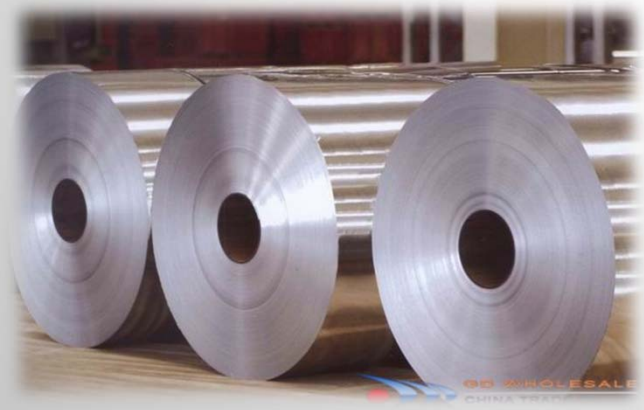
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PMT 2404 – Transformação Mecânica I

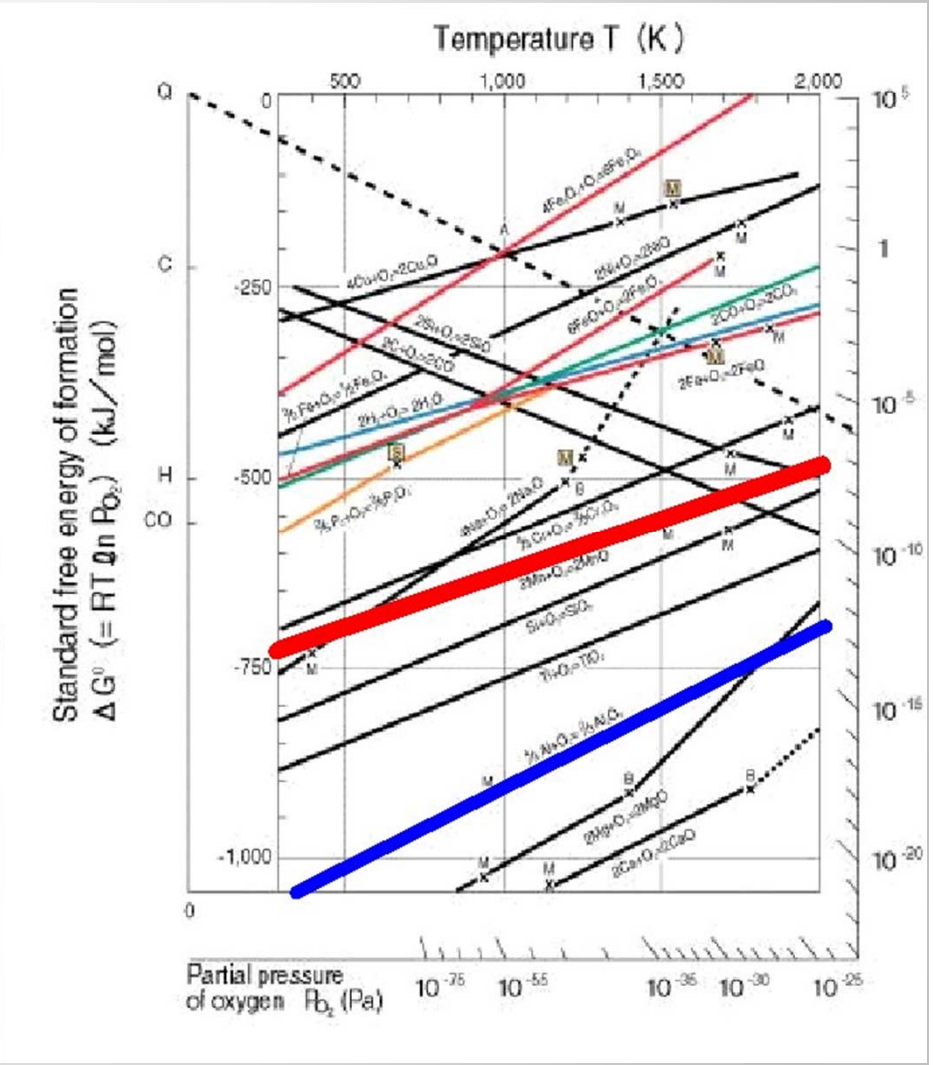
Laminação de Folhas de Alumínio

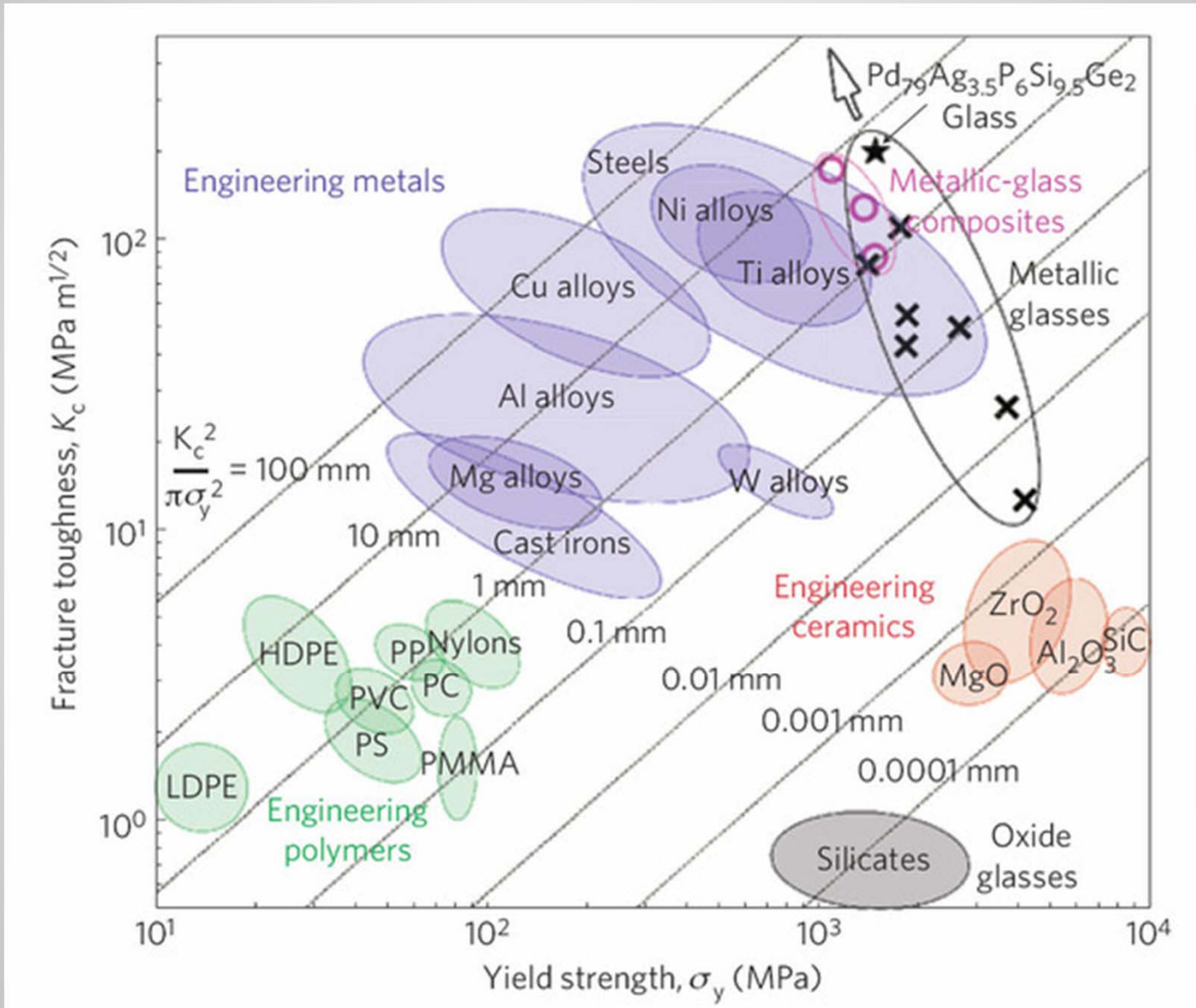


Arthur Seiji Nishikawa
Fernando Santos da Cunha
Rodrigo de Souza Dalti Pereira

Introdução

- 3º elemento mais abundante na crosta
- Principal minério: bauxita (35%-55% hidróxidos de Al)
- **Eletrometalurgia (porquê?)**
- Metal: leve, tenaz, elevada ductibilidade, PF=660 °C, competitivo com o aço
- Versátil: fundido, extrudado, laminado, trefilado, compactado




Pd79Ag3.5P6Si9.5Ge2
Glass
Engineering metals
Steels
Ni alloys
Metallic-glass
composites
Ti alloys
Cu alloys
Metallic
glasses
Al alloys
Mg alloys
W alloys
Cast irons
Engineering
ceramics
ZrO2
Al2O3
SiC
MgO
HDPE
PP
Nylons
PVC
PC
PS
PMMA
LDPE
Engineering
polymers
Silicates
Oxide
glasses
Kc2/πσy2 = 100 mm
10 mm
1 mm
0.1 mm
0.01 mm
0.001 mm
0.0001 mm
Fracture toughness, Kc (MPa m1/2)
Yield strength, σy (MPa)
10⁰
10¹
10²
10³
10⁴

Cadeia produtiva

Mineração (Pará)

- Bauxita
- Custos logísticos

Extração

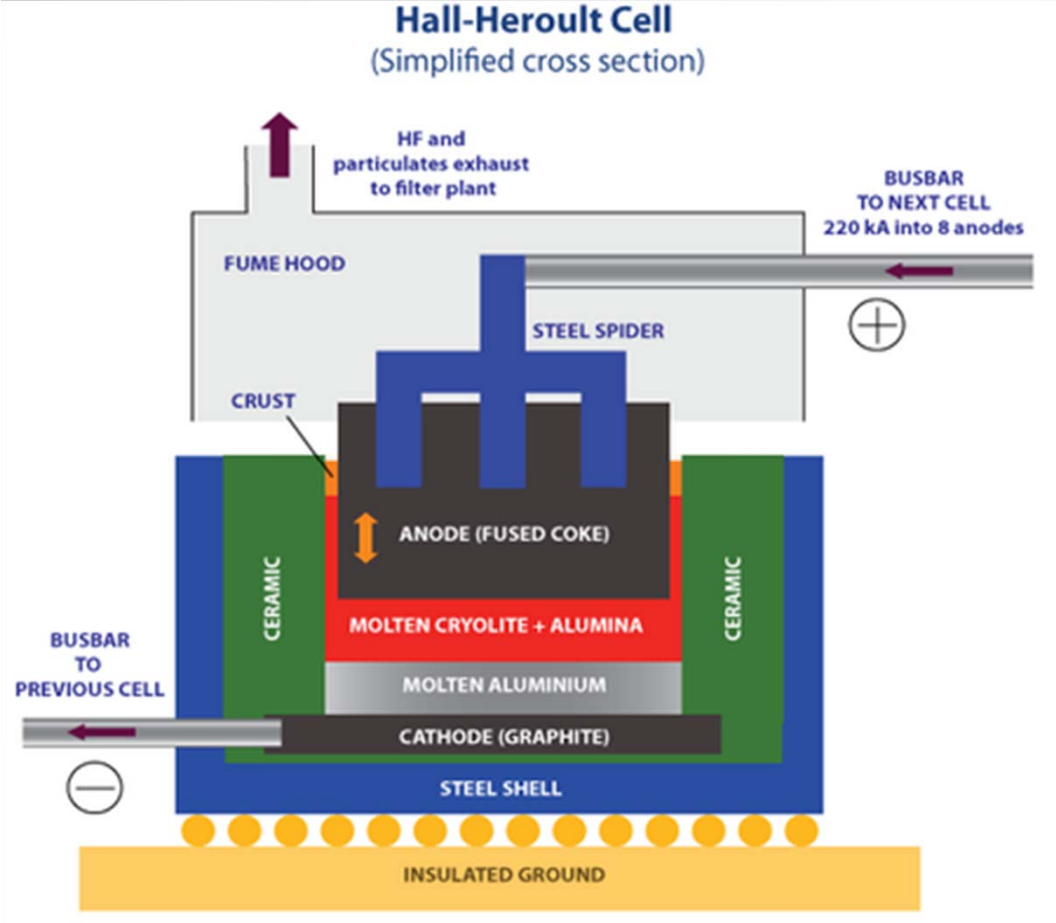
- Processo Bayer → → alumina
- Processo Hall-Hérout → →Al primário

Lingotamento

- Contínuo → bobinas
- Convencional → chapas grossas

Conformação

- Fundição
- Extrusão
- Laminação
- Corte

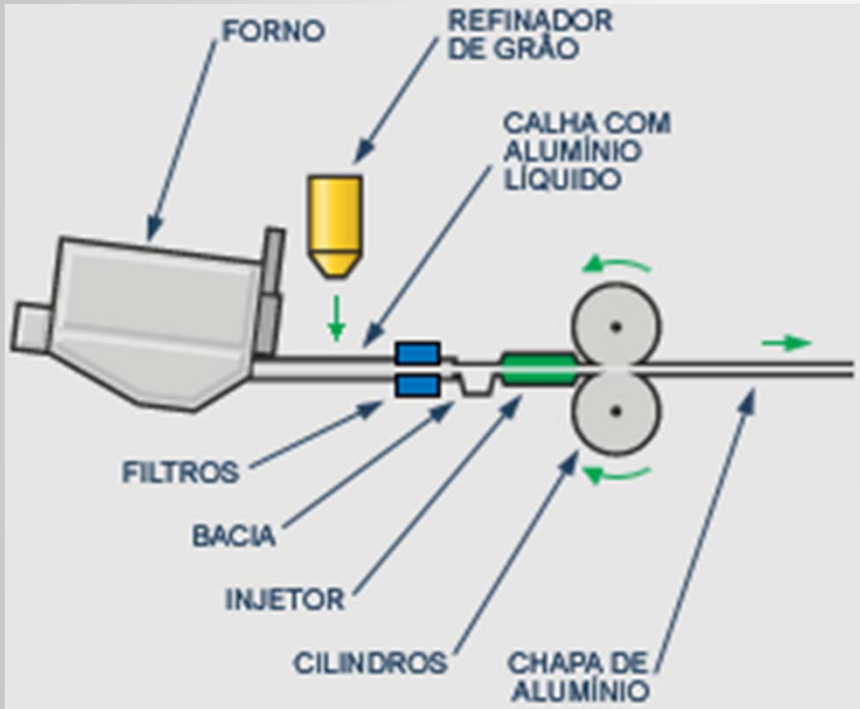


- Processo Hall-Héroult: história recente (1866)
- Abaixamento do ponto de fusão do sistema alumina + criolita
- 15 MWh/ton Al
- Diagrama de Pourbaix → redução da alumina pelo carbono → $CO + CO_2$

→ Al primário

Fornos de fundição: sucata + E.L. ≈ 800 °C

Lingotamento contínuo

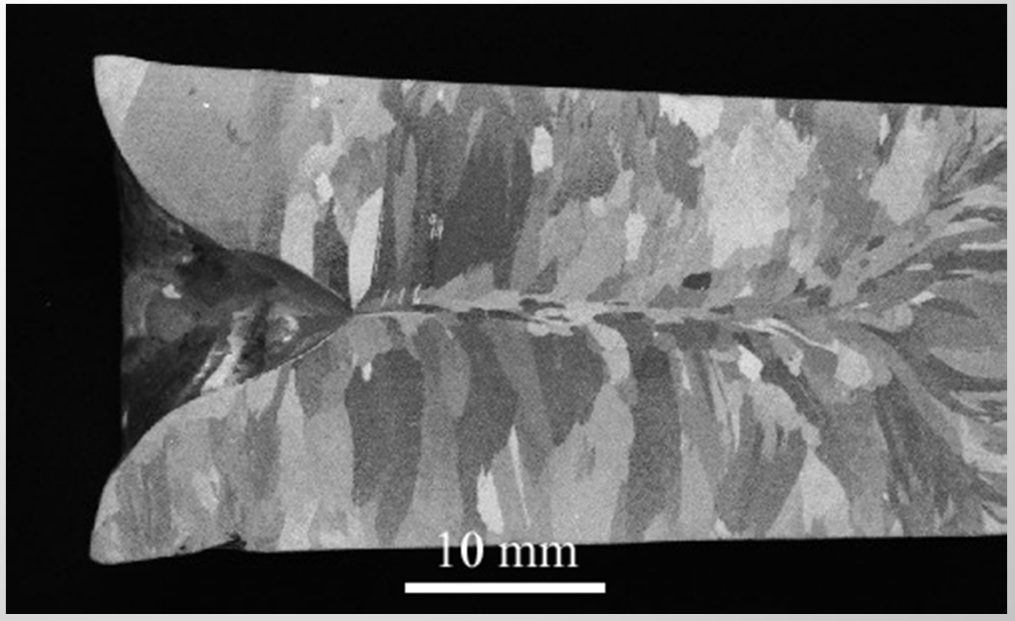


- Inoculação com TiB_2 (como Mg em FoFo)
- Filtragem contra inclusões, TiB_2 não é retido
- Rolos caster refrigerados: solidificação
- Estrutura equiaquixal

- Bobinas com espessura de 3 a 7 mm

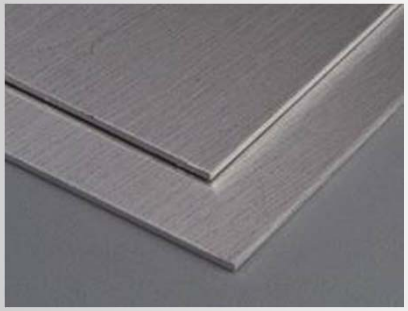
Inoculação

- Menos segregação (EL não é empurrado pela frente de solidificação
- Contra-exemplo
  - Cabos de eletricidade: altíssima pureza, grãos colunares.



Terminologia

- **Placas *(plates)*:** espessura ≥ 6,3 mm



- **Chapas *(sheets)*:** 0,20 mm ≤ espessura ≤ 6,3 mm

- **Folhas *(foils):*** espessura ≤ 0,20mm

Laminação

Folhas de alumínio: Força de laminação é elevada → Cilindros de encosto + cilindros de trabalho

O laminador quádruo é o mais utilizado na laminação de folhas de alumínio

Laminação de lingote de alumínio

Laminação a quente

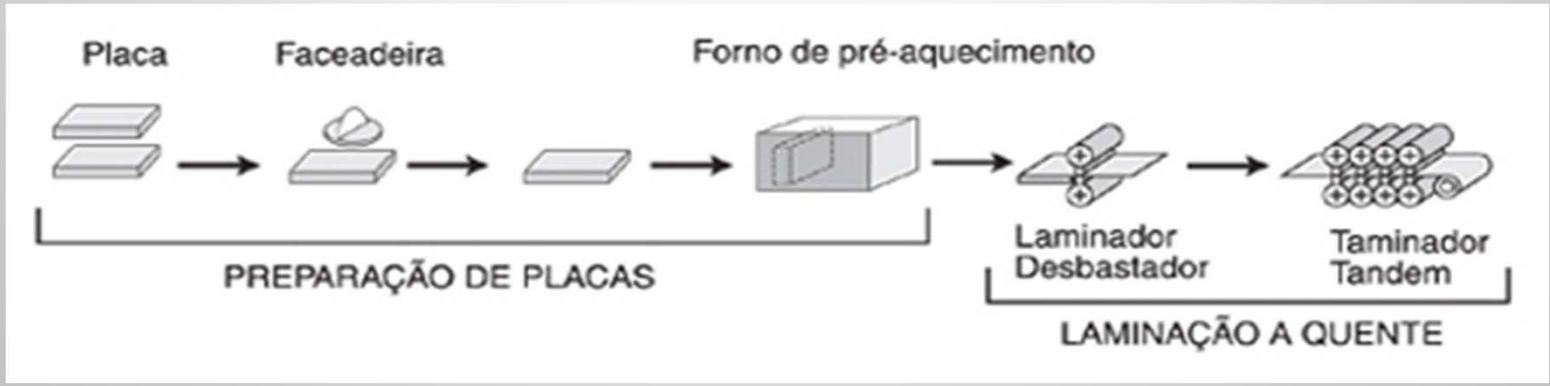
- Temperatura alta o suficiente para evitar a presença de encruamento
- Redução da seção → $T_{mín}$ ≈ 350°C (T de recristalização do Al)
- Recristalização dinâmica

Usinagem superficial (remoção de carepa e impurezas) → Pré-aquecimento → Laminador desbastador (reversível)

Espessura final ≈ 6 mm

⇨ processos mais modernos: "tandem" – conjunto de laminadores

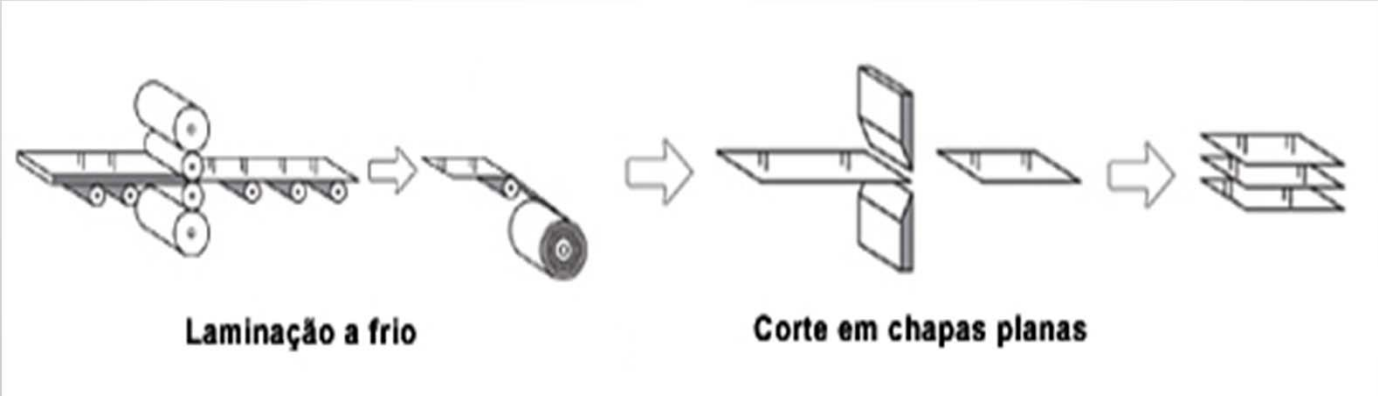
CBA: cadeira de desbaste reduz de 7mm para 0,2 mm em 5 passes



Laminação a frio

- Temperatura inferior à de recristalização do Al → não há recrist. dinâmica
- Matéria-prima oriunda da laminação a quente

- Uso de tensões avante e a ré → aliviam esforço de compressão, aumentam capacidade de redução
- Produz bom acabamento superficial (ausência de carepa) e controle dimensional
- Etapa final: Corte nas dimensões desejadas



Laminação de folhas de alumínio

Espessura mínima possível de ser reduzida = 10 µm

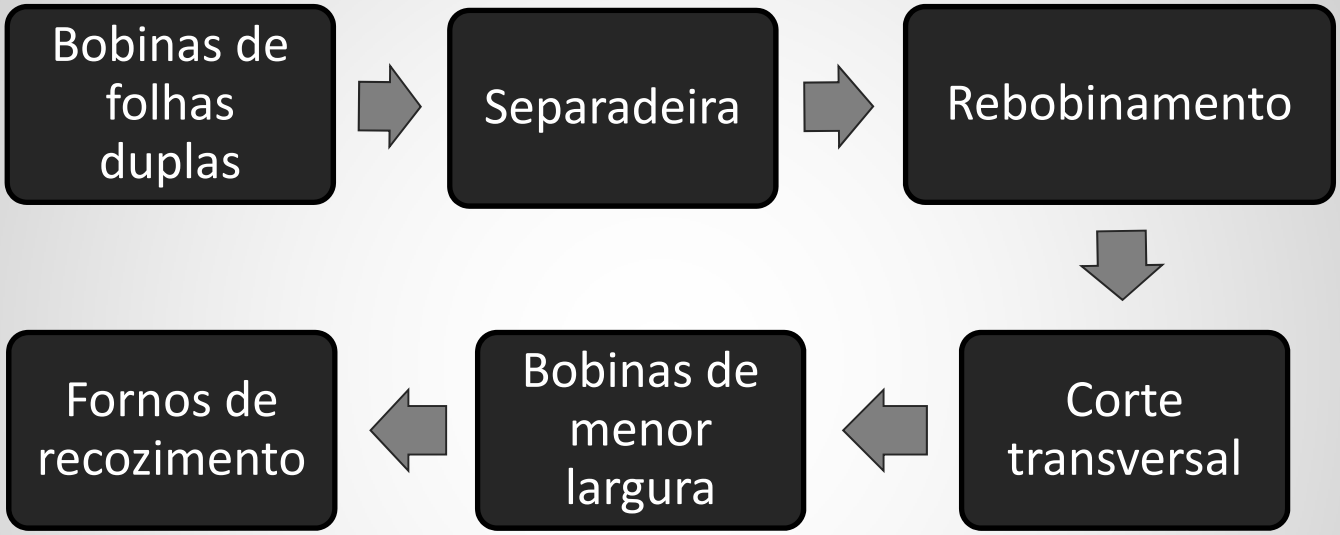
Folhas finas com espessura < 10 µm → **Duplagem:** Laminação de duas folhas juntas

- Aplicação de óleo no contato das folhas para não grudar

- Presença de sensores → garantem espessura final desejada, controlando:
  - velocidade dos cilindros
  - carga no laminador
  - tensão avante ou a ré

- Acabamento ocorre apenas na superfície: lado externo brilhante, lado interno (do contato) fosco

Laminação de folhas de alumínio

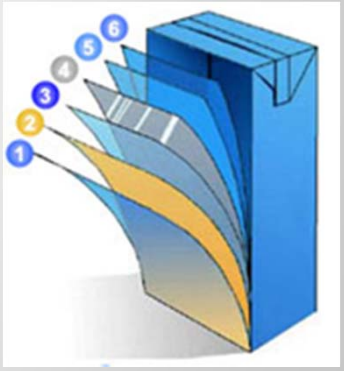


Bobinas de menor largura após corte transversal

Processamento

- **Revestimentos:** adição de resinas → design, coloração, proteção contra abrasão e contra efeito agressivo água/álcool

- **Adesivos:** unir a folha às outras camadas de material. Ex: TetraPak®



- **Impressão:** ex: estampas em embalagens
- **Gravação em relevo:** formato 3D, constrastes de luz
- **Anodização:** para aplicações elétricas específicas

Aplicações

Opacidade, Impermeabilidade (evita passagem de luz, oxigênio e umidade), Resistência à corrosão, Facilidade de dobramento, Qualidade na impressão

- Embalagens;
- Objetos decorativos;
- Componentes eletrônicos
- Indústria automobilística: aletas de radiador
- Camada protetora (para materiais contendo Fe)
- Construção: revestimento interno de casas → maior reflexão de calor

Falhas no Processo de Laminação de Alumínio

Observam-se inclusões, furos, marcas de laminação ou depressões na superfície da folha

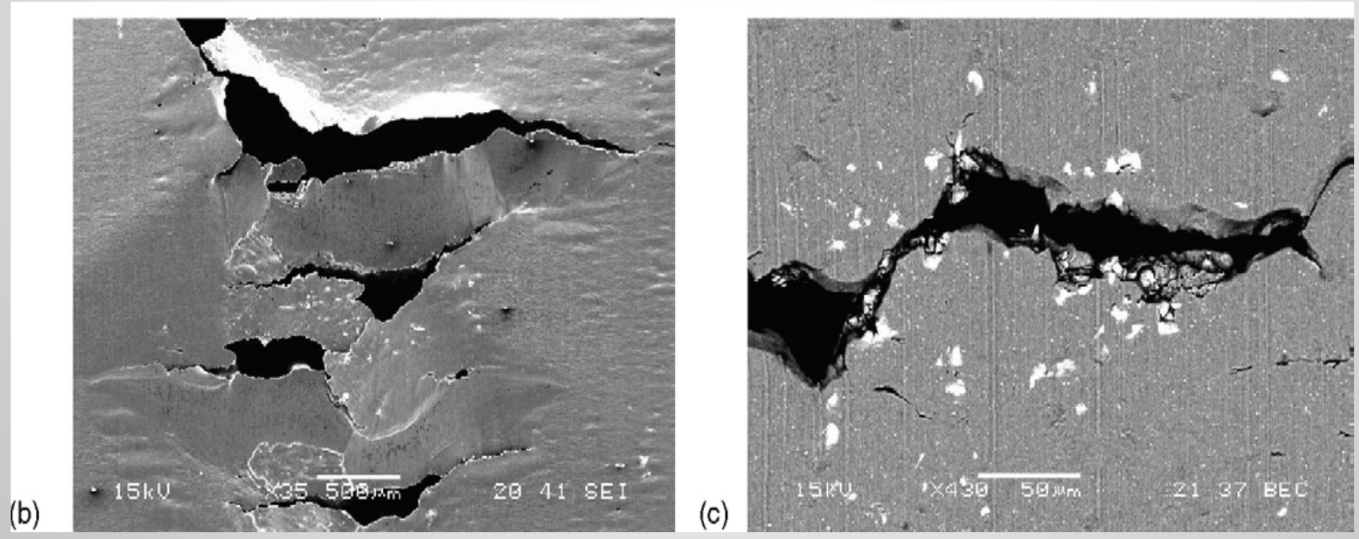
Possíveis causas para furos		
Impurezas	Fusão	Laminação
Gás	H_2	-
Metais Dissolvidos	Na, K, Mg, Fe, Si, Cu, Mn	-
Inclusões	SiO_2, Al_2O_3, MgO, TiB_2, Fe-Cr	Al, Al_2O_3, AlN, SiO_2, Celulose, Fe-Cr
Residuos Orgânicos	Grafite	Óleos

As inclusões podem ser endógenas ou exógenas.
Endógenas: São decorrentes do processo
Exógenas: São oriundas de fontes externas

- Diboreto de Titânio

- Forma-se no processo de lingotamento contínuo
- Origem endógena
- É mais denso que a matriz de alumínio
- Apresenta elevada interatividade com a camada de óxido da superfície

O TiB2 tem dureza maior que o alumínio, causando maiores discordâncias em sua interface com o alumínio
Os furos (pinholes) observados apresentam um formato em V



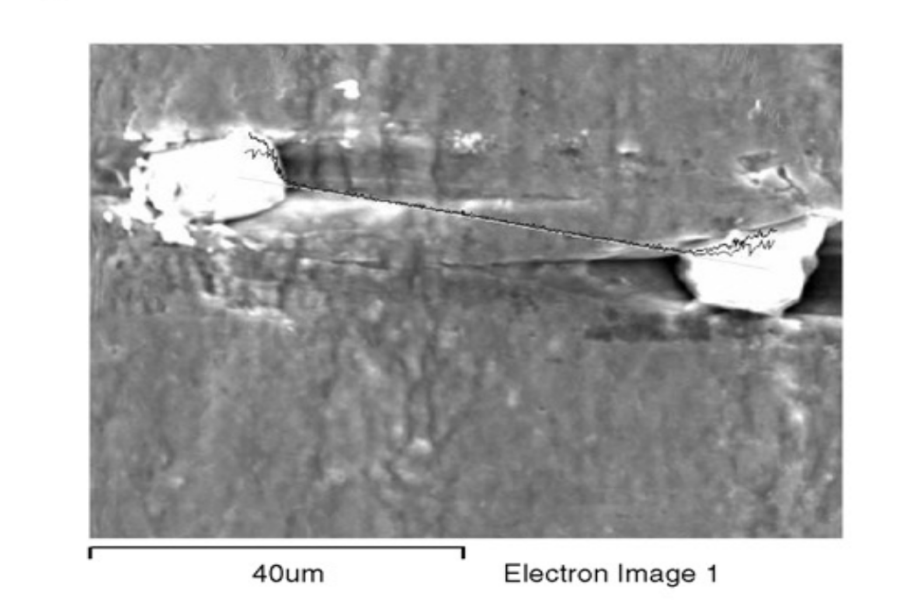
Furos de TiB_2 que provocaram rompimento de folhas de 7µm de AA 1200

- Silicatos

- Os silicatos tem origem exógenas ao processo, são decorrentes dos refratários ou sopradores

Parte deste silicato solubiliza na matriz de alumínio, dificultando sua retirada no processo de filtragem.

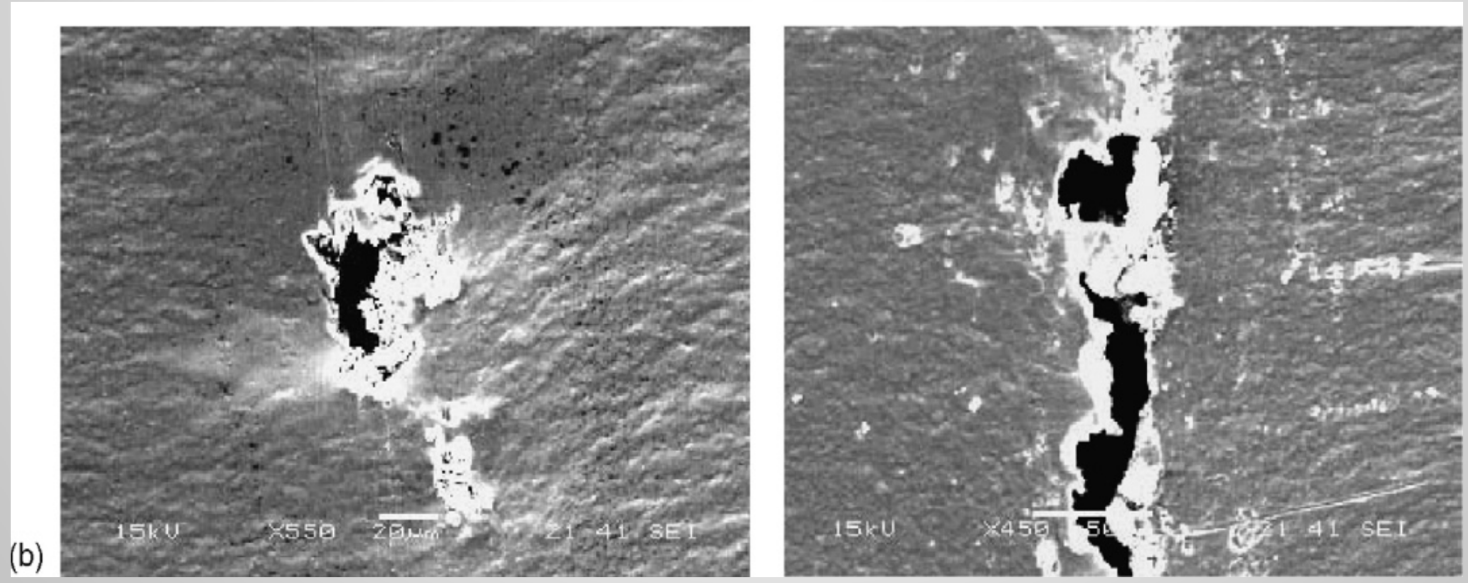
- O silicato formado apresenta dureza superior ao do alumínio, proporcionando maior distorção ao material.



- Óxidos de Magnésio e Espinélios

As usinas aplicam pequenas quantidades de Mg em suas ligas de alumínio para que este forme uma camada de MgO na superfície do alumínio no processo de lingotamento contínuo, reduzindo a adesão do alumínio no rolo.

Porém este MgO presente na superfície origina defeitos quando submetido a laminação pois o MgO é mais duro que a matriz de alumínio.



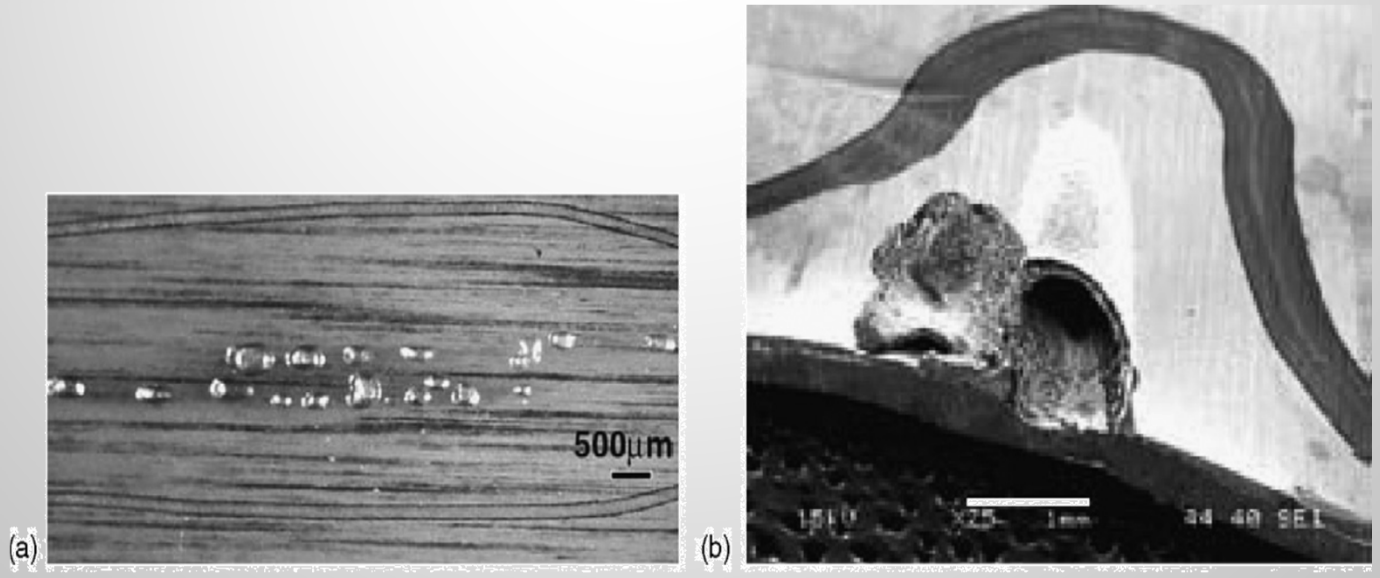
- Alumina

A agitação ou borbulhamento do alumínio líquido faz com que a camada apassivadora da superfície seja imersa na matriz de alumínio.

Esta inclusão formará defeitos no processo de laminação.

- Hidrogênio

- O hidrogênio é o único gás capaz de ultrapassar a camada apassivadora do alumínio líquido
- Apresenta elevada solubilidade em altas temperaturas. Porém ao se diminuir a temperatura há desprendimento dos gases imersos e formam-se bolhas na superfície do material ⇨ Dependendo da espessura da folha a bolha pode fazer com que ocorra reduções pontuais da espessura na folha, acumulando tensões.

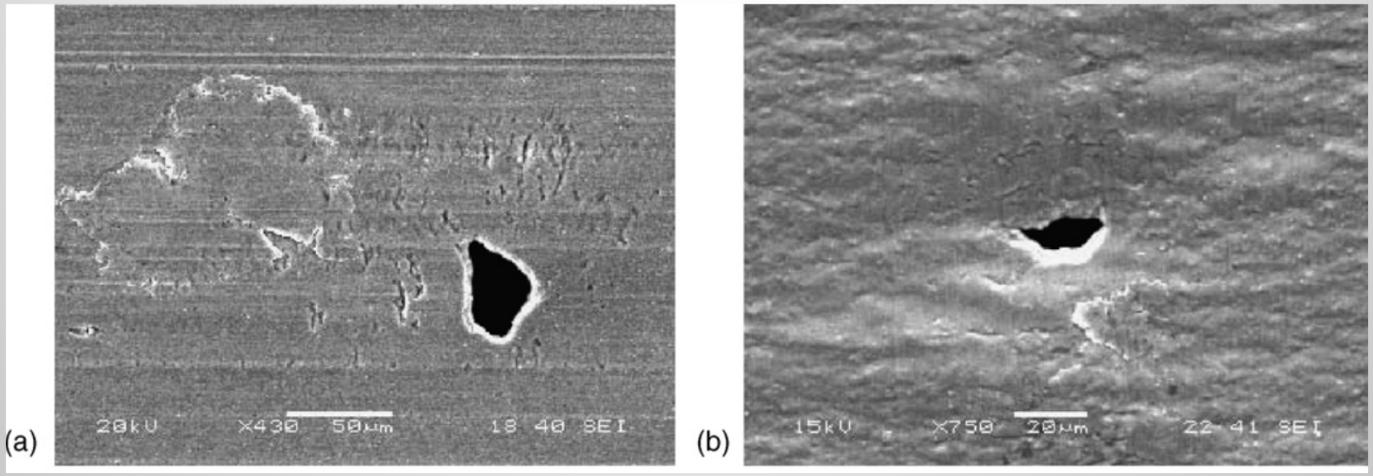


- Resíduos de Alumínio

É comum no decorrer da produção a formação de finos de alumínio.

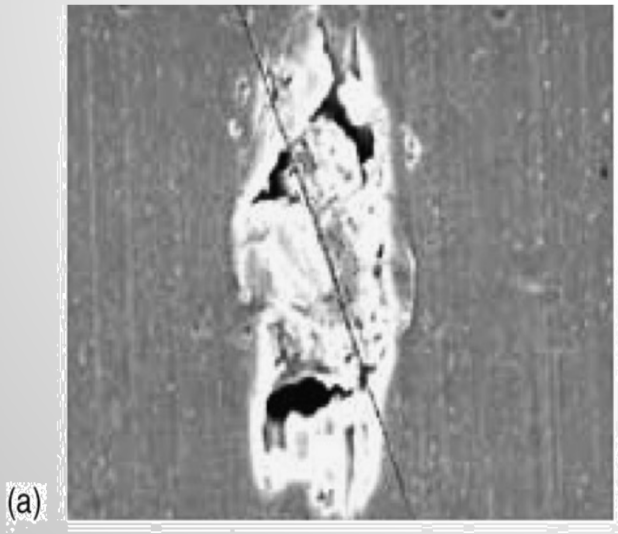
- Estes finos podem fazer com que o material se deforme de forma desproporcional e provoque furos.

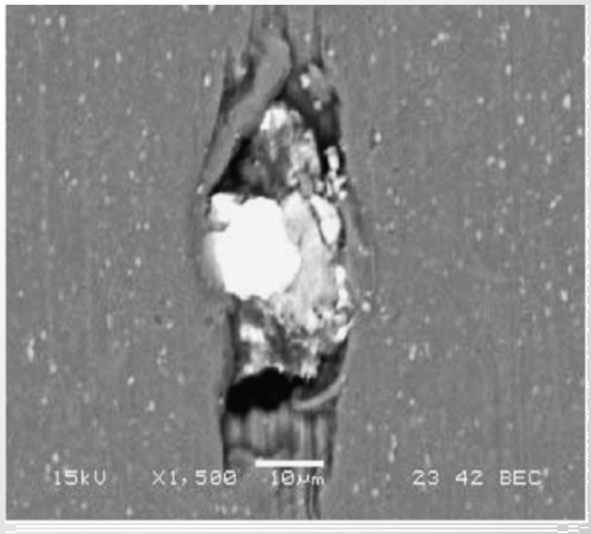
- A intensidade de finos produzidos varia com vários parâmetros como: composição da liga, velocidade do lingotamento, espessura do lingotamento, rugosidade, taxa de redução, eficiência da filtragem, número de passes, número de recozimentos e etc.



- 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
- Assim como o hidrogênio, a solubilidade de alguns elementos de liga varia com a temperatura, fazendo com que em temperaturas mais baixas ocorra precipitação em solução sólida de fases intermetálicas
- Fe e Si são principais constituintes das fases intermetálicas





Estatísticas Folhas de Alumínio

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

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

Considerações finais

- Al é um material muito versátil
- O potencial brasileiro é enorme: 2ª reserva mundial
- Eletricidade é empecilho x logística
- Laminação de folhas encontra aplicação muito diversificada, desde embalagens a produtos de ponta
- Laminação convencional a frio. Destaque para o lingotamento contínuo (muito diferente da siderurgia)

Obrigado!