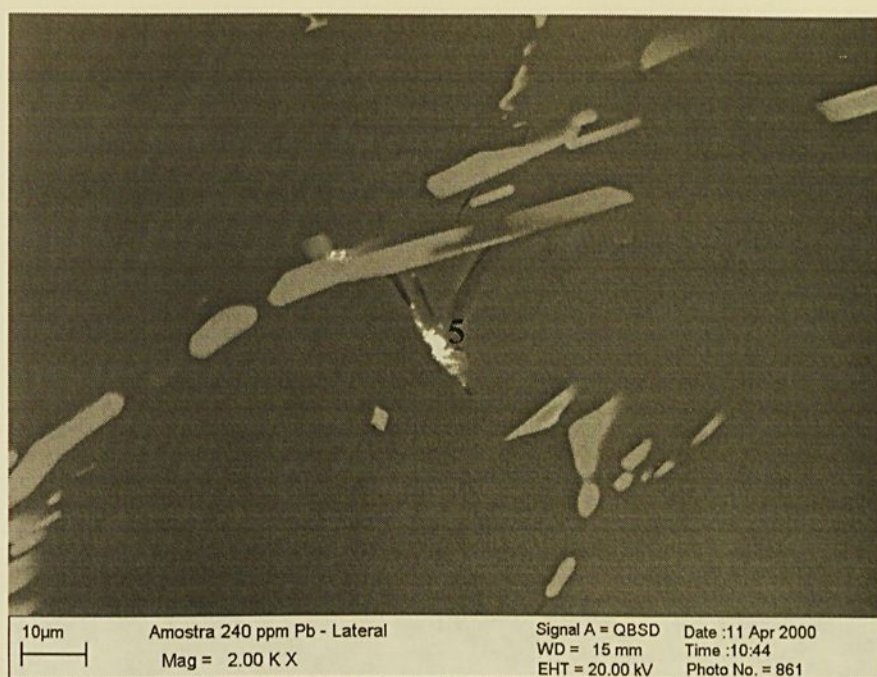
1,88% Mn

2,03% Fe

29,64% Pb

2 μm Amostra 240 ppm Pb - Lateral
Mag = 10.00 K X
Signal A = QBSD Date :11 Apr 2000
WD = 15 mm Time :11:05
EHT = 20.00 kV Photo No. = 866

FIGURA 36 - Chumbo segregado na partícula de segunda fase $Al_6(FeMn)$ - liga AA3104 com 240 ppm de chumbo, amostra da lateral da seção transversal da placa, sem ataque.

**EDS 5 :**

64,72% Al

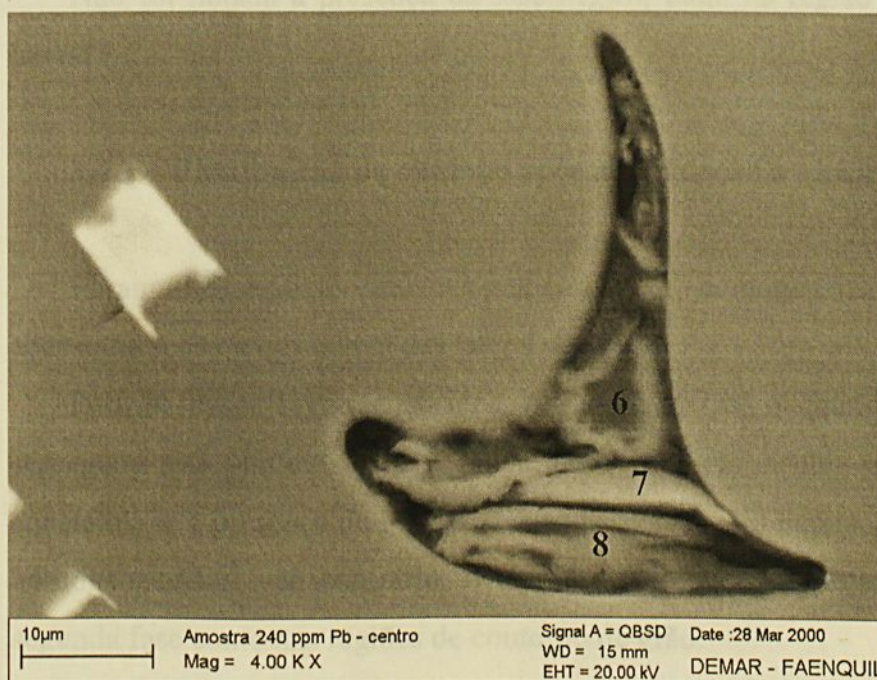
10,60% Si

1,80% Fe

22,87% Pb

FIGURA 37 - Chumbo segregado nm vazio – liga AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra lateral da seção transversal da placa, sem ataque.

Nos vazios foi também notado a presença de óxidos e elementos contaminantes da reciclagem (Ba - pigmento de tinta), como pode ser visto nas Figuras 38 e 39.

**EDS 6 :**

20,39% MgO

65,91% Al_2O_3 10,64% SiO_2 **EDS 7 :**

0,95% MgO

96,74% Al_2O_3 2,00% SiO_2 **EDS 8 :**

0,70% MgO

97,65% Al_2O_3 1,27% SiO_2

FIGURA 38 – Presença de MgO, Al_2O_3 e SiO_2 em vazio - – liga AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal da placa, sem ataque.

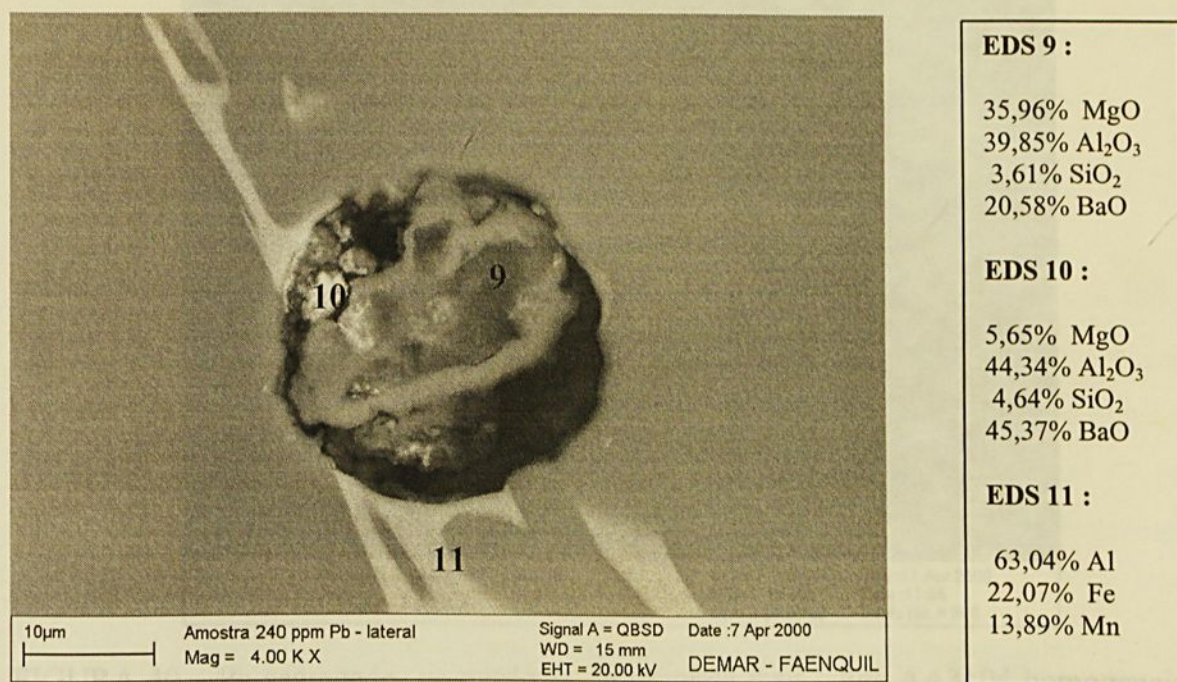


FIGURA 39 – Presença de MgO, Al₂O₃, SiO₂ e BaO em vazios de uma partícula de segunda fase do tipo Al₆(FeMn) - liga AA3104 com 240 ppm de Pb, amostra do centro da seção transversal da placa, sem ataque.

Não foi notada a presença da fase Mg₂Si, tanto na região central, com também na lateral.

3.4.2 – Distribuição do chumbo após a laminação a quente

Foram analisadas as amostras nas condições homogeneizadas e não homogeneizada, apenas na seção longitudinal das lateral das tiras.

Para os casos homogeneizados, observou-se que o chumbo se encontra totalmente segregado nas partículas de segunda fase, pois em nenhuma das amostras analisadas constatou-se a presença de Pb fora destas partículas. No entanto, no caso das amostras não homogeneizadas, ao contrário, o chumbo continuou segregado tanto nas partículas de segunda fase como nas regiões de contorno de grão.

As Figuras 40 e 41 apresentam a localização do chumbo na liga para as condições homogeneizadas e não homogeneizadas, respectivamente, após a laminação a quente.

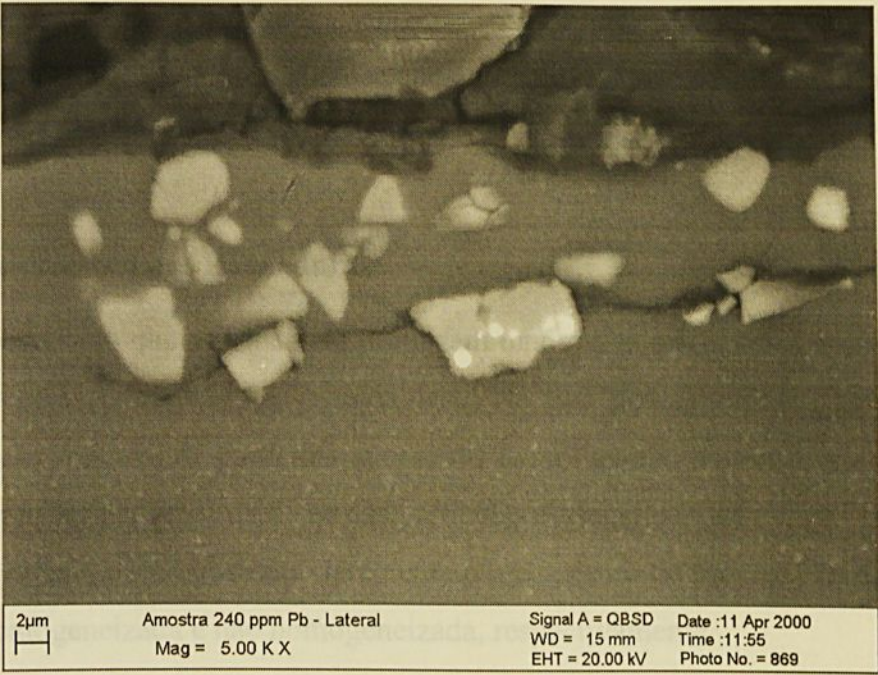


FIGURA 40 – Pb segregado na partícula de segunda fase – liga AA3104 homogeneizada com 240 ppm de Pb, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.

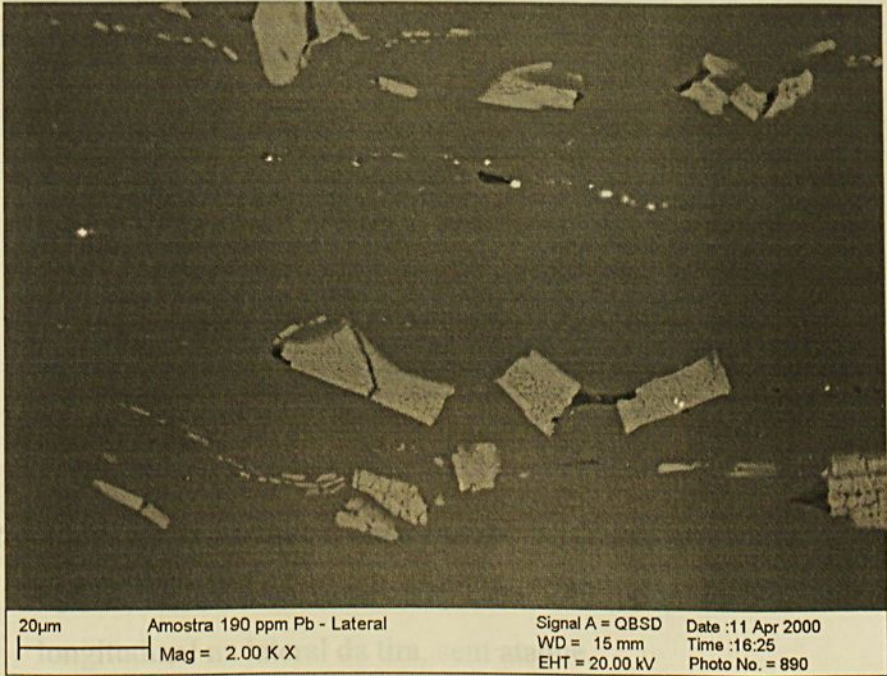


FIGURA 41 – Pb segregado em partículas de segunda fase e contornos de grão – liga AA3104 não homogeneizada com 190 ppm de Pb, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.

Outro fator relevante é que as amostras não homogeneizadas apresentaram uma quantidade maior de partículas quebradas após a laminação a quente, conforme se observa na figura 40.

3.4.3– Caracterização das Rachaduras

Foi observado que as trincas se propagam tendo suas orientações preferencialmente direcionadas pelas partículas de segunda fase. Na liga homogeneizada este processo é provocado pela presença de partículas grosseiras e, na liga não homogeneizada em função do arranjo com aspecto bruto de fusão das partículas de segunda fase.

As figuras 42 e 43 ilustram claramente o mecanismo de propagação das trincas nas condições homogeneizada e não homogeneizada, respectivamente.

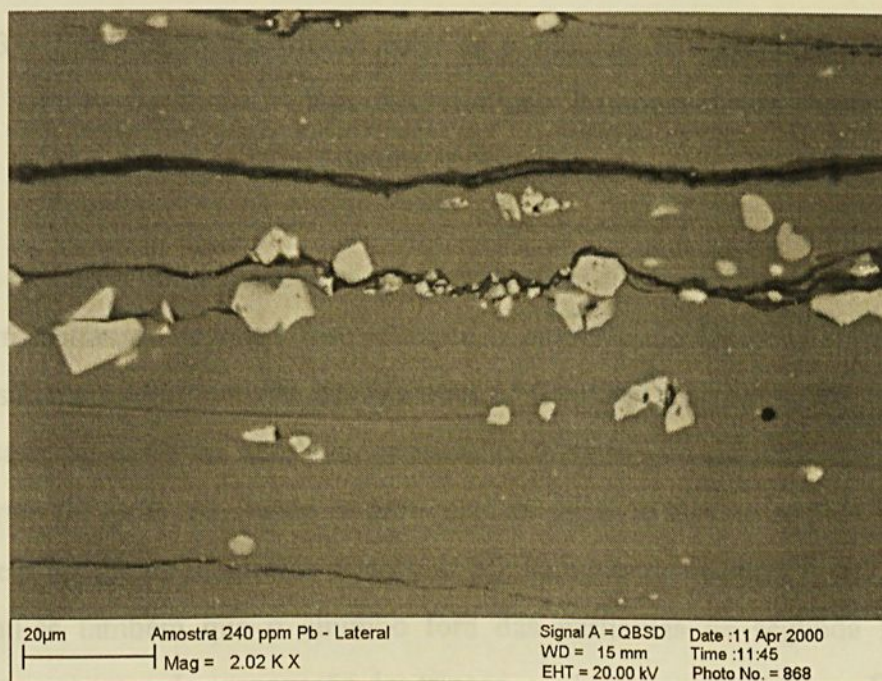


FIGURA 42 – Propagação da trinca, contornando partículas grosseiras de segunda fase – liga AA3104 homogeneizada com 240 ppm de Pb, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.

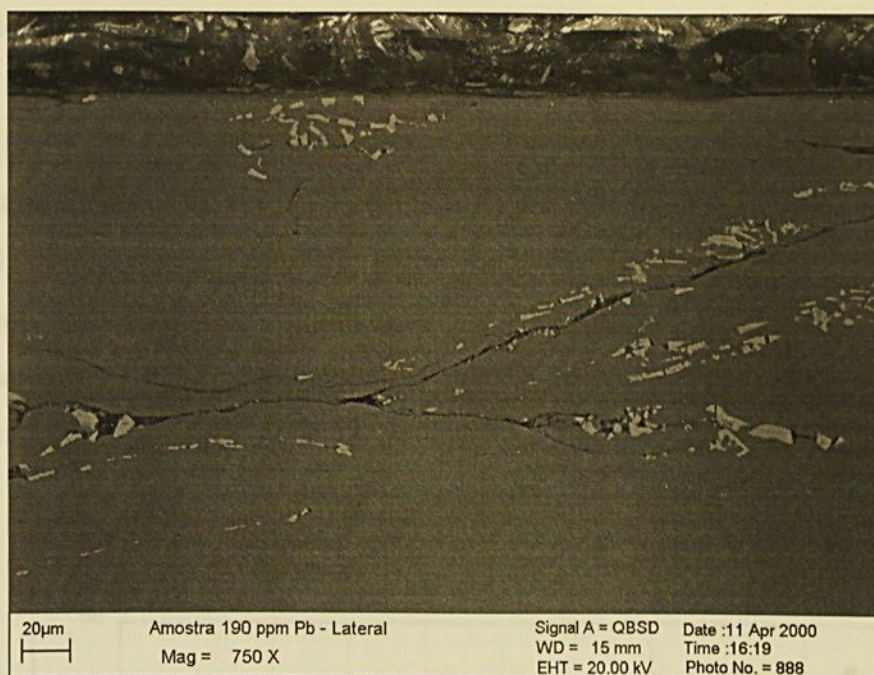


FIGURA 43 – Propagação das trincas entre as partículas de segunda fase, com aspecto bruto de fusão – liga AA3104 não homogeneizada, amostra da seção longitudinal na lateral da tira, sem ataque.

Para os casos homogeneizados as propagações devido a descoesão geradas pelas partículas grosseiras de segunda fase, durante o processo de laminação a quente. Estas descoesões são mais significativas nas amostras com valores maiores de Pb.

No caso das amostras não homogeneizadas, a laminação a quente tende a modificar o aspecto bruto de fusão, alinhando as partículas de segunda fase ao sentido de laminação. As trincas se propagaram na mesma direção de alinhamento destas partículas.

Notou-se também que o chumbo fora das partículas de segunda fase não tem preferência no processo de propagação das trincas, conforme apresentado na figura 41.

3.4.4– Tamanho das Partículas de Segunda Fase

Por meio do analisador de imagem determinou-se a densidade de partículas grosseiras, maiores que $100\ \mu\text{m}^2$ [26], no sentido transversal do centro e lateral das tiras, para as condições homogeneizada e não homogeneizada.

Na condição homogeneizada a quantidade de partículas grosseiras por milímetro quadrado aumentou proporcionalmente à elevação do teor de chumbo, passando de 22 partículas/ mm^2 com 30 ppm para 52 partículas/ mm^2 com 240 ppm. Na figura 44 é apresentado a densidade de partículas grosseiras em função do teor de Pb.

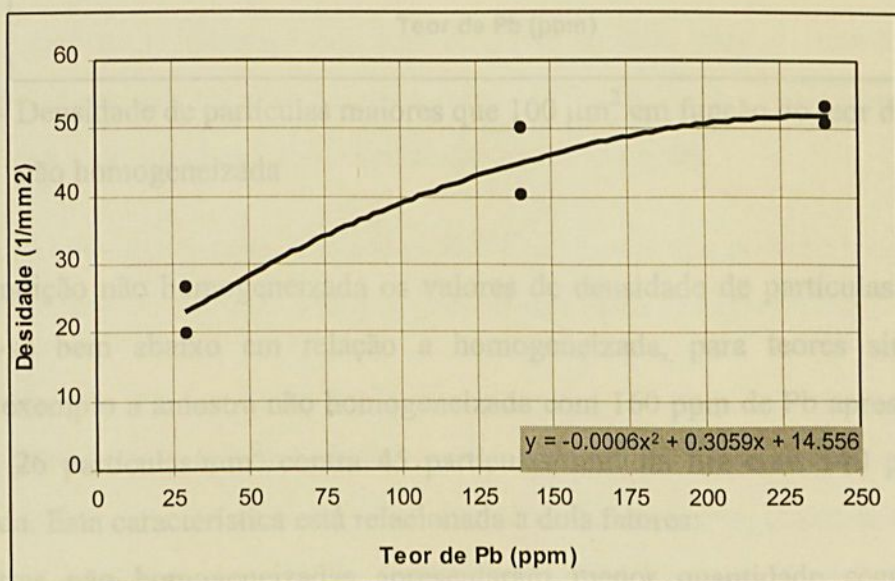


FIGURA 44 – Densidade de partículas maiores que $100\ \mu\text{m}^2$ em função do teor de chumbo – liga AA3104 homogeneizada

Na condição não homogeneizada também é observada uma tendência de crescimento com aumento do teor de chumbo, porém não tão pronunciado quanto observado na condição homogeneizada. A figura 45 apresenta a relação entre aumento da densidade de partículas grosseiras e o teor de Pb.

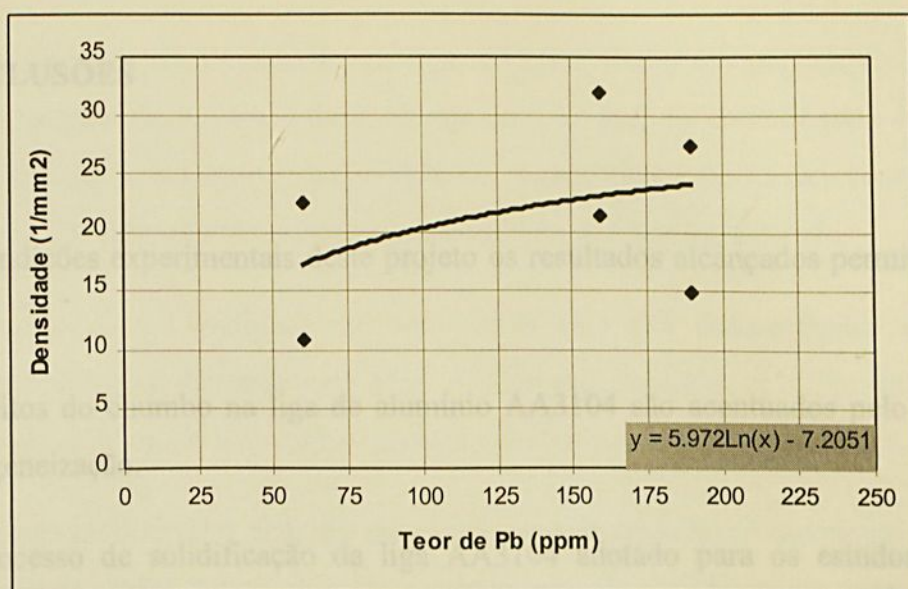


FIGURA 45 – Densidade de partículas maiores que $100 \mu\text{m}^2$ em função do teor de Pb – liga não homogeneizada

Na condição não homogeneizada os valores de densidade de partículas grosseiras apresentaram-se bem abaixo em relação a homogeneizada, para teores similares de chumbo. Por exemplo a amostra não homogeneizada com 160 ppm de Pb apresentou uma densidade de 26 partículas/ mm^2 contra 45 partículas/ mm^2 da tira com 140 ppm de Pb homogeneizada. Esta característica está relacionada a dois fatores:

- As amostras não homogeneizadas apresentaram menor quantidade segregação de chumbo nas partículas de segunda fase em relação as homogeneizadas;
- A laminação a quente provocou a quebra de uma grande quantidade das partículas de segunda fase não homogeneizada.

4 – CONCLUSÕES

Para as condições experimentais deste projeto os resultados alcançados permitem concluir que:

- 1- Os efeitos do chumbo na liga de alumínio AA3104 são acentuados pelo processo de homogeneização.
- 2- No processo de solidificação da liga AA3104 adotado para os estudos, o chumbo segregou-se nas partículas de segunda fase, $Al_6(FeMn)$ e $Al_{12}(FeMn)_3Si_2$, e ocupou os vazios, tanto na lateral quanto no centro das placas (lingote).
- 3- Durante a homogeneização, realizada a $590^{\circ}C$ por um tempo de banho de cinco horas, o chumbo segregado nos vazios migrou para as partículas de segunda fase .
- 4- O chumbo, segregado nas partículas de segunda fase, contribuem para o crescimento destas partículas (partículas maiores que $100\ \mu m^2$), aumentando sensivelmente a densidade de partículas grosseiras. Nas amostras da liga homogeneizada a densidade de partículas grosseiras passou de 22 por milímetro quadrado com 30 ppm de chumbo para 52 com 240 ppm.
- 5- Nas amostras da liga não homogeneizada o aumento de densidade de partículas grosseiras em relação ao teor de chumbo foi menor que na condição homogeneizada. A amostra com 60ppm de Pb apresentou após a laminação uma densidade de aproximadamente 18 partículas grosseiras / mm^2 e 21 partículas grosseiras/ mm^2 para amostra com 190 ppm.
- 6- A partículas grosseiras provocaram descoesões com a matriz durante o processamento a quente , o que proporcionou a nucleação e propagação de trincas.



- 7- Quanto maior o teor de chumbo na liga AA3104, maior é a profundidade média das rachaduras laterais, passando de 0,55 mm com 30 ppm de chumbo para 4,07 mm com 240 ppm (2,85% da largura) na condição homogeneizada e de 0,5 mm com 30 ppm para 2,26 com 190 ppm (1,6% da largura) na condição não homogeneizada.
- 8- O aumento da profundidade das rachaduras gera por consequência acréscimo no alargamento lateral das tiras laminadas. A diferença média entre as amostras de baixo e alto teores de chumbo foi de aproximadamente 5 mm.
- 9- Para teores até 60 ppm o chumbo provocou um acréscimo no alongamento, decrescendo bruscamente acima deste valor. Este comportamento foi observado tanto na condição homogeneizada quanto na não homogeneizada.
- 10- A conformabilidade da liga, avaliada neste estudo pela diferença entre a tensão máxima de tração e a tensão de escoamento (SPREAD), é reduzida a medida que se eleva a quantidade de chumbo na liga.
- 11- No caso homogeneizado o valor médio do "SPREAD" passou de 9,9 Kgf/mm² com 30 ppm de Pb para 8,4 Kgf/mm² com 240 ppm.

4.1 – Sugestões para futuros trabalhos

1. Analisar o efeito do chumbo sobre a anisotropia (formação do earring) da liga de alumínio AA3104.
2. Realizar este estudo, partindo da produção de placas obtidas no processo Direct Chill, onde as taxas de resfriamento são bem diferentes das realizadas neste estudo (produzidas em coquilha).



3. Aprofundar o estudo dos mecanismos de geração e propagação de trincas no processamento a quente da liga AA3104
4. Analisar efeitos de outros elementos contaminantes da recilcagem no processamento da liga de alumínio AA3104 como, por exemplo, Na, Ca, Li e Zn.
5. Estudar a influência do chumbo no processo de laminação a frio da liga de alumínio AA3104.



5 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA

- 01- ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Produção e reciclagem de latas. Disponível: site **ABAL**. URL: <http://www.abal.com.br>
- 02- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio**: do minério ao lingote. São Paulo: ABAL, 1983. p. 1-9. (Boletim Técnico, 3).
- 03- MACGEER, J.P. A produção do alumínio. In.: CONGRESSO ANUAL DA ABM - CONFERÊNCIA CIENTÍFICA PROFERIDA, 31. **Anais...** Belo Horizonte: ABM, 1976. p. 137-150.
- 04- ANUÁRIO Estatístico 1998. São Paulo: ABAL, 1998. (CD-Rom).
- 05- ALUMINUM Standard and Data. USA: The Aluminum Association, 1990. p. 15.
- 06- HOSFORD, W. F., DUCAN, J. L. The Aluminum Beverage Can. **Scientific American**, p.48-53, Sept. 1994.
- 07- ROOY, E. L., VAN LINDEN, J. H. L.. Recycling of Aluminum, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. In.: **Metals Handbook**. 10. ed. Ohio: ASM, 1990. p.1205-1213. v.2.
- 08- FILLETI, A. Influência da Impureza da Sucata de Latas na Reciclagem. In.: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RECICLAGEM DO ALUMÍNIO, 2. **Anais...** São Paulo : ABAL, 1995. p. 1-9.
- 09- FILLETI, A. Desafios da Reciclagem de Latas Usadas no Brasil : a experiência da Alcan. In.: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE

RECICLAGEM DO ALUMÍNIO, 4, 2-5 de setembro de 1997. **Anais...**
São Paulo : ABAL, 1997. p. 1-8.

- 10- VAN HORN, K. R. Aluminum : Properties, Physical Metallurgy and Diagrams. In.: **American Society for Metals**. 4.ed. USA: ASM, 1971.
p. 51, 205-206, 369. v.1.
- 11- HESS, J. B. Physical Metallurgy of Recycling Wrought Aluminum Alloys. **Metalurgical Transactions** , v.14, p. 323-327, Mar. 1983,
- 12- HATCH, J.E. Aluminum : Properties and Physical Metallurgy. **ASM**, v.1, 1984,
p. 231.
- 13- LEWANDOWSKI, J.J., KOHLER, V., HOLROYD, N.J.H. Effects of lead on the Sustained-Load Cracking of A-Mg-Si Alloys at Ambient Temperatures. **Materials Science and Engineering**, v.95, p. 185-195, 1987.
- 14- RECYCLING Technology. In.: **Introduction to Aluminium and Aluminium Alloys**. [S.l.: s.n]: 19--. P.47-55.
- 15- ROY, R. R., SAHAI, Y. The Role of Salt Flux in Recycling Aluminum. In.: **Light Metals**. Warrendale: TMS, 1998. p. 1237-1238.
- 16- APOTHEKER, S. Alcan Strengthens Presence in UBC Market. **Resource Recycling**, v. , p. 49-50, 1990.
- 17- STEVERSON, W.B. Can Sheet Performance as a Function of UBC Quality , In.: MORRIS, J.G. et al. **Aluminum Alloys for Packaging III**. Warrendale: TMS, 1998. p 151-179.



18- BRASIMET. Disponível: site **Brasimet**. URL: <http://www.brasimet.com.br> (Figura).

19- SECO. Disponível: site **Seco**. URL: <http://www.seco-warwick.com/moltenmet/molten.htm> (Figura).

20- CATÁLOGO de Produtos Alcan Alumínio do Brasil Ltda. São Paulo: Alcan, 19--. P.16.

21- VENTRE, I. New Trends In Metal Filtration : The Pechiney Deep Bed Filter. In.: NILMAN, M. AUSTRALASIAN ASIAN PACIFIC COURSE AND CONFERENCE ON ALUMINIUM CAST HOUSE TECHNOLOGY: THEORY & PRACTICE, 4. **Anais...** Warrendale: TMS, c1995. p. 171-181.

22- WANG, X. Morphological Aspects of Inclusions in AA3104 D&I Can Stock Alloy, Light Metals. **The Minerals, Metals & Materials Society**, p. 963 - 972, 1997.

23- WAGSTAFF. Disponível: site **Wagstaff**. URL.: <http://www.wagstaff.com> (Figura).

24- BACKERAD, L, KRÓL, E, TAMMINEN, J. Alloy AA3004. In.: **Solidification Characteristics of Aluminum Alloys**. Oslo: Skanaluminium, c1986. p. 101-106. Vol.1: Wrought alloys.

25- MERCHANT, H. D, CRANE, J, CHIA E. H. Homogeneization and Annealing of Aluminum and Cooper Alloy. **The Metallurgy Associaty**. Vol. 2, 1988,p. 206- 218.

26- LI, Z., LI, X., MORRIS, J. G Precipitate Behavior of 3004 Aluminium Alloy



After Preheat Treatment. In.: MORRIS, J.G. et al. **Aluminum Alloys for Packaging**. Warrendale: TMS, 1993. p. 61-69.

27- EBNER. Disponível: site **Ebner**. URL: [http:// www.ebner-fornace.com](http://www.ebner-fornace.com) (Figura).

28- REN, B. Evolution of Rolling and Recrystallization Textures in a Hot Rolled Can Body Stock Alloy. In.: MORRIS, J.G. et a. **Aluminum Alloys Packaging II**. Warrendale: TMS, 1996. p. 41-48.

29- ROCHA, R. M., GDOVKA, K. A., KERBAUGH, S. T. Largest Aluminum Rolling Mill in South America. **Light Metal Age**, v. 57, p. 8-12, 1999.

30- ALCAN. Disponível: site **Alcan**. URL: [http:// www.alcan.com](http://www.alcan.com) (Figura).

31- MARSHALL, O J., MEREDITH, M.W., BOLINGBROKE, R. K. The Effect of Initial Microstruture on the Evolution of Crystallographic Texture in AA3104 During Simulation of Hot Rolling, In.: MORRIS, J. G. et al. **Alluminum Alloys Packaging II**. Warrendale: TMS, 1996. p. 74.

32- HOYLE, W.C., SETLAK, F.R. Tends and Needs in Can Stock: A Packaging Company's Perspective. **Journals of Metals**, v. 7, p.33-36, 1996.

33- GUTTMANN, M., QUANTIN, B., DUMOULIN, P. Intergranular Creep Embrittlement by Non-soluble Impurity: Pb in Precipitation hardened Al-Mg-Si Alloys. **Metal Science**, v. 17, p. 123-140, 1983.

34- TREMBLAY, F. **Control of Lead Contamination During UBC Recycling**. USA: Alcan International Limited, 1993. p. 3. (AR-93/0048)



