ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Laminação de Folhas de Alumínio

Processos de Produção e Beneficiamento de Folhas de Alumínio

Arthur Seiji Nishikawa NºUSP: 6486549
Fernando Santos da Cunha NºUSP: 6480380
Rodrigo de Souza Dalti Pereira NºUSP: 6480539

São Paulo
18/10/2011

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 2
1.1 Terminologia de produtos planos 3
2 CADEIA PRODUTIVA 5
2.1 Metalurgia extrativa do alumínio 6
2.2 Lingotamento 7
2.2.1 Lingotamento convencional 7
2.2.2 Lingotamento contínuo 7
2.3 Laminação 9
3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA: A LAMINAÇÃO 10
3.1 Laminador 10
3.2 Laminação a Quente e Laminação a Frio 11
Laminação a quente 12
Laminação a frio 13
3.3 Laminação de folhas de alumínio 14
3.4 Pós-processamento das folhas de alumínio 16
4 FALHAS E DEFEITOS DE PRODUÇÃO 18
4.1 Diboreto de Titânio 18
4.2 Silicatos 19
4.3 Óxidos de Magnésio e Espinélios 20
4.4 Alumina 21
4.5 Hidrogênio 22
4.6 Resíduos de Alumínio 23
4.7 Intermetálicos 23
4.8 Normas para porosidade 24
5 INFORMAÇÕES DE MERCADO 25
5.1 Aplicações 25
5.2 Estatísticas da produção de alumínio 25

1 INTRODUÇÃO

O alumínio, embora seja o terceiroelemento mais abundante na face da terra, é jovem no que diz respeito a seu uso em escala comercial. Em sua forma metálica, o alumínio é produzido em larga escala há cerca de 150 anos, mas trata-se hoje do metal não ferroso mais consumido no planeta, chegando superar a produção de todos os demais não ferrosos[1].

A justificativa da história recente da produção do alumínio metálico é a dificuldade de redução do minério. A bauxita, principal minério utilizado na obtenção do alumínio metálico, contém de 35% a 55% de óxido de alumínio. Uma vez que o alumínio possui maior tendência de formar óxidos em relaçãoà maioria dos agentes redutores convencionais (CO, H_2), o processo de isolamento do metal (redução) deve ser feito por um método que não siga a rota pirometalúrgica [1].

Há exemplos de uso do alumínio desde a confecção de produtos com baixo nível de acabamento, como laminados e produtos extrudados, a materiais estruturais para aplicação na indústria aeronáutica [1]. Neste último caso, a presença de elementos de liga é fundamental para a elevação da resistência do material. Vale dizer que em tal caso o mecanismo de endurecimento ocorre principalmente pela precipitação de partículas nanométricas mediante o tratamento térmico de envelhecimento[2].

A diversidade de aplicações que o alumínio encontra decorre da versatilidade de técnicas de manufatura conciliada com suas boas propriedades mecânicas e químicas. O diagrama de Ashby (Figura 1) auxilia na escolha do material para o projeto, correlacionando a propriedade mecânica com sua densidade. É sabido que para determinadas aplicações há uma específica relação entre a propriedade mecânica e a densidade. Dessa forma, a partir do diagrama, é possível escolher os materiais que aperfeiçoarão o projeto[3].

Outra propriedade que destaca o alumínio como excelente material de construção é sua excelente resistência à corrosão. Curiosamente, sua forte afinidade com o oxigênio, principal motivo pela custosa produção do metal, é a peça chave da proteção do material contra a oxidação. Há a formação de uma fina camada de óxido coerente na superfície do material; essa camada acabada por proteger o metal da reação com o oxigênio disponível na atmosfera de trabalho. Tal

fenômeno é conhecido como passivação e é o mesmo princípio utilizado em aços inoxidáveis.

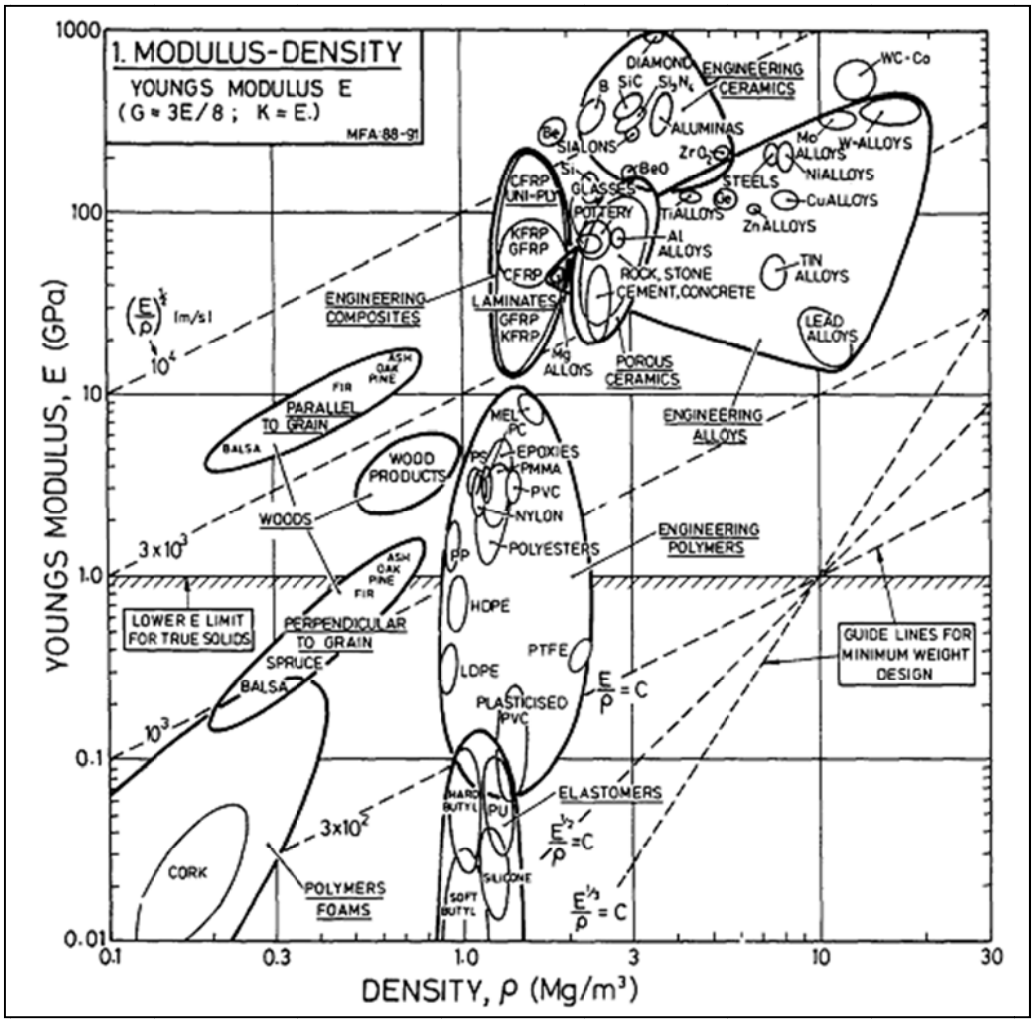

Figura 1 – Ábaco de seleção de materiais do programa "Cambridge Materials Selector" que pode ser utilizado para selecionar materiais para projetos *mais leves* e *mais rígidos* [Ashby apud Abel, 1994].

1.1 Terminologia de produtos planos

Por meio da laminação, podem-se produzir placas, chapas e folhas de alumínio. A diferença entre os três produtos reside no tamanho de sua espessura final[4]:

- Placas (*plates)* – possuem espessura igual ou superior a 6,3 mm. Suas bordas podem ser cortadas ou serradas. São produzidas normalmente na forma plana, embora possam ser bobinadas. Alguns produtores de placas

de alumínio podem utilizar processamento adicional ou aplicar tratamentos especiais de superfície a fim que de que o produto final esteja de acordo com a aplicação desejada.

- Chapas *(sheets)* – apresentam espessura inferior a 6,3 mm, porém superior a 0,20 mm. Podem ser produzidos na forma bobinada ou plana e em variados formatos.
- Folhas *(foils)* – produto laminado que tem espessura inferior a 0,20mm.

As folhas de alumínio, por carregarem consigo as excelentes propriedades do material, são amplamente utilizadas na indústria alimentícia (camada de revestimento em embalagens, camada-base para embalagens de doces), no uso doméstico, em fins decorativos e mesmo aplicações de avançado domínio tecnológico, como a produção de capacitores. Os aspectos de manufatura desse produto semi-acabado são detalhados adiante.

2 CADEIA PRODUTIVA

Como citado anteriormente, o principal minério utilizado na obtenção do alumínio metálico é a bauxita, cujo constituinte de maior importância econômica é o óxido de alumínio, encontrado em teores de 35% a 55%. A bauxita é encontrada principalmente nos grupos climáticos mediterrânico, tropical e subtropical [1].

Segundo estimativas de 2008, o Brasil detém 7,0% das reservas mundiais de bauxita, na época somada em 38,1 bilhões de toneladas. As principais reservas brasileiras localizam-se no estado do Pará, geridas pela MRN, Vale, CBA e ALCOA[5]. Em volume de produção, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial do minério, tendo produzido 26,6 milhões de toneladas em 2008, 13% da produção mundial [6]. Do ponto de vista de produção do alumínio primário (aquele produzido diretamente a partir do minério), em 2006, a produção mundial atingiu 34 milhões de toneladas, sendo o Brasil o sexto maior produtor [1].

Talvez o melhor exemplo da cadeia produtiva do alumínio seja uma usina integrada. Uma fábrica de tal tipo possui todas as etapas desde o recebimento do minério até o despacho do produto semi-acabado. Recorrentemente a Companhia Brasileira de Alumínio, empresa do grupo Votorantim detentora da maior usina integrada de produção de alumínio do mundo, será citada no texto, por ter gentilmente fornecido informações importantes elaboração do trabalho [7].

Tomando o exemplo da CBA, podem ser classificados dois tipos de produtos produzidos nesse tipo de usina:

- Produtos fundidos, ou seja, aqueles cuja forma final (que deixa a fábrica) é aquela produzida em uma única etapa de fundição;
- Produtos transformados, ou seja, aqueles que sofreram alguma etapa de conformação mecânica que lhes dá uma característica de semi-acabamento.

Escopo do presente trabalho, a manufatura das folhas de alumínio (produto transformado) é descrita de acordo com as diferentes etapas de processamento do minério/metal dentro de uma usina integrada de produção de alumínio. As etapas metalúrgicas de produção das folhas laminada são divididas em:

- Extração do metal do minério (processos Bayer e Hall-Hérout);
- Lingotamento do alumínio líquido;

- Laminação.

Nos seguintes tópicos são abordadas as etapas deste processo.

2.1 Metalurgia extrativa do alumínio

A metalurgia extrativa do alumínio começa com a remoção das impurezas da bauxita, obtendo a alumina (óxido de alumínio). Resumidamente, o processo Bayer é a etapa de remoção das impurezas via lixiviação da bauxita por hidróxido de sódio. O produto resultante é um óxido hidratado de alumínio precipitado em finas partículas. Por sua vez, esse composto é calcinado para obtenção da alumina, passível de ser reduzida a alumínio metálico nas etapas seguintes [8].

Há sérias questões ambientais envolvendo o manejo dos resíduos produzidos durante o processo Bayer, principalmente no que diz respeito à disposição final da lama vermelha. A lama vermelha, substância produzida durante a etapa de clarificação do processo Bayer, embora não seja classificada como resíduo perigoso segundo normas internacionais e a própria ABNT NBR 10.004, é reportada como resíduo perigoso por muitos acadêmicos. Possui elevados teores de hidróxido de sódio e cálcio, elevada capacidade de troca iônica e fina granulometria das partículas, o que permite seu carregamento por massas de ar. Sua disposição final é feita em lagoas monitoradas constantemente, no intento de evitar acidentes (eventualmente catastróficos) [8].

Em 1886, Charlies Martin Hall e Paul Héroult descobriram quase simultaneamente um processo para redução da alumina que mais tarde viria a receber o nome de seus inventores. No processo Hall-Héroult, a alumina produzida ao final do processo Bayer é então enviada para cubas de redução, onde é fundida junto a criolita, ao formar um composto de baixo ponto de fusão. A mistura fundida reage eletroquimicamente através devido a corrente passada por eletrodos de grafita. O produto resultante é um alumínio fundido com grau de pureza elevado (99,7%) que pode ser imediatamente lingotado e encaminhado para processamento. [1]

Em função da característica do processo, a eletricidade torna-se um importante insumo na produção do alumínio. Segundo dados de 2003, para produção de uma tonelada de alumínio primário são necessários 15,0 MWh de energia elétrica [1]. Dessa forma, como a maior parcela dessa energia é destinada à

dissociação do alumínio do oxigênio, a reciclagem de alumínio sucateado (alumínio secundário) é uma alternativa de redução de gastos em energia durante a cadeia produtiva. De fato, os índices de reciclagem desse metal no Brasil chegam a 94%, muito embora tal número tenha sido alcançado mediante problemas sócio-econômicos[9].

2.2 Lingotamento

O alumínio puro oriundo do processo Hall-Hérout é recebido no estado líquido em torno de 800 °C. O metal é então vertido nos fornos de fusão onde recebe a adição de elementos de ligas e de alumínio secundário (sucata). Havendo controle da temperatura, o metal pode ser fundido de acordo com a especificação do produto[7].

Dependendo do produto fabricado, o alumínio pode ser solidificado no formato de lingotes, destinados à refusão do metal e confecção de peças pelo processo de fundição, tarugos, para usinagem de peças, e vergalhões, revendidos para serem manufaturados de acordo com o grau de acabamento proveniente da fábrica[7].

2.2.1 Lingotamento convencional

Placas lingotadas de maneira semi-contínua são a matéria prima para laminação a quente seguida da laminação a frio. Esse processo, cuja produtividade é menor quando comparada àquela pelo método contínuo, vem perdendo espaço para produção de planos de espessuras finas. O lingotamento contínuo é efusivamente enfatizado nos próximos tópicos. Certa atenção será dada à laminação a quente.

2.2.2 Lingotamento contínuo (informação verbal)[1]

A rota de processamento de interesse para a fabricação de planos, como as folhas, é o lingotamento contínuo de chapas, rota na qual o alumínio é ligotado e bobinado já na forma de um produto plano. O produto na forma de bobinas ou na

[1] Informações fornecidas pelo engenheiro Francisco Pinheiro, da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) durante visita técnica à usina da cidade Alumínio - SP.

forma de placas cortadas a partir das bobinas também pode ser comercializado (com um grau de acabamento menor). Na produção de planos com espessuras menores e melhor acabamento, entretanto, as bobinas são apenas um produto intermediário a ser laminado.

Durante o lingotamento contínuo de chapas, o liga de alumínio é vazada do forno de fundição para uma calha que recebe a adição de refinadores de grão. Tal refinador de grau trata-se de um fio de Al-Ti-B, contendo partículas de diboreto de titânio (TiB_2).Uma vez que a liga fundida chegue aos moldes de solidificação, o TiB_2 atuará como núcleos para o crescimento de grãos (equiaxiais). Sendo sua distribuição homogeneamente dispersa no líquido, haverá a formação de uma estrutura bruta de fundição possuindo grãos refinados. A prática também evita parcialmente a segregação de elementos de liga causada pelo crescimento colunar[2].

Tal faceta da fabricação de placas não é encontrada na fabricação de fios para condução de eletricidade. Nesse caso uma estrutura com grãos grosseiros é benéfica para fins de condutividade e, como o alumínio deve ser de baixa pureza, não há demasiado problema de segregação.

A calha conduz o alumínio para dois sistemas de filtragem, cujo objetivo é a remoção de inclusões, haja vista a sabida tendência do alumínio de se oxidar. As partículas de TiB_2 não são retidas por nenhum dos dois filtros, conduzidas junto ao líquido até os moldes de solidificação.

O sistema de lingotamento contínuo empregado na CBA faz-se uso do sistema Novelis PAE® Strip Caster. Nesse sistema, os moldes de solidificação são dois cilindros refrigerados e lubrificados que promovem a extração do calor do líquido forçado a escoar entre eles. Dessa forma, os cilindros (ou rolos Caster) promovem tanto a solidificação da liga, como também empurram a chapa solidificada para frente, sendo bobinada. A espessura da chapa será controlada pela abertura entre os cilindros. O padrão utilizado pela empresa é 7 mm.

Do aspecto de manutenção, os cilindros devem ser trocados mensalmente devido à fadiga térmica. Do ponto de vista da filtragem, os filtros são trocados semanalmente.

---

[2] Já que a solidificação implica em difusão dos elementos de liga através do líquido para a fase em precipitação, o crescimento colunar acompanhado por uma baixa velocidade difusão implica na segregação de tais elementos para o interior da peça.

2.3 Laminação

A laminação consiste de um processo de conformação mecânica que tem por objetivo a redução de espessura de uma chapa, barra, ou perfil metálico. Trata-se de um processo de elevada produtividade, atendendo, principalmente, à elevada demanda de produtos planos. Há, todavia, também processos de laminação de não-planos, cujo enfoque não é devidamente dado no presente trabalho.

O alumínio é um material considerado “mole”[3] no estado não-encruado, ou seja, possui um limite de escoamento baixo quando comparado a outros metais submetidos a semelhantes etapas de processamento. Tal fato torna a laminação de planos do alumínio um processo relativamente fácil, principalmente no que diz respeito às cargas aplicadas ao material e energia despendida. Em função da relevância desse tópico, ele será abordado em toda uma seção inteira, em seguida.

[3] Mesmo embora possua elevada energia de defeito de empilhamento.

3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA: A LAMINAÇÃO

3.1 Laminador

O principal componente do laminador são dois cilindros denominados “cilindros de trabalho”, cuja função é reduzir a espessura da chapa até o tamanho da luz entre eles. Um lingote pode ser reduzido gradativamente a chapas ou folhas finas seja passando repetidamente entre os mesmos cilindros de trabalho e diminuindo a luz entre eles, seja passando por uma série de cadeiras com o espaçamento cada vez menor entre os cilindros [4].

Um laminador também é constituído de [4]

- Cadeira de laminação – a estrutura que sustenta grande quantidade de componentes e suporta as tensões impostas pela laminação.
- Cilindros de encosto – sua função é sustentar os cilindros de trabalho contra flexão e vibração excessivas.
- Motores – fornecem a potência para girar os cilindros de trabalho e força o movimento do alumínio pelo vão entre os cilindros.
- Maquinário para prevenção de encurvamento de chapas – induzem uma flexão leve e controlada nos cilindros de modo a compensar a expansão térmica ou outras distorções, controlando, desse modo, a planicidade do produto.
- Maquinário para ajuste do vão – auxilia os cilindros a resistir à passagem da chapa, mantendo a distância entre os cilindros constante.
- Sistemas de resfriamento – aplicam lubrificantes ou líquidos refrigerantes nos cilindros.

Para a produção de chapas finas e folhas de alumínio, a força necessária para a laminação é tão grande que são utilizados cilindros de encosto para evitar a flexão excessiva dos dois cilindros de trabalho[4].

Um cilindro de encosto de maior diâmetro não só permite a utilização de um cilindro de trabalho de diâmetro menor, como também aumenta a estabilidade térmica agindo como fonte ou escoadouro de calor. Entretanto, um cilindro de encosto maior também aumenta a inércia do laminador e requer uma maior quantidade de energia para a aceleração ou desaceleração. Mesmo que a

estabilidade térmica e a inércia influenciem na seleção do cilindro de encosto, a consideração principal que deve ser feita na seleção é sempre a habilidade de controlar a flexão do cilindro de trabalho [4].

Os laminadores que possuem cilindros de encosto são o quádruo e o Sendzimir, (exibidos, respectivamente, nos itens D e E da Figura 2), sendo o quádruo o tipo de laminador mais utilizado na laminação de alumínio.

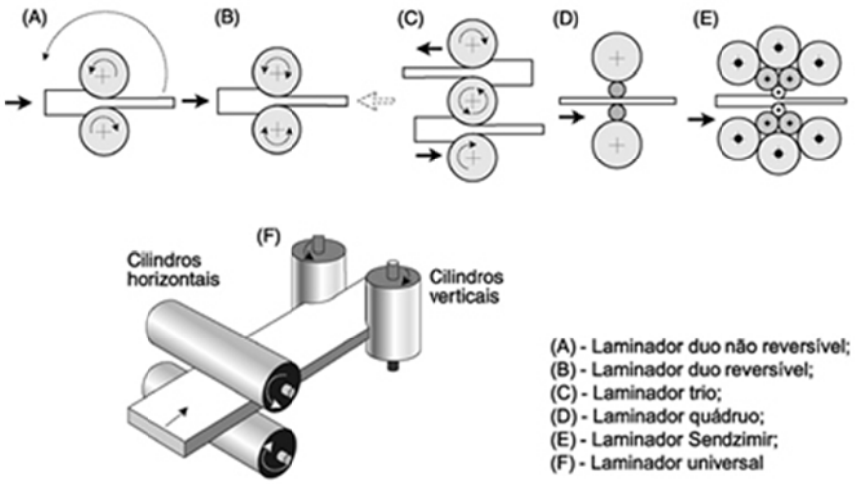

Figura 2– Tipos de laminadores[1].

3.2 Laminação a Quente e Laminação a Frio

A laminação é denominada “a quente” quando realizada numa temperatura alta o suficiente para evitar a presença de encruamento no material quando o mesmo é deformado e é denominada “a frio” quando feita numa temperatura baixa o suficiente para permitir a ocorrência de encruamento. Na prática industrial, a temperatura pode decair ao longo da laminação a quente de modo a permitir que o material encrue [4].

A laminação a frio fornece uma superfície final mais plana do que a laminação a quente. Os produtos mais finos, como as folhas de alumínio, devem ser laminadas a frio para atingirem a sua espessura final [4].

Laminação a quente

A redução da seção transversal do metal é realizada a uma temperatura mínima de aproximadamente 350 °C (igual à temperatura de recristalização do alumínio). A temperaturas desta ordem obtém-se ductilidade máxima para o material e, nesse processo, ocorre a recristalização dinâmica (recristalização durante a deformação plástica) [1].

Após sair do processo de fundição, a placa pode sofrer uma usinagem superficial (faceamento) com o objetivo de se remover camada de carepa (óxido de alumínio), grãos colunares (primeiro material solidificado) e impurezas oriundas da fundição. Em seguida a placa é aquecida até tornar-se semiplástica, para então ser submetida à laminação a quente [1].

A chapa passa primeiramente no laminador desbastador, onde ocorre a maior parcela da redução de sua espessura. Geralmente este laminador é reversível e a redução obtida é de aproximadamente 50 % a cada passada, dependendo da dureza da liga que está sendo conformada. No último passe de laminação, o material apresenta espessura por volta de 6 mm, como mostra a Figura 3, e é enrolado e cortado em chapas planas, encaminhando-se para a laminação a frio [1].

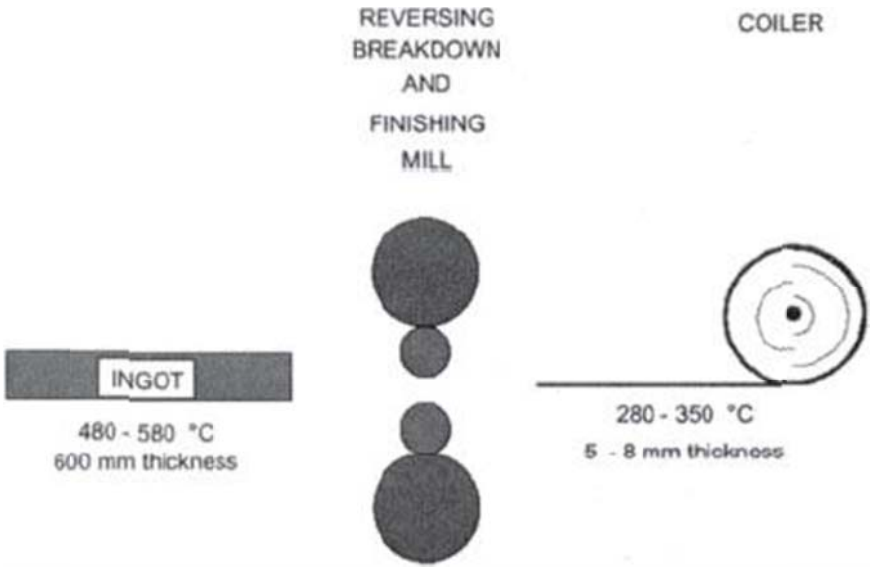

Figura 3– Visão esquemática da etapa com laminador debastador [10]

Processos mais modernos de laminação a quente podem apresentar, após o desbastamento, uma cadeia de vários laminadores, denominada de “tandem”, a qual reduz a espessura do material para cerca de 2 mm [1].

No processo de laminação do alumínio realizado pela Companhia Brasileira de Alumínio, do grupo Votorantim Metais, a chapa é reduzida, na cadeira de desbaste, de 7 mm para 0,2 mm em 5 passes(informação verbal)[4].

A sequência de etapas envolvidas na preparação das placas e na laminação a quente pode ser observado na Figura 4

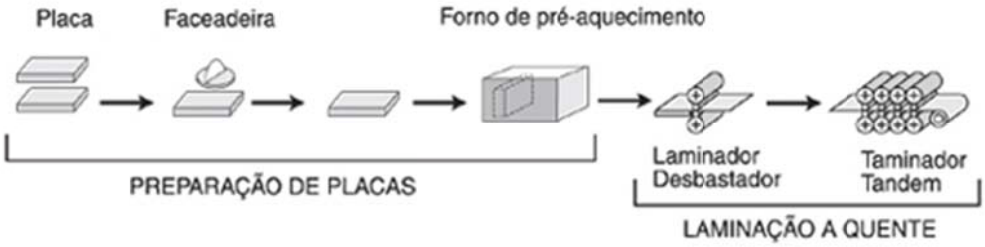

Figura 4– Esquema da preparação de placas e da laminação a quente [1].

Laminação a frio

A laminação a frio é realizada a temperaturas muito inferiores às de recristalização de alumínio (não ocorrendo, portanto, recristalização dinâmica) e sua matéria-prima é obtida pela laminação a quente. Na laminação a frio são utilizados laminadores quádruplos, reversíveis ou não, sendo o não reversível o mais empregado. O número de passes depende da espessura inicial da matéria-prima, da liga e da espessura final. Os laminadores aqui empregados estão dimensionados para reduções de seções entre 30 % e 70 % de passe e fazem uso de dois recursos: tensões avante e tensões a ré [1]

Essas tensões possuem como objetivos aliviar o esforço de compressão exercido pelos cilindros e/ou aumentar a capacidade de redução por passe. Estes recursos são responsáveis também pela redução da espessura no caso da laminação das folhas finas de alumínio, em que os cilindros estão em contato e praticamente sem abertura perceptível [1].

[4] Informações fornecidas pelo engenheiro Francisco Pinheiro, da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) durante visita técnica à usina da cidade Alumínio - SP.

A laminação a frio, além de oferecer encruamento ao alumínio e aumentar os limites de resistência à tração e ao escoamento, produz um material com bom acabamento superficial e controle dimensional [1].

Após obtenção da espessura final, o material plano é cortado em chapas de comprimento e largura desejados, como mostra a Figura 5.

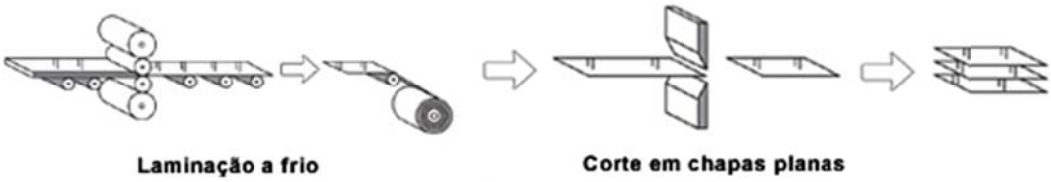

Figura 5 – Esquema da laminação a frio e do corte de chapas

3.3 Laminação de folhas de alumínio (informação verbal)[5]

A espessura mínima à qual um laminador consegue reduzir um material, sem que os cilindros corram o risco de se encostarem, é de 10 µm. Portanto, para obtenção de uma folha de alumínio com espessura menor que 10 µm a solução adotada é a operação denominada "duplagem", na qual ocorre a laminação de duas folhas ao mesmo tempo (folhas duplas) num laminador não reversível, com aplicação de um óleo mineral na superfície de contato entre as folhas, de modo que uma folha não "grude"na outra.

No laminador, após os cilindros de trabalho, há dois cilindros, um inferior e outro superior às folhas laminadas, cuja função não é a redução da espessura, e sim o controle da espessura final: enquanto o cilindro superior tem apenas a função de apoio, o inferior possui ao longo de seu comprimento sensores que fazem a leitura da espessura em diversos pontos do material laminado. Assim que desvios são detectados, informações são enviadas ao laminador para que a velocidade dos cilindros, a carga no laminador ou a tensão avante ou a ré sejam alteradas de modo que a espessura final desejada seja atendida.

Pelo fato de ambas as folhas serem laminadas juntas e de o acabamento ocorrer apenas na superfície, o lado da folha que está em contato com a outra não

[5] Informações fornecidas pelo engenheiro Francisco Pinheiro, da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) durante visita técnica à usina da cidade Alumínio - SP.

terá o acabamento fornecido pela última laminação e apresentará, portanto, aspecto fosco. As superfícies externas apresentam aspecto brilhante.

A bobina de folhas duplas resultante da laminação é encaminhada então a um separador, onde as folhas são separadas e individualmente rebobinadas, como pode ser observado na Figura 6. Em seguida, a folha é desbobinada e cortada por facas dispostas transversalmente à largura da folha; produzem-se, desse modo, 4 bobinas de menor largura, nas quais o material tem seu comprimento inalterado.

Figura 6 – Bobinas de menor largura obtidas após corte [11]

As bobinas assim produzidas são colocadas em fornos com o objetivo de se promover alívio de tensões internas causadas pela laminação. Com esse processo a folha de alumínio fica mais mole, apresentando propriedades adequadas para a sua posterior aplicação (como embalagem, por exemplo) [11].

O processo de laminação utilizado para a obtenção de folhas de alumínio pode ser observado na Figura 7.

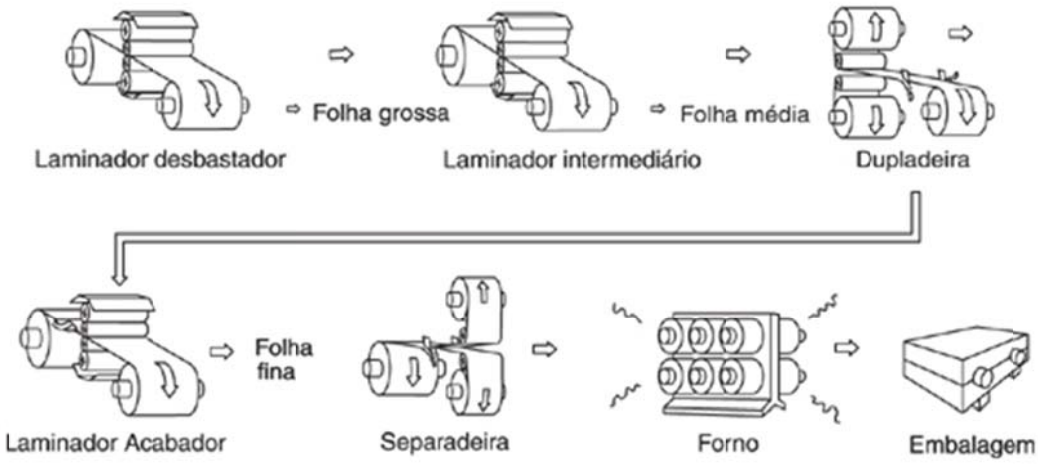

Figura 7 – Etapas da laminação de folhas de alumínio

3.4 Pós-processamento das folhas de alumínio

As folhas de alumínio podem ser trabalhadas e modificadas por diferentes processos para a obtenção do produto final. Elas podem ser utilizadas na forma plana ou combinadas com outros materiais [11].

Alguns dos processamentos realizados nas folhas de alumínio são:

- **Revestimentos:** uma grande variedade de resinas pode ser aplicada para decorar a folha de alumínio, seja no design (maior brilho ou maior opacidade), seja para garantir diferentes colorações (como exibido na Figura 8). Os revestimentos podem ser utilizados também para proteger a folha da abrasão ou do efeito agressivo da água e do álcool.

Figura 8 – **Folhas de alumínio coloridas**

- **Adesivos:** são utilizados para unir a folha às outras camadas de material. Um exemplo de adesivo é o polietileno, utilizado na embalagem TetraPak® como mostra a Figura 9.

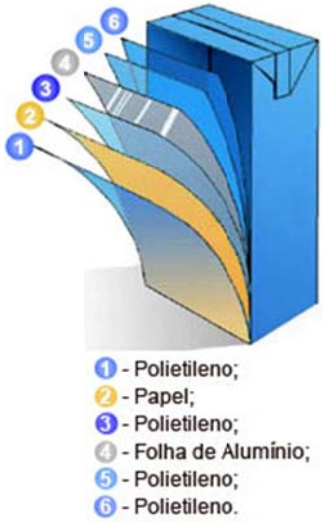

Figura 9– Componentes da embalagem TetraPak® [12].

- **Impressão:** as mesmas impressoras utilizadas para impressão em papel ou filmes plásticos são utilizadas para folhas de alumínio. Alguns dos métodos utilizados são impressão por rotogravura, flexografia e litografia.
- **Gravação em relevo:** responsável por dois efeitos básicos no que diz respeito à atração visual provocada: formato tridimensional em ilustrações e modelos impressos na superfície e contrastes de luz à medida que o observador muda de posição.
- **Anodização:** realizada para que as folhas apresentem aplicações elétricas específicas

4 FALHAS E DEFEITOS DE PRODUÇÃO

Nos processos atuais de laminação de folhas de alumínio existem duas principais causas de falhas, o rompimento da folha e inclusões que transpassam as folhas produzidas, estas podem ter diferentes origens, mas podem estar correlacionadas, pois o furo originado na folha ocasiona um acumulo de tensões, fazendo com que o material fique mais suscetível ao rompimento em regiões em que se observam maiores concentrações de furos.

Estes defeitos são originados de impurezas presentes no alumínio e podem ser classificadas em exógenas e endógenas. As impurezas endógenas são as impurezas originadas por processos intrínsecos ao material como a variação de solubilidade de gases com a temperatura ou variações de estruturas cristalinas, já impurezas exógenas são aquelas que foram inseridas no processo por fontes externas, como borrifadores de grafite, óleos, óxidos aderidos ao laminador e etc. Estas impurezas podem ter sua origem tanto produção do rolo Caster ou no processo de laminação das folhas.

Tabela 1 - Possíveis causas para furos

Possíveis causas para furos		
Impurezas	Fusão	Laminação
Gás	H_2	-
Metais Dissolvidos	Na, K, Mg, Fe, Si, Cu, Mn	-
Inclusões	SiO_2, Al_2O_3, MgO, TiB_2, Fe-Cr	Al, Al_2O_3, AlN, SiO_2, Celulose, Fe-Cr
Residuos Orgânicos	Grafite	Óleos

Os furos observados nas folhas podem apresentar diferentes causas, porém é possível distinguir os defeitos mais recorrentes de acordo com a falha apresentada no material.

4.1 Diboreto de Titânio

Uma das principais inclusões observadas em folhas de alumínio é o Diboreto de Titânio (TiB_2). Os refinos de grãos Al-Ti-B apresentam fases de Al_3Ti e TiB_2. Como o TiB_2 é mais denso que as outras fases, esta fase tende a se concentrar na

parte inferior da liga de alumínio fundido e se aglomerar. Este aglomerado de TiB_2 é pouco deformável se compararmos com a matriz dúctil do alumínio afetando assim a performance da laminação, além disto o TiB_2 apresenta elevada interação com a camada de óxido de alumínio das superfícies, acentuando ainda mais a aglomeração desta inclusão.

Estas aglomerações podem atingir até 1mm de diâmetro, e após passar pelo processo de laminação são alongados acentuando assim o defeito superficial da folha. Observa-se que as fraturas produzidas apresentam um formato de V como se observa na Figura 10.

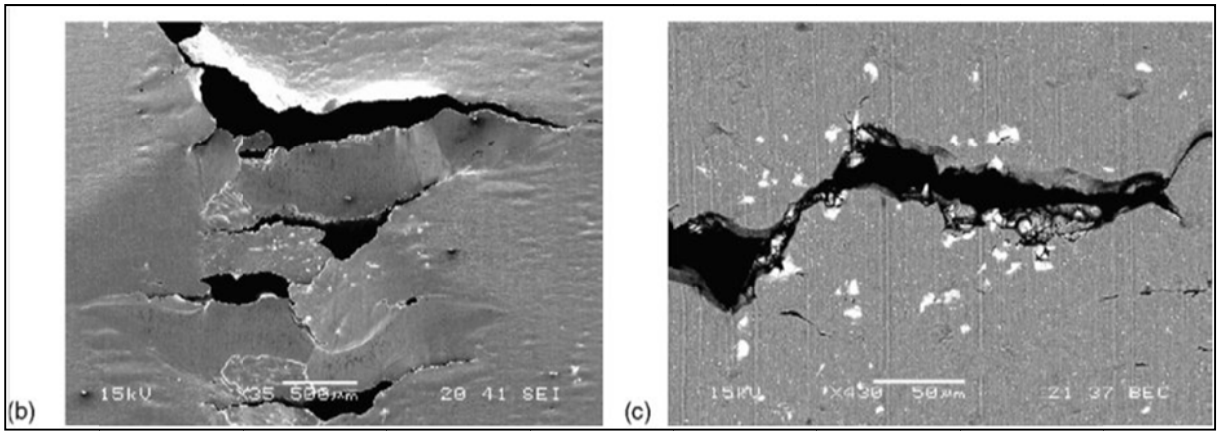

Figura 10– Furos de TiB_2 que provocaram rompimento de folhas de 7µm de AA 1200.

Para prevenir esta inclusão deve-se otimizar o parâmetros de lingotamento do alumínio, controlando as proporções nos grãos Al-Ti-B, filtrar o alumínio líquido para retirar esta inclusão, alterar a posição de alimentação e proporcionar agitação ao material para que o TiB_2 não se concentre na parte inferior do alumínio, porém este processo pode aumentar a inclusão de óxidos da camada apassivadora do alumínio para o interior do líquido [13].

4.2 Silicatos

As inclusões de silicatos tem origem exógena ao processo, a fonte desta inclusão geralmente são refratários ou sopradores que sofrem erosão. As partículas grandes são retidas em filtros porém é comum se observar micro partículas de silicato na matriz de alumínio.

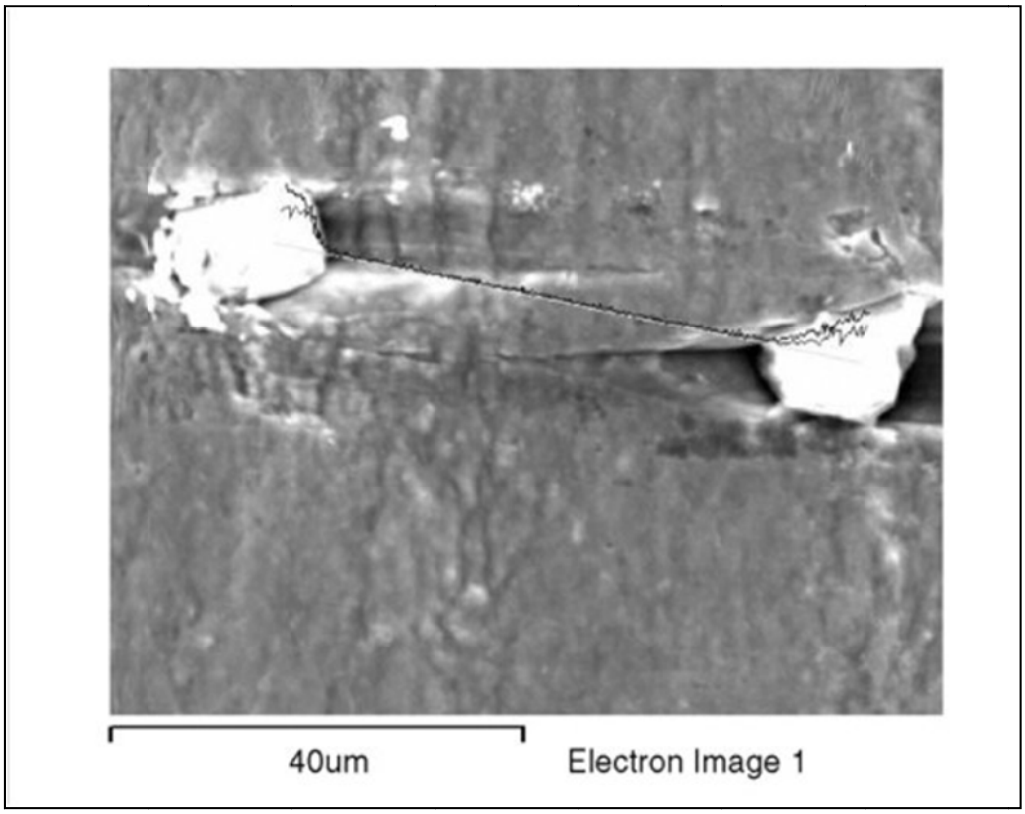

Figura 11 - Furos de silicatos em folhas de 7µm de AA 1200

Observa-se na Figura 11 que as inclusões são muito menores que as inclusões de TiB_2, provocando menor distorção na matriz de alumínio, porém os silicatos presentes apresentam dureza maior que a matriz de alumínio fazendo com que os furos aumentem no processo de laminação [13].

4.3 Óxidos de Magnésio e Espinélios

Nos processos de fabricação de alumínio há a adição de Mg para que este migre para a superfície e no processo de recozimento ocorra forme MgO na superfície. Este óxido melhora as propriedades de adesão da liga e consequentemente as aplicações do lingotamento.

Entretanto o efeito do Mg também é ruim para a liga, este pode introduzir novas fontes de defeitos nos processos seguintes ao lingotamento, como a laminação pois a inclusão de MgO destrói o filme de óleo entre os rolos e a folha ocasionando falhas na laminação.

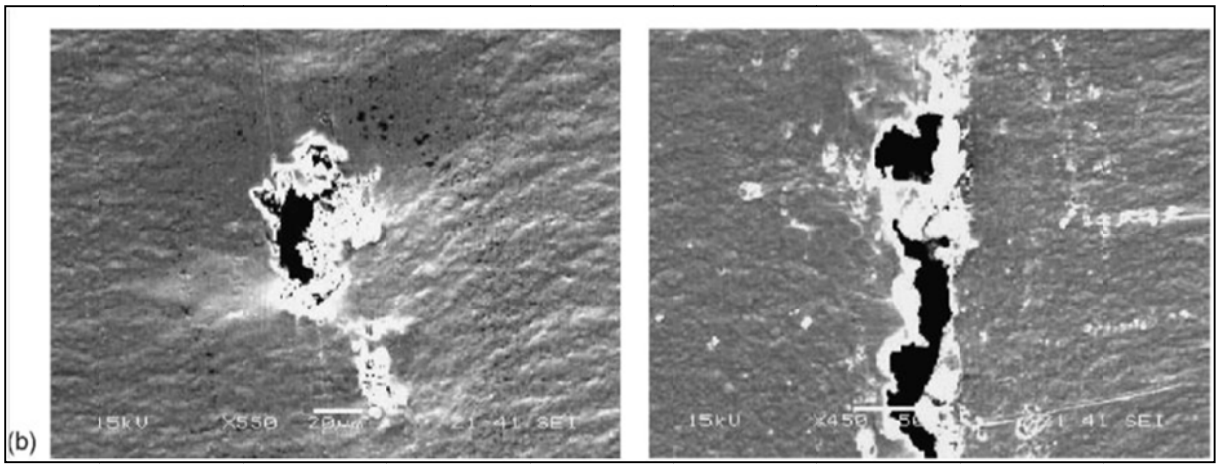

Figura 12 - Furos de MgO em folhas de 7µm de AA 1200

Como se observa na Figura 12 não há um tamanho ou formato definido para os furos provocados por MgO pois esta inclusão pode variar muito seu tamanho e dureza [13].

4.4 Alumina

Estas inclusões são consideradas endógenas, visto que são oriundas do próprio processo de solidificação do material. Embora a camada de óxido garanta exelentes propriedades anticorrosivas ao alumínio, esta alumina pode facilmente adentrar na matriz líquida do alumínio quando submetidos a vibração ou agitação, ou mesmo ao borbulhamento do líquido parte desta camada de alumina é incorporada ao interior do líquido.

Esta inclusão é observada apenas nos últimos estágios de produção da folha de alumínio, é possível se observar a olho nu regiões mais oxidadas que o usual.

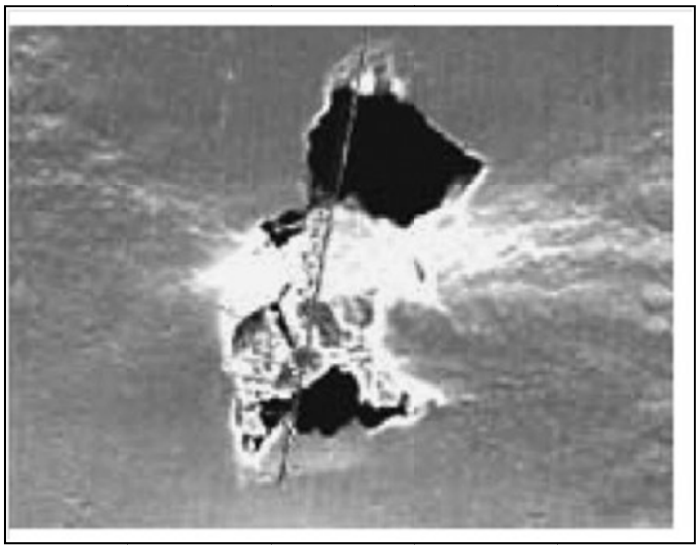

Figura 13 - Furos de MgO em folhas de 12µm de AA 1200

4.5 Hidrogênio

O hidrogênio é o único gás capaz de se dissolver no alumínio líquido, sua solubilidade aumenta com a temperatura e pressão, esta diferença de solubilidade faz com que no processo de solidificação ocorra o desprendimento de gases de hidrogênio ocasionando defeitos superficiais no alumínio que podem ser propagados também no processo de laminação.

O desprendimento de hidrogênio também pode ocorrer durante a laminação das folhas, fazendo com que regiões fiquem com secções muito finas e se rompam durante a laminação.

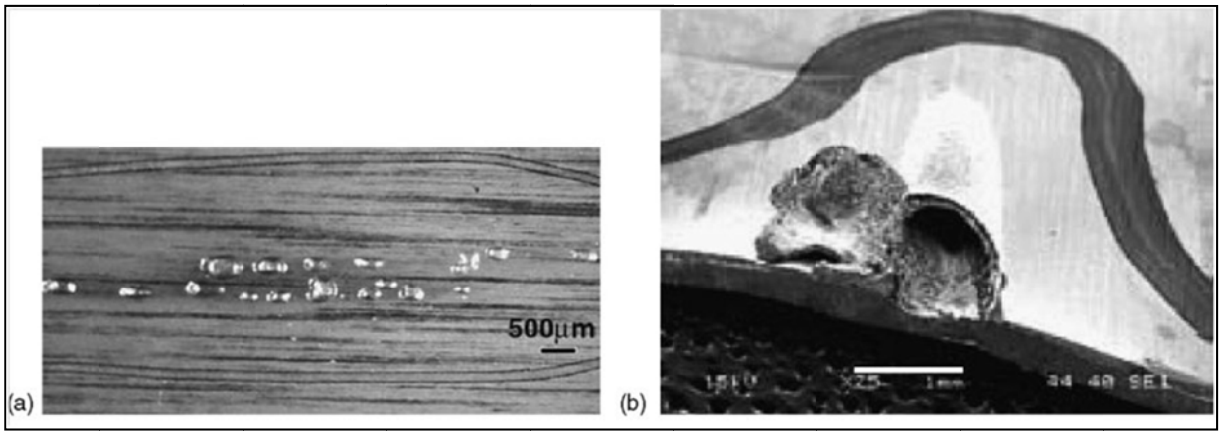

Figura 14 – (a) Bolhas de hidrogênio na superfície de uma folha de 260µm recozida. (b) Secção transversal da bolha observada em (a)

4.6 Resíduos de Alumínio

É comum no decorrer dos processos de produção de alumínio a formação de finos de alumínio (Smut), estes finos ficam facilmente aderidos à superfície do material e provocam defeitos quando submetidos à laminação e podem furar as folhas de alumínio em etapas finais da laminação.

A intensidade de finos produzidos varia com vários parâmetros como composição da liga, velocidade do lingotamento, espessura do lingotamento, rugosidade, taxa de redução, eficiência da filtragem, número de passes, número de recozimentos e etc.

O processo mais eficiente para reduzir a quantidade de resíduos de alumínio é a filtragem de óleos de laminação, visto que os finos ficarão aderidos aos óleos. Se ocorrer a formação de finos entre duas camadas no processo de laminação dupla, dificilmente este fino será retirado das folhas e ocasionará furos.

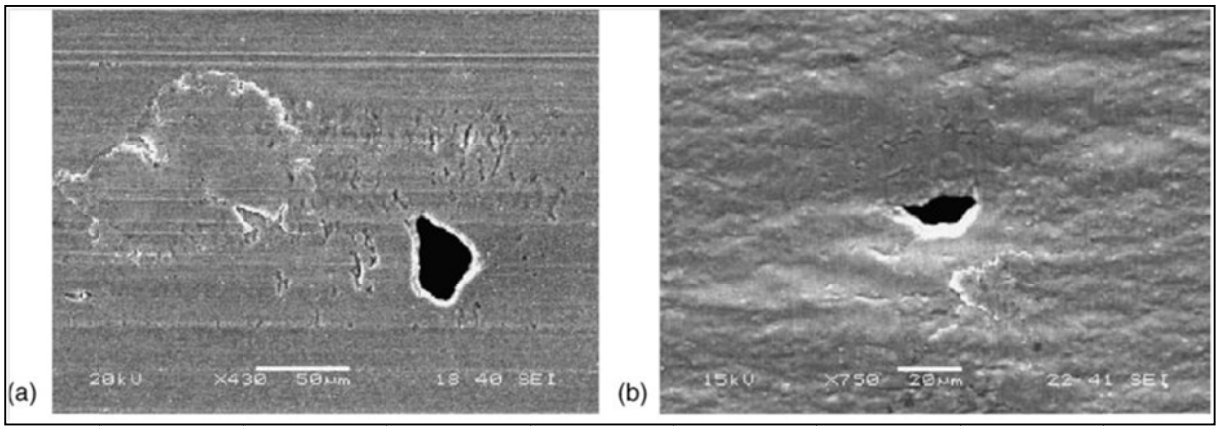

Figura 15 – Furos causados por resíduos de alumínio em folhas AA1200 de 7µm

4.7 Intermetálicos

Os elementos de liga utilizados na fabricação do alumínio podem formar fases intermetálicas no alumínio, dependendo de sua quantidade e tamanho estas fases intermetálicas podem provocar defeitos nas folhas.

A solubilidade de certos elementos de ligas variam com a temperatura, fazendo com que ocorra maior número de inclusões em etapas finais da laminação que apresentam menores temperaturas. Estes intermetálicos são constituídos principalmente de Fe e Si.

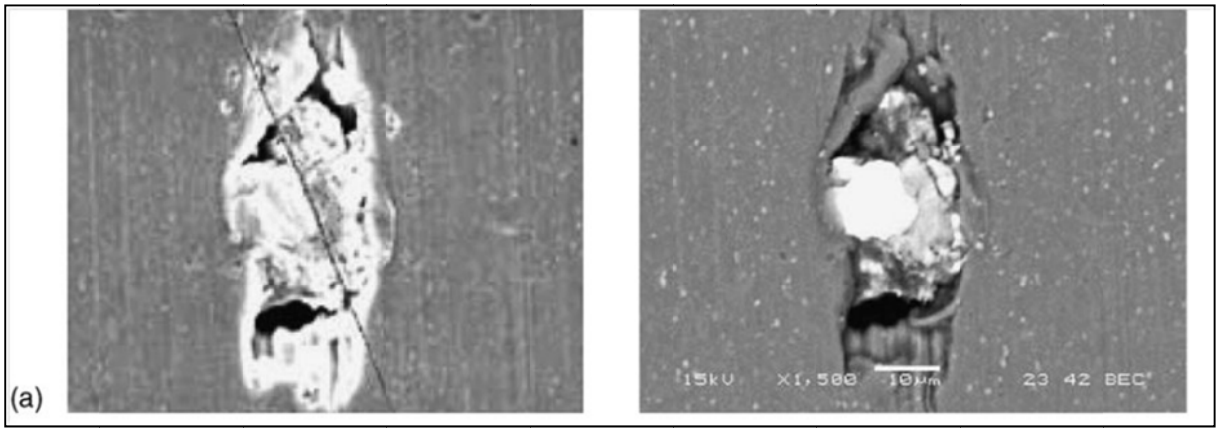

Figura 16 – Defeitos originados de partículas intermetálicas

4.8 Normas para porosidade[14]

No Brasil a produção de folhas de alumínio é regulada pela norma NBR 8310 – Folhas de Alumínio e suas ligas, e o ensaio recomendado para a verificação da porosidade da folha consiste em retirar uma amostra de folhas de alumínio de espessuras entre 6 e 50µm e coloca-las sobre um caixa de luz (mesa de porosidade) onde é possível observar regiões com furos que transpassam as folhas. Deve-se retirar uma amostra de comprimento mínimo de 1dm a fim de se obter uma relação de furos/m². Esta amostra pode ser tanto retirada da pior área, ou como a média de três áreas aleatórias.

5 INFORMAÇÕES DE MERCADO

5.1 Aplicações

As folhas de alumínio possuem não só impermeabilidade e opacidade, as quais impedem a passagem de luz, oxigênio e umidade, como também resistência à corrosão, facilidade de dobramento e qualidade oferecida à impressão. Por apresentarem tais características, são principalmente aplicadas em[7][11]:

- Embalagens: alimentos (ex: TetraPak®, [12]) marmitas, remédios, pastas de dentes, tampas, sabonetes e artigos cosméticos;
- Objetos decorativos;
- Componentes eletrônicos;
- Membranas;
- Indústria automobilística: aletas de radiador;
- Camada protetora de materiais contendo ferro;
- Construção: revestimento interno de casas para maior reflexão de calor, barreira contra vapor d'água

5.2 Estatísticas da produção de alumínio[15]

A produção de alumínio seguia uma tendência de alta até 2008, mas com a crise econômica neste mesmo ano observou-se um decréscimo da produção de alumínio no ano de 2009. Como se observa naTabela 2:

Tabela 2 – Produção Primária por Usina

Produção Primária por usina (1000t)							
Produtores	**Localização**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
Albras	Barbacena (PA)	440,5	449,5	459,9	459	459,3	453,8
Alcoa	Poços de Caldas (MG)	90,7	95,3	96,1	96,4	97,2	65,3
Alumar	São Luís (MA)	377,2	380,8	437,9	447,8	454	434
CBA	Alumínio (SP)	345,3	370,4	404,9	450,9	465,7	471,3
Novelis	Ouro Preto (MG)	51	50,6	51,4	48,4	40,5	48,2
	Aratu (BA)	57,8	57	58,5	58,6	58,7	52,1
Valesul	Santa Cruz (RJ)	95,3	94	95,8	93,7	85,7	10,2
	Total	**1457,8**	**1497,6**	**1604,5**	**1654,8**	**1661,1**	**1534,9**

Destaque para a queda de 88% na produção da empresa Valesul. Em abril de 2009, a empresa encerrou as atividades de smelter de alumínio, transformando-se em produtora de tarugos a partir do emprego de lingotes de alumínio primário e sucata comprada de terceiros. Esta empresa era o braço da Vale na produção de alumínio e foi vendida em 2010 para a Alumínio Nordeste (NORAL).

A produção mundial de alumínio primário concentra-se principalmente na Ásia, o principal país produtor da região é a China com produção anual de 13.177(1000t) por ano, seguindo a Europa, onde o principal produtor é a Rússia com uma produção de 4.187(1000t) por ano. Nos demais continentes temos o Canadá com produção anual de 3.120(1000t) por ano, O Brasil com 1.667(1000t) ano e a África do Sul com 860(1000t) ano conforme aTabela 3.

Tabela 3 - Tabela de Produção Mundial de Alumínio Primário

Produção Mundial de Alumínio Primário				
Continente	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**
África	1762	1777	1789	1747
América do Norte	5375	5335	5637	5778
América do Sul	2384	2493	2558	2671
Ásia	11202	13170	16517	17173
Europa	9006	8927	9157	9736
Oceania	2260	2272	2317	2299

Observa-se na Tabela 4que a produção de alumínio é predominantemente de chapas, que podem ser utilizadas em transportes, construção civil, embalagens e etc.

Tabela 4 - Produção de Alumínio por Tipos de Produtos

Produção por Tipos de Produtos				
Produtos	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
Chapas	382	434	461,7	429,5
Folhas	80,6	84	83,9	82,2
Extrudados	168,5	200	230,1	204,8
Fios e Cabos	138,9	144	152,8	125,6
Fundidos e forjados	184,6	191,2	219,1	180,3
Pós de Alumínio	44,4	48,7	46,7	25,5
Usos Destrutivos	36,9	40,3	40,2	31,6
Outros	20,3	21,6	22,7	17,2
Total	**1056,2**	**1163,8**	**1257,2**	**1096,7**

O motivo da redução na produção de alumínio pode ser observado na Tabela 5que apresenta o consumo per capita de alumínio, observando uma redução na demanda do material em 2009. Da Tabela 5é possível observar também que a utilização de sucatas corresponde a 14% da produção de alumínio no Brasil.

Tabela 5 - Tabela de Consumo doméstico e Per Capita

Suprimento, Consumo Doméstico e Per Capita (1000t)				
Descrição	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
Produção Primária	1604,5	1654,8	1661,1	1534,9
Sucata Recuperada	370	340,6	412,3	275,3
Importações				
Metal Primário e Ligas	20,4	29,7	29,3	29,3
Semimanufaturados e Manufaturados	64,9	75,9	87,1	73,1
Total	**2059,8**	**2101**	**2189,8**	**1912,6**
Exprotações(-)	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
Metal Primário e Ligas	842,1	823,3	747,9	754,1
Sucata	1	0	1,8	0,5
Semimanufaturados e Manufaturados	227,7	243,2	214,1	166,8
Consumo	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
Consumo doméstico	892,8	994,2	1127	1008,3
Consumo per capita	4,8	5,3	5,9	5,3

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Associação Brasileira do Alumínio, 2011. Disponivel em: <Associação Brasileira do Alumínio>. Acesso em: 6 Outubro 2011.

2. PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. **Phase Transformations in Metals and Alloys**. 3rd edition. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.

3. ABEL, C. A.; EDWARDS, K. L.; ASHBY, M. F. Materials, processing and the environment in engineering design: The issues. **Design & Materials**, v. 15, n. 4, p. 179-193, 1994.

4. THE ALUMINUM ASSOCIATION. Rolling Aluminum: From the Mine Through the Mill. **The Aluminum Association**, 2008. Disponivel em: <>. Acesso em: 6 Outubro 2011.

5. MÁRTIRES, R. A. C. **Alumínio**. DNPM - Departamento Nacioanal de Produção Mineral. [S.l.]. 2007.

6. IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Bauxita. **IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração**, 2008. Disponivel em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000033.pdf>. Acesso em: 6 Outubro 2011.

7. CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. Produtos. **CBA - Companhia Brasileira de Alumínio**, 2006. Disponivel em: <http://www.aluminiocba.com.br/pt/produtos.php>. Acesso em: 7 Outubro 2011.

8. SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

9. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sala de Imprensa: País evolui mais nos indicadores econômicos e sociais do que nos ambientais. **IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2008. Disponivel em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1156&id_pagina=1>. Acesso em: 16 Outubro 2011.

10. WOODWARD, R. **The rolling of aluminum, the process and the product**. TALAT Lecture 1301, E.A.A. [S.l.]: [s.n.]. 1994.

11. ALUMINUM FOILS. **Aluminum Foils**, 2011. Disponivel em: <http://www.aluminumfoils.com>. Acesso em: 6 Outubro 2011.

12. EMBALAGEM SUSTENTÁVEL. **Embalagem Sustentável**. Disponivel em: <http://embalagemsustentavel.com.br/2011/06/21/tetra-pak-e-o-pos-consumo/>. Acesso em: 6 Outubro 2011.

13. OZGUL KELES, M. D. Aluminum foil: Its typical quality problems and their causes. **Journal of Materials Processing Technology 186**, p. 125-137, 2007.

14. 8310, N. **ABNT NBR 8310 - Folhas fe alumínio e suas ligas**. [S.l.]: [s.n.]. 2001. p. 1-8.

15. ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Anuário Estatístico ABAL 2009**. São Paulo: Abal, 2010.