Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica – POLI/USP
Universidade de São Paulo

# Lingotamento Contínuo & Defeitos de Laminação

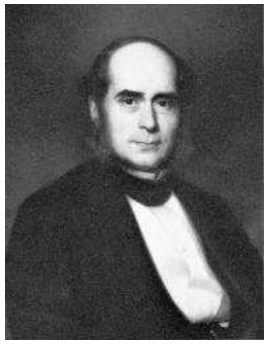
Prof. Guilherme F. B. Lenz e Silva

Engenheiro Metalurgista UFMG (1996),
Engenheiro de Segurança do Trabalho – CEEST-UFMG (2008)
Especialista em Gestão e Tecnologias Ambientais – MBA/USP (2000),
Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – POLI/USP (2004),
Pós-Doutorado pela The University of Sheffield (2005-2006),
Academic Visitor pelo Imperial College London (2006-2007),
Professor Doutor (PMT) - Escola Politécnica / Universidade de São Paulo- USP (2010)

# Introdução

- Revisão: Lingotamento contínuo
- História do lingotamento e evolução
- Lingotamento convencional: direto e indireto
- Fluxantes
- Defeitos x Mercado
- Defeitos: origens
- - Processos anteriores: endógenos
- - Processos anteriores: Exógenos
- Defeitos: transformações mecânicas

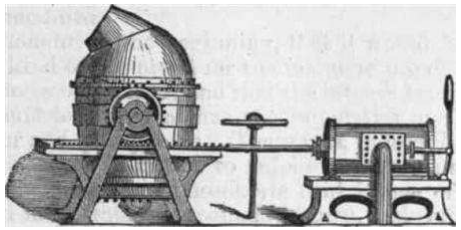
# Revisão: Lingotamento Contínuo



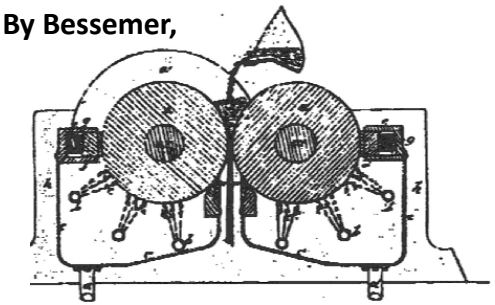
Henry Bessemer, 1856

- **Origem:** 1840- lingotamento contínuo de chumbo (EUA)
- 1846 - Produção de vidro plano utilizando-se rolos refrigerados (EUA)
- **1865** – Patente **Bessemer** para lingotamento de alguns tipos de aço
- 1912 - Reconhecida a vantagem de utilização de moldes oscilantes (Suécia)
- 1943 - Instalação da primeira planta piloto para lingotamento contínuo de aços (Alemanha)
- 1946 e 47 - Instaladas as primeiras máquinas de lingotamento contínuo (Inglaterra, Áustria, EUA e Japão)

Bessemer process, 1856

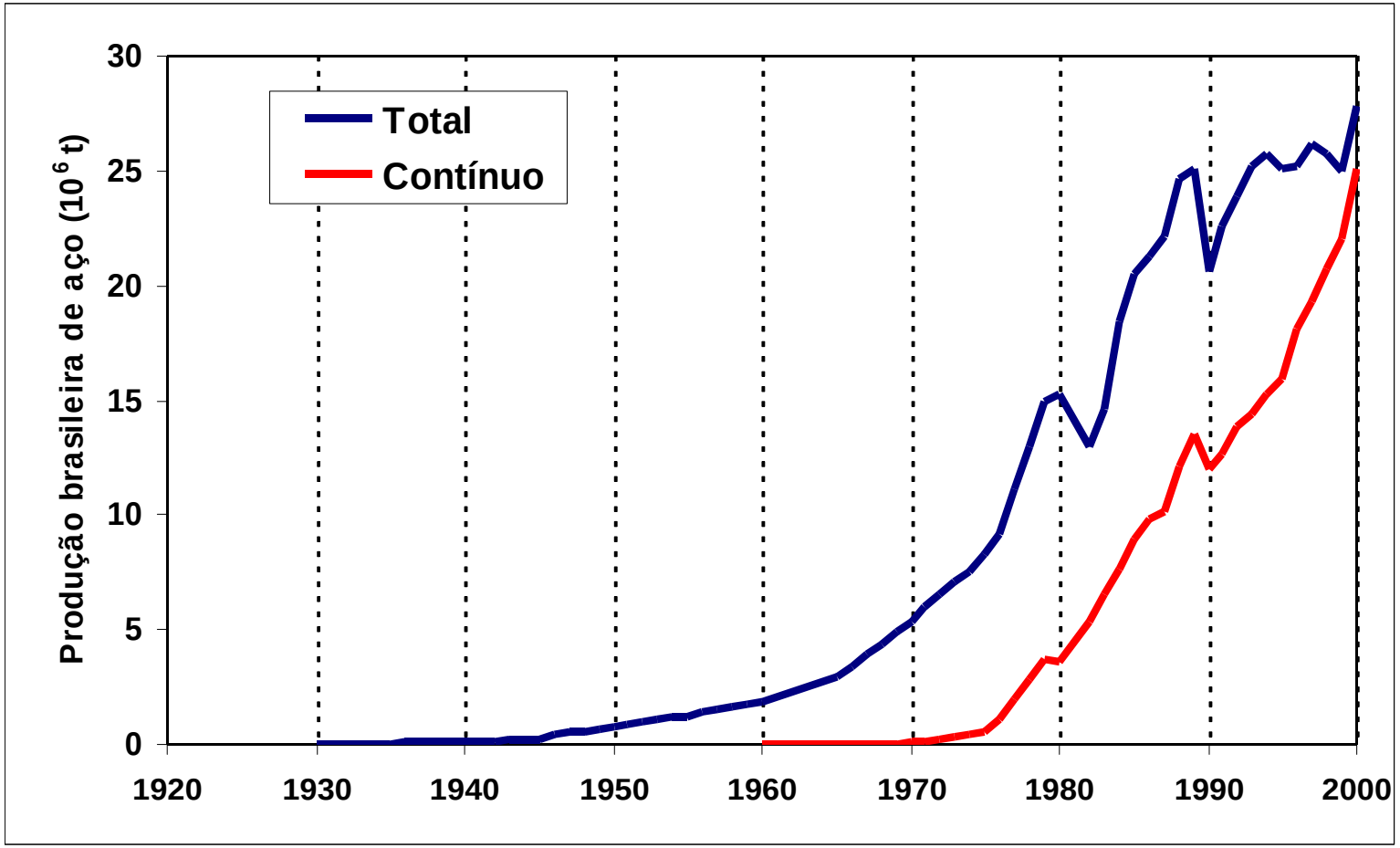


CC of metals – By Bessemer, 1865

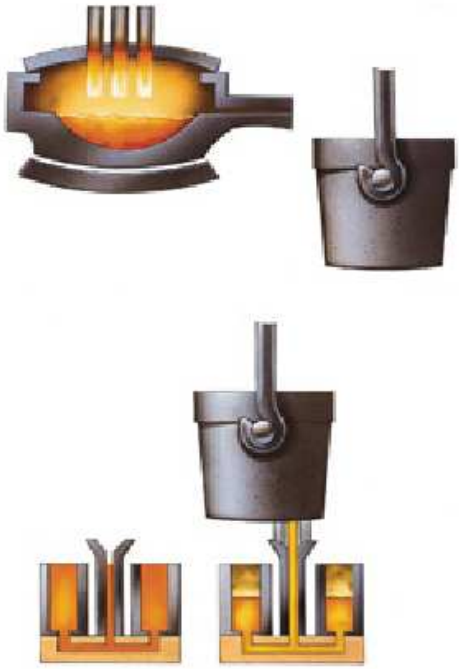


- **1962 - Início da utilização de pós fluxantes (França e Alemanha)**
- 1965 - Desenvolvimento da válvula submersa (França e Alemanha)
- **Final da década de 60 - Início de operação da primeira máquina de lingotamento contínuo no Brasil (Siderúrgica Riograndense).**
- 1972 - Primeira máquina com molde de secção variável na Nippon Steel (Japão)
- **1976 - Primeira máquina de lingotamento de placas (USIMINAS).**
- Atualmente: mais de 95% da produção nacional de aço.

# Produção : CC x Convencional: Brasil



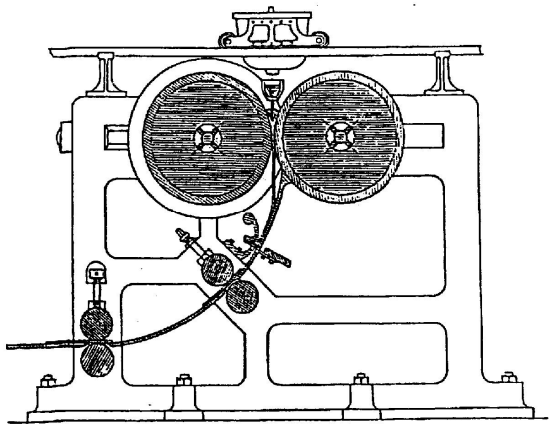
## Lingotamento Convencional



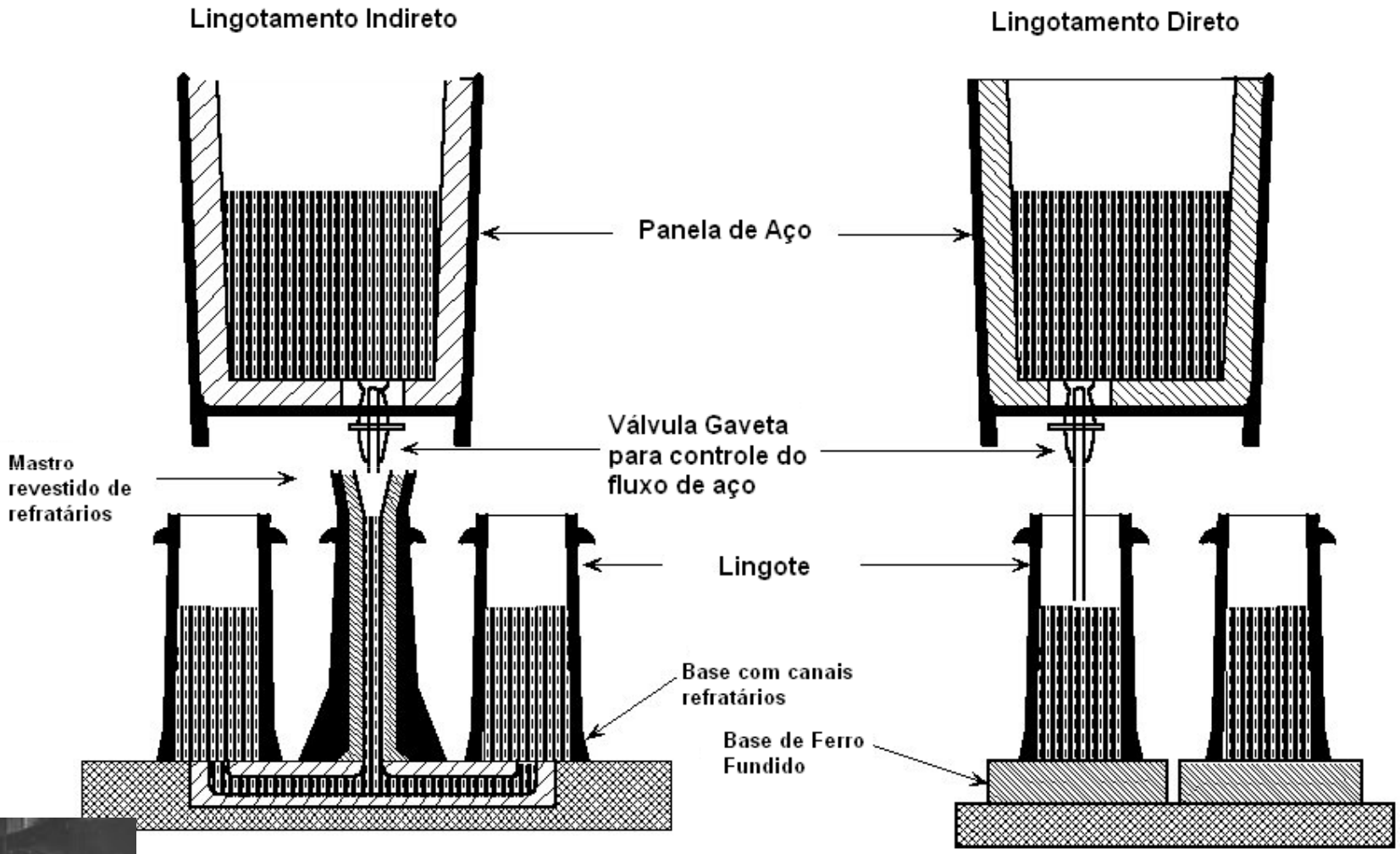
Produto: lingote

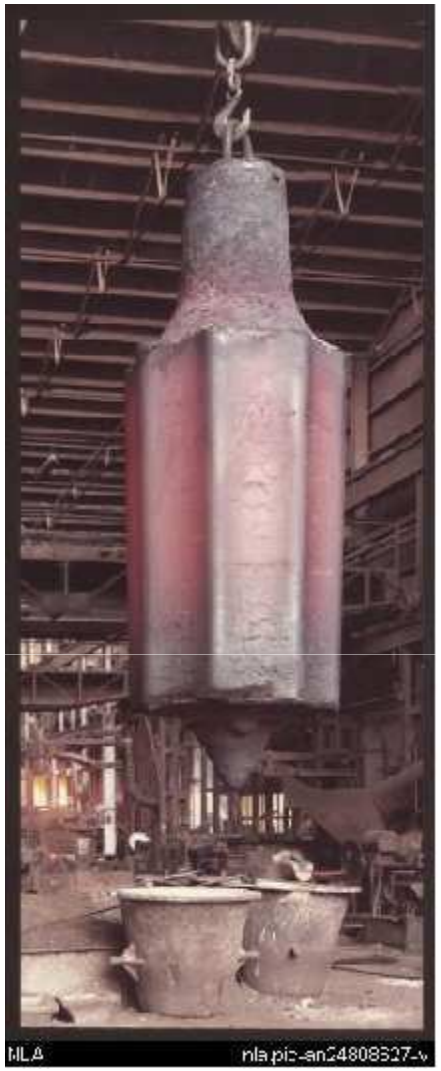
## Lingotamento Contínuo

Produto: tarugo/placa

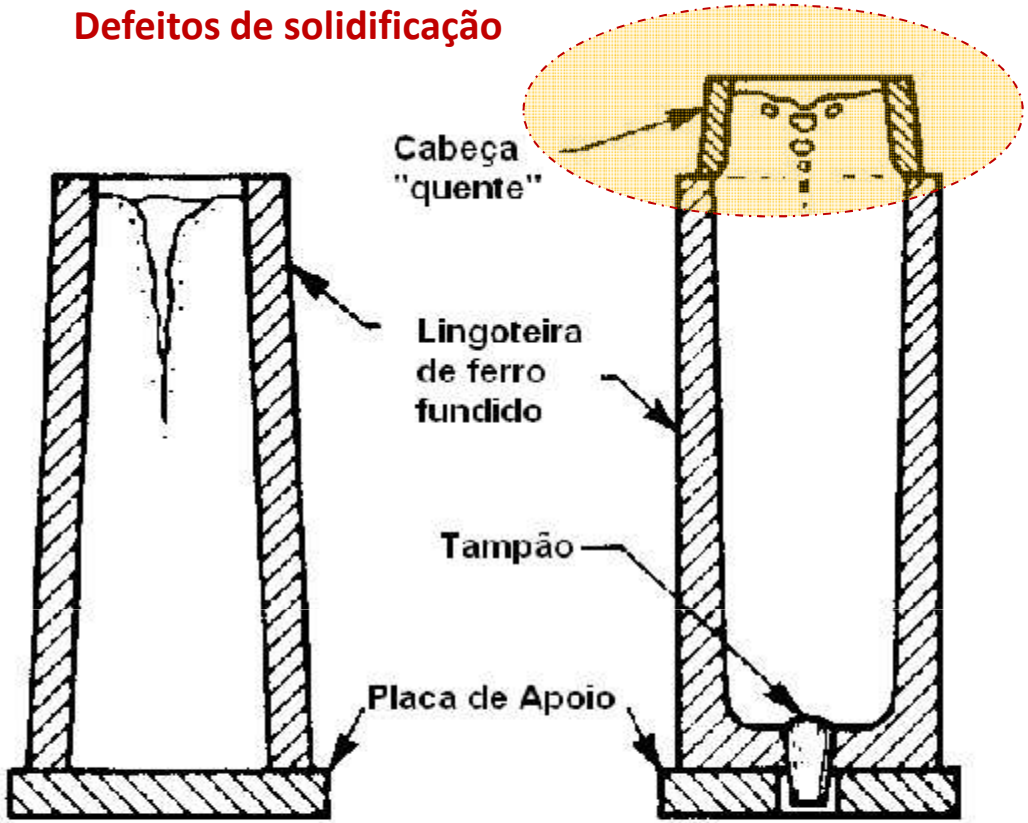


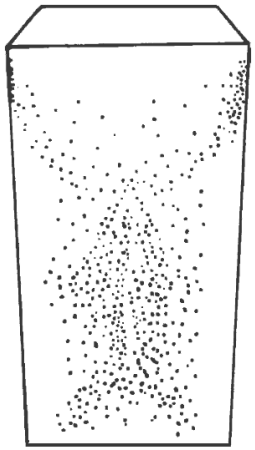
Patente
*Bessemer* 1865


Lingotamento Indireto
Lingotamento Direto
Panela de Aço
Válvula Gaveta
para controle do
fluxo de aço
Mastro
revestido de
refratários
Lingote
Base com canais
refratários
Base de Ferro
Fundido



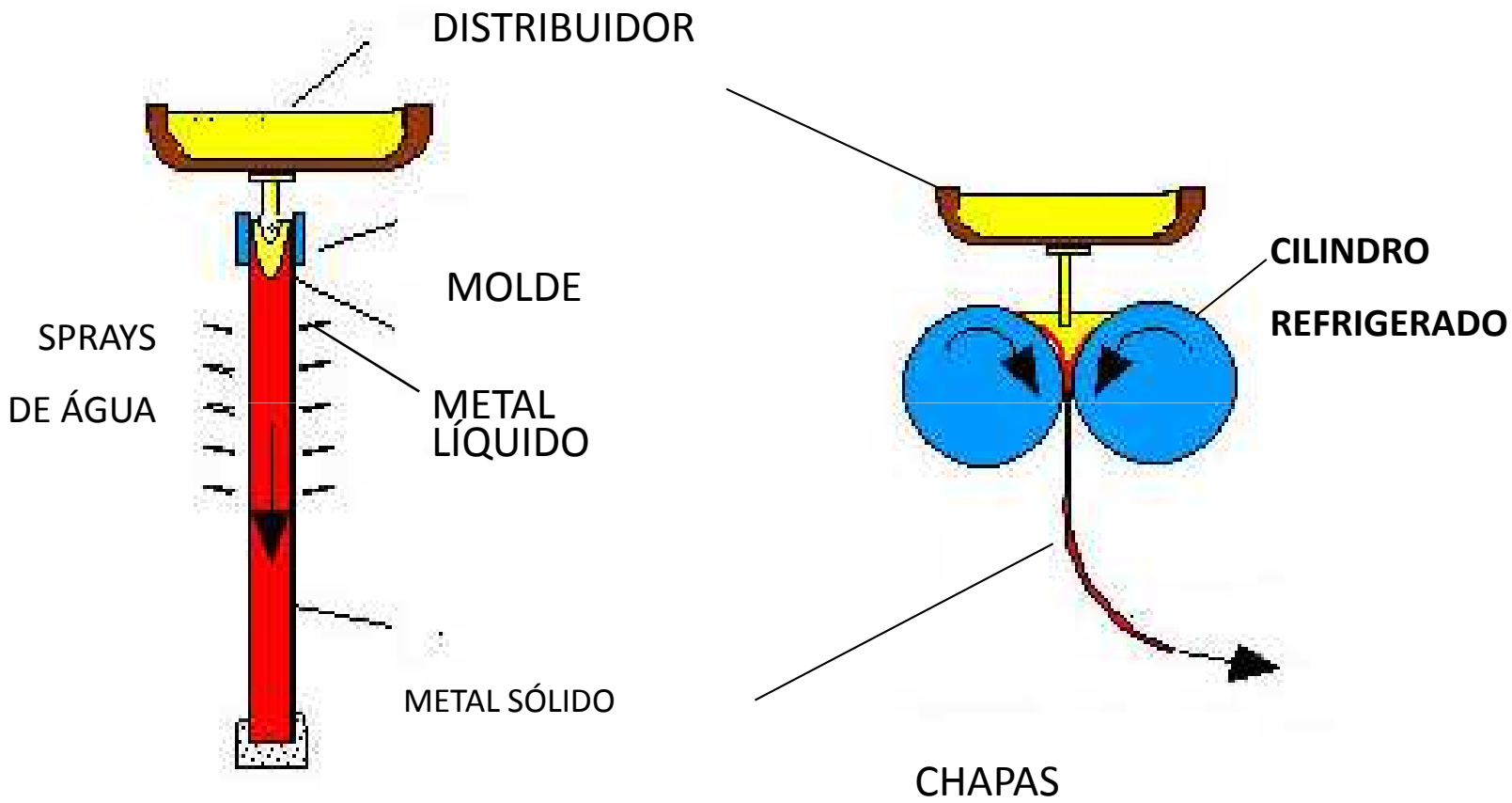

## Defeitos de solidificação



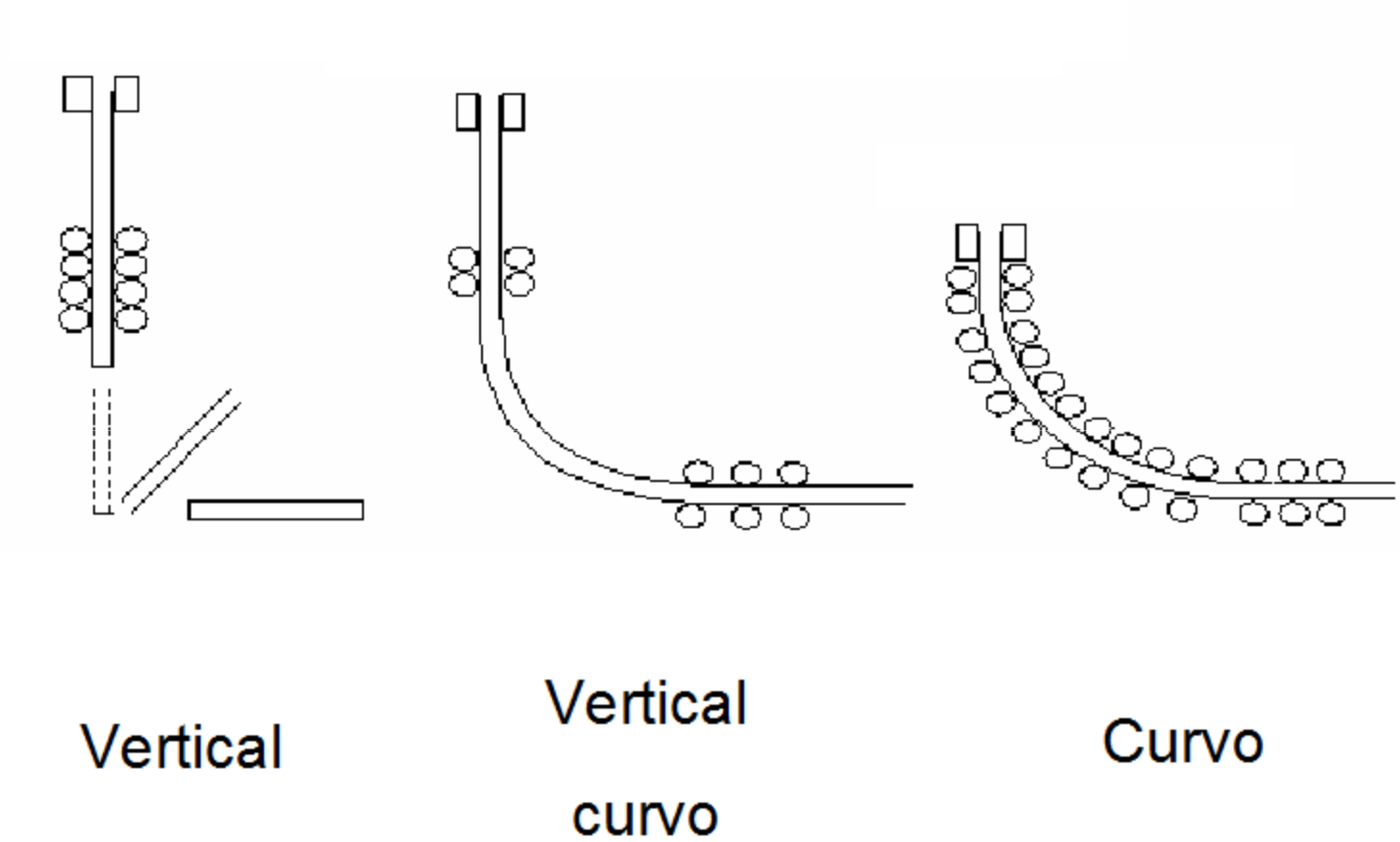
42—Distribution of large slag inclusions in a top-poured 5-t ingot

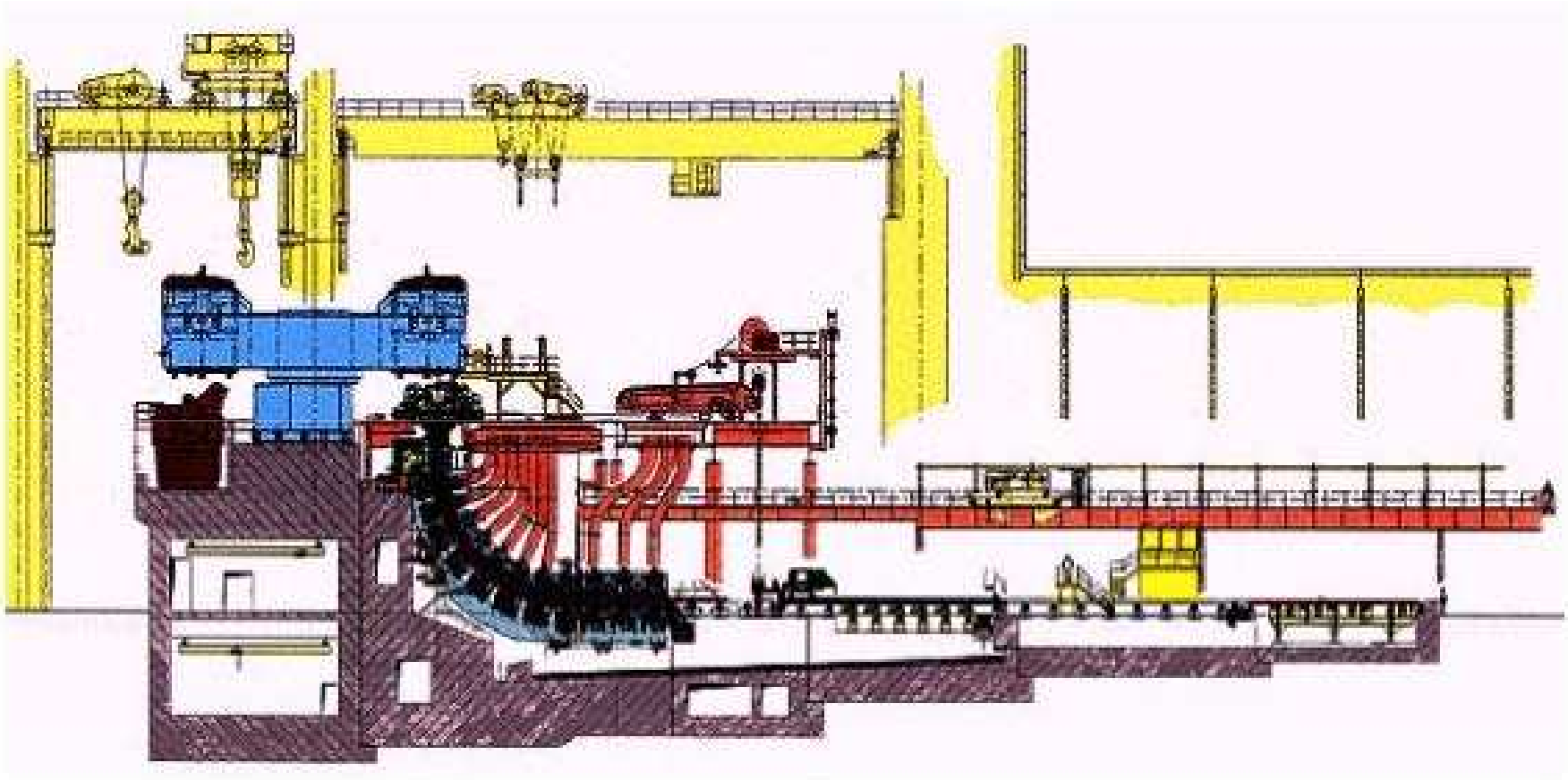
# LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE METAIS DE BAIXO PONTO DE FUSÃO (Al, Cu)




BARRAS & CILINDROS

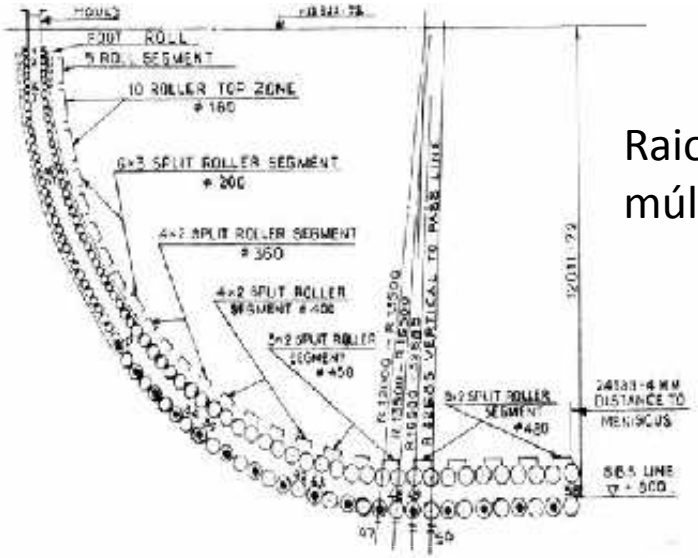
# Maquinas de lingotamento contínuo



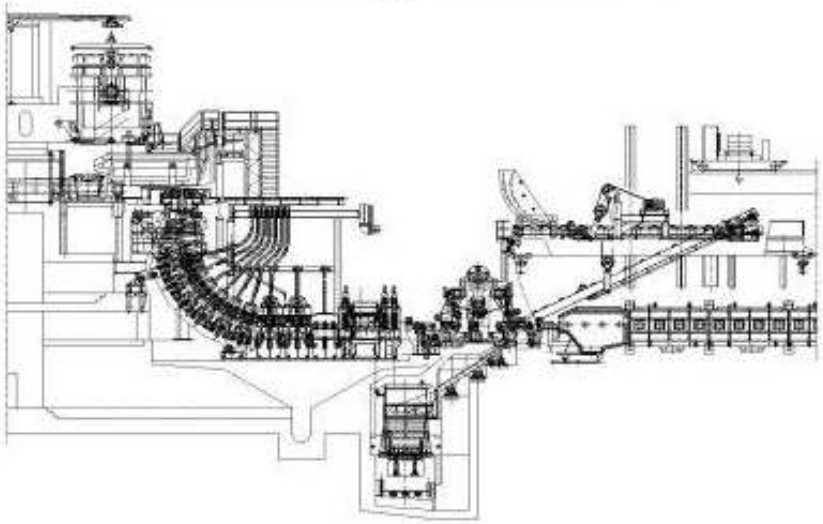


# Evolução das Máquinas de

| Ano | | Países | | Material |
|---|---|---|---|---|
| 1934 | Junghans | Alemanha | Máquina comercial de lingotamento vertical de tarugos para ligas de cobre | Cobre |
| 1949 | Rossi | E.U.A | Máquina comercial de lingotamento vertical de blocos para aço | Aço |
| 1950 | Junghans & Schaaber | Alemanha | Experiências com agitação eletromagnética no molde para blocos de aços efervecentes | Aço |
| 1954 | Halliday | Inglaterra | Oscilação do molde com o princípio do estripamento negativo | Aço |
| 1960 | Hall & Mc.Hugh | Inglaterra | Aplicação industrial de pó de molde como lubrificante para placas | Aço |
| 1963 | Schnecken-burger & Küng | Suiça | Máquina piloto com molde curvo para tarugos de aço | Aço |
| 1964 | Boehler<br>Chonquing<br>Dillingen e Mannesman<br>Uralmasch | Áustria<br>China<br>Alemanha<br>Rússia | Máquinas Comerciais com molde curvo para placas e tarugos | Aço |
| 1980 à 1990 | Outokumpo | E.U.A | Máquina de placas finas para ligas de cobre | Cobre |
| 1985 | SMS | Alemanha | Máquinas Comerciais com molde “funnel type” para placas finas lingotadas de aço | Aço |

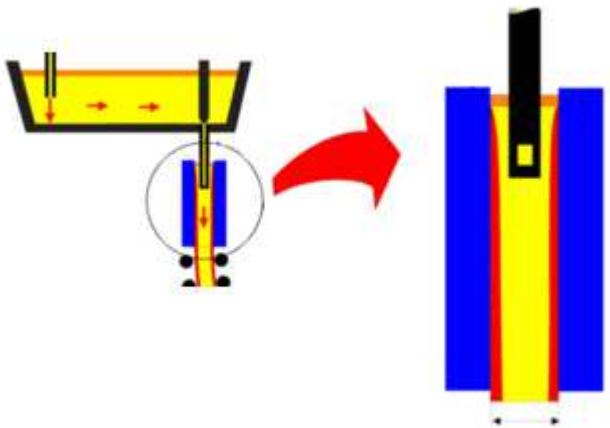


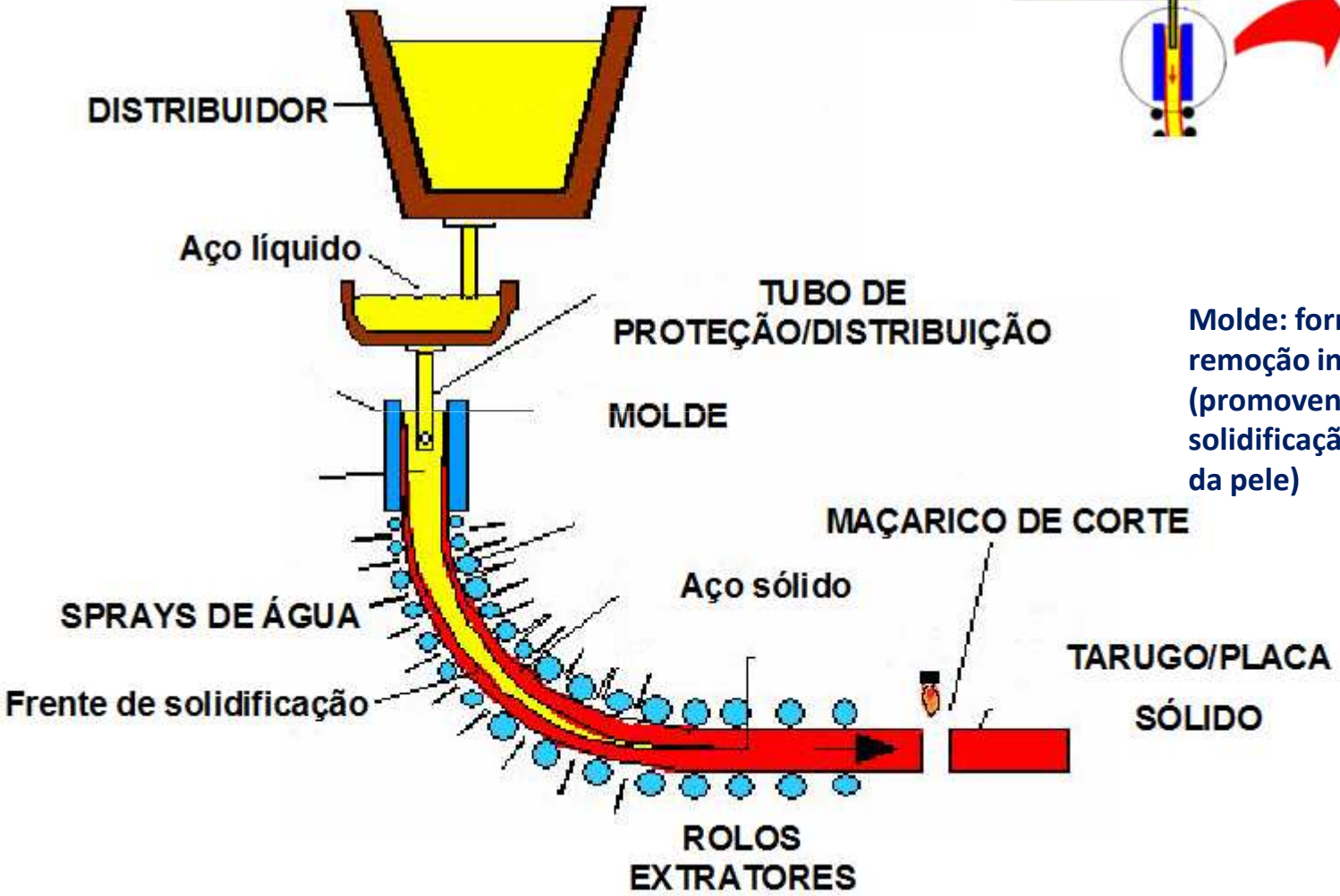

Raios múltiplos



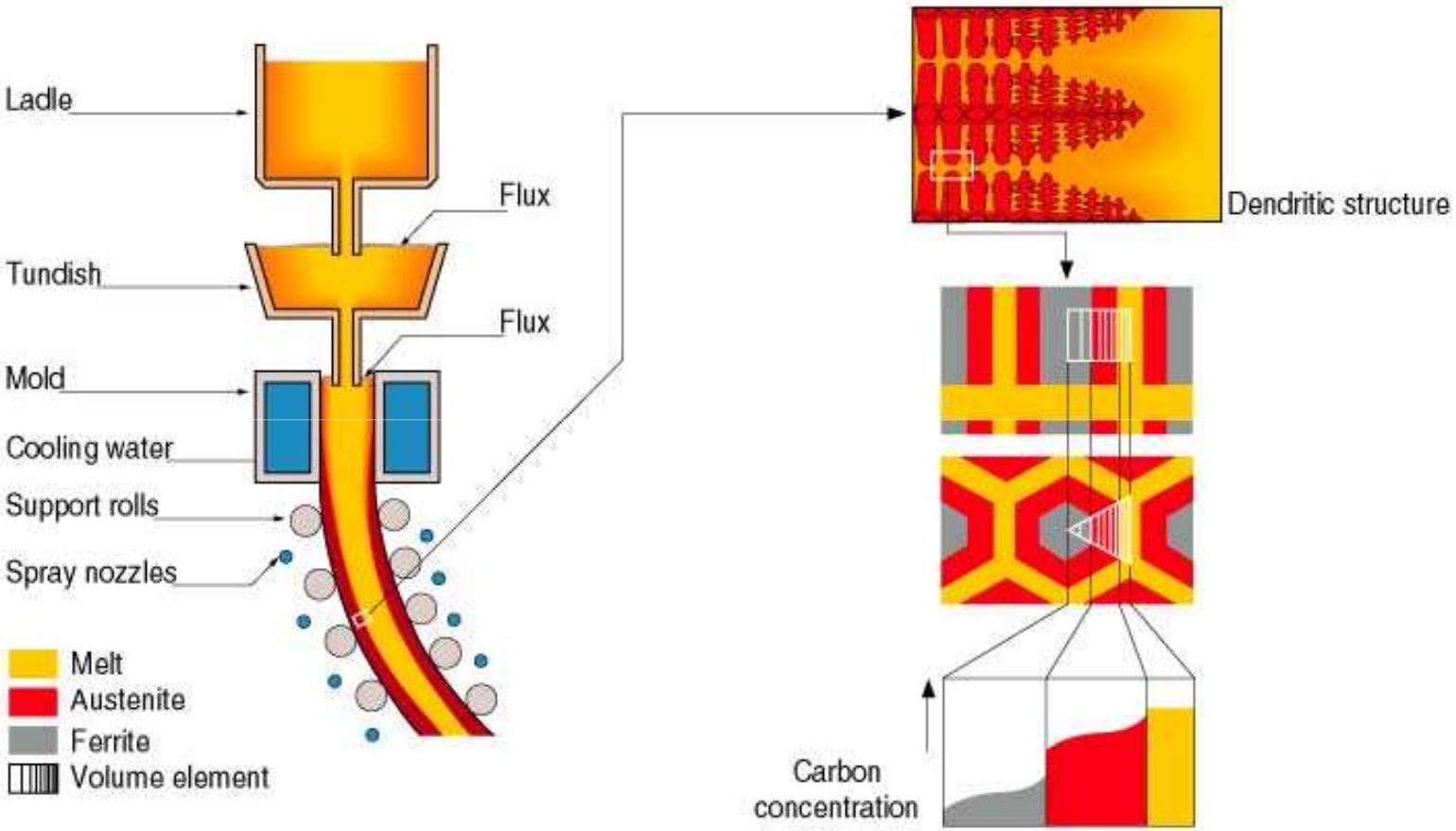
http://www.cadmech.com.pl/project_group.php?gid=3

# LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇO

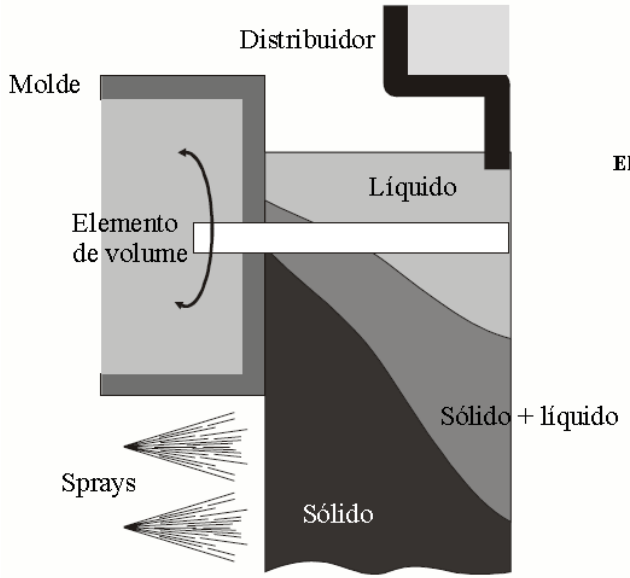


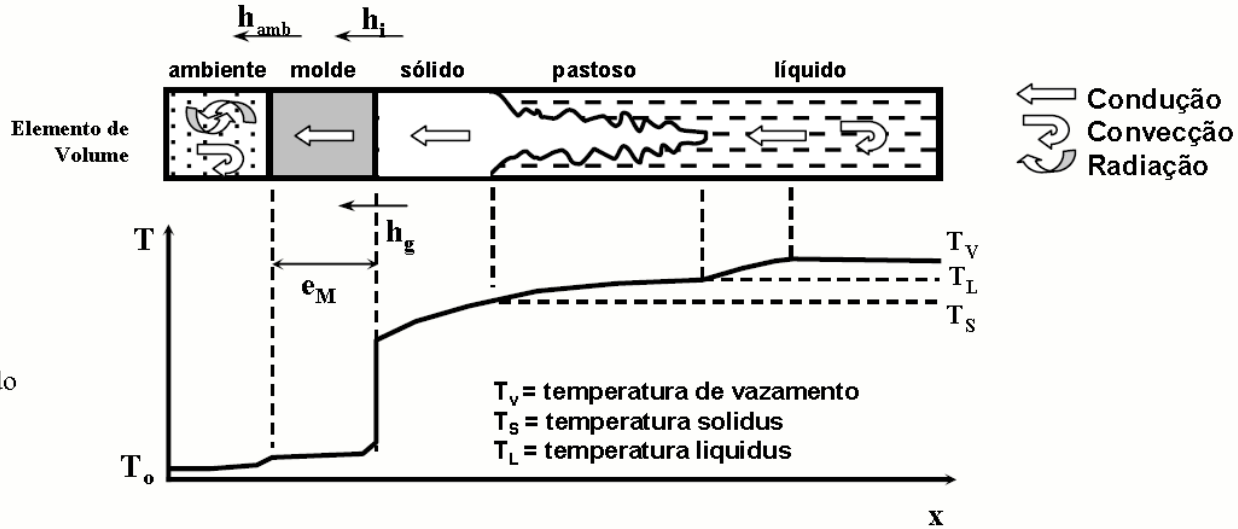


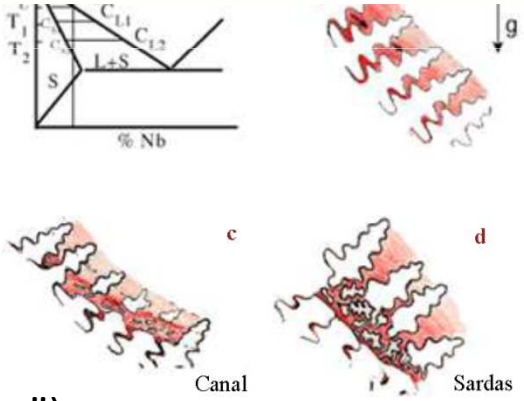

**Molde: forma pela remoção inicial do calor (promovendo a solidificação ou formação da pele)**




http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_1_img.html



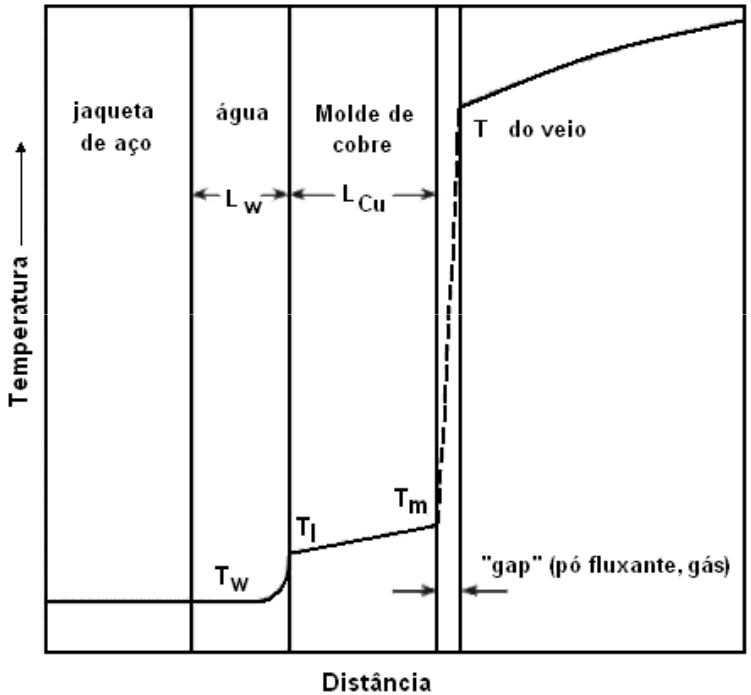

Esquema mostrando a formação das sardas (“freckles”):
a) diagrama de fases mostrando a variação na composição do líquido com a variação da temperatura;
b) formação de fluxo líquido por movimentação convectiva;
c) abertura do canal devido ao fluxo de líquido;
d) consolidação do defeito.

# Temperatura líquidos

$$TL[°C] = 1538 - (55[C\%] + 80[C\%]^2 + 13[Si\%] + 4{,}8[Mn\%] + 1{,}5[Cr\%] + 4{,}3[Ni\%] + 30[S\%])$$

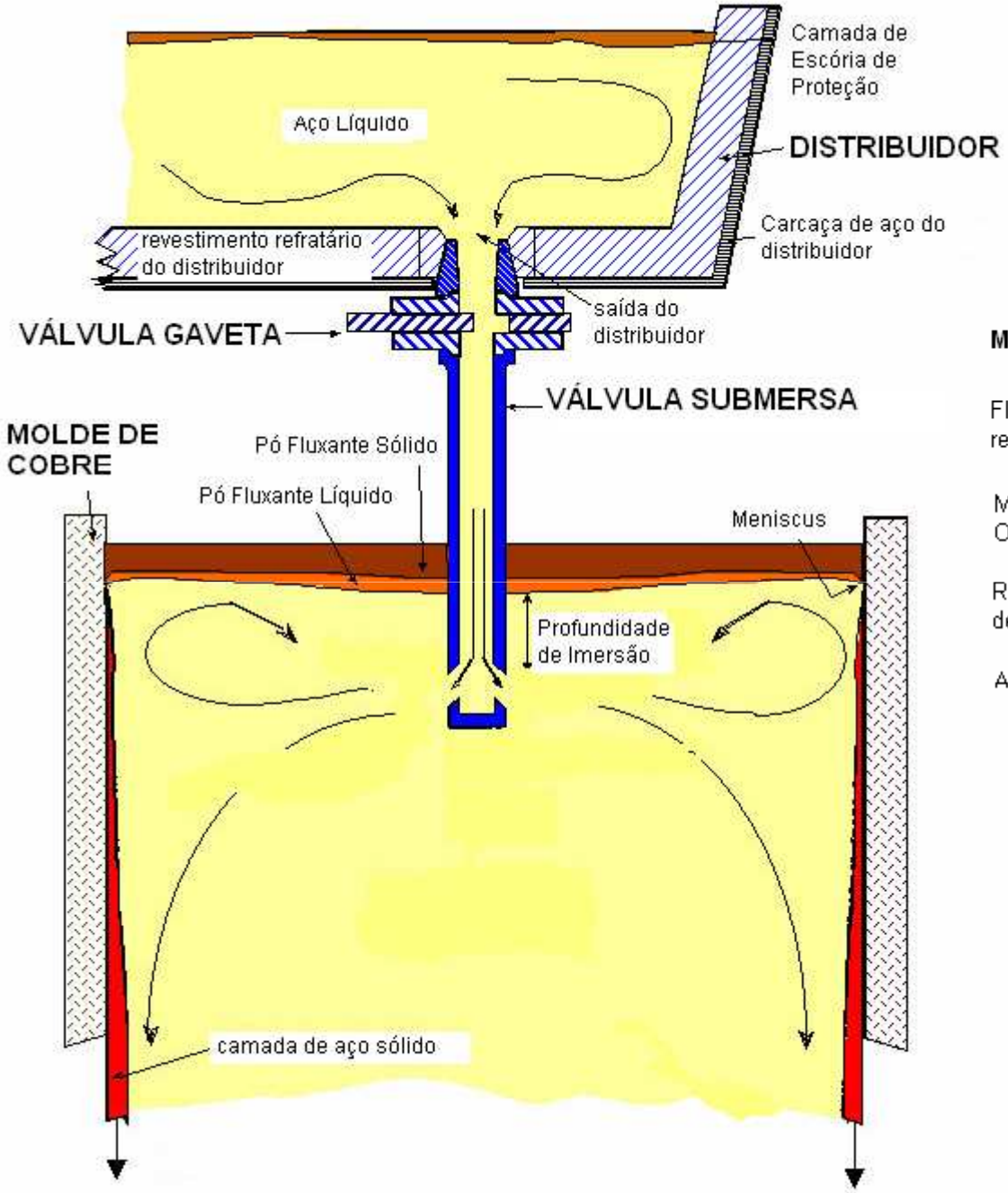
Validade: aços com:
[C%] ≤ 0,50,
[Mn%] ≤ 5,0,
[Si%] ≤ 3,0,
[Cr%]≤ 24 e
[Ni%] ≤ 13

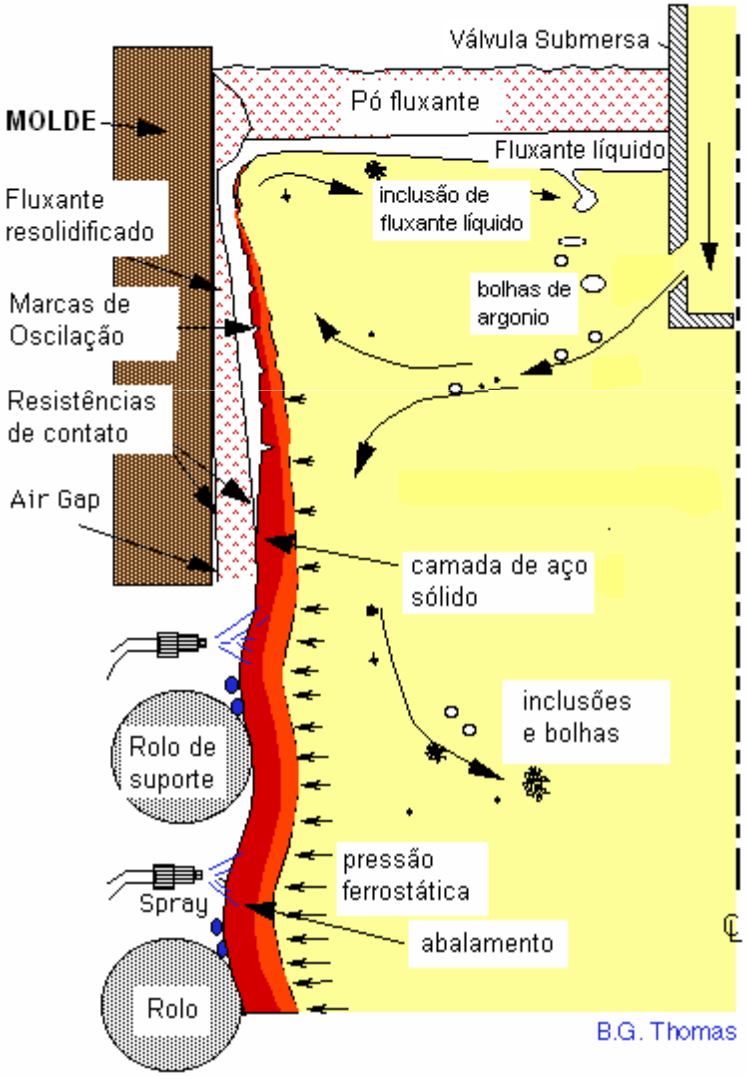
| Região | Dados Físicos/condições | Resistência térmica, $m^2kW^{-1}$ | % do total |
|---|---|---|---|
| Água do molde | $L = 5mm$, $V_{água} = 10ms^{-1}$, $T = 25°C$ | $3{,}15 \times 10^{-5}$ | 0,45 |
| Placa de cobre | $L_{Cu} = 15mm$, $\lambda_{Cu} = 3{,}77\ Wm^{-1}K^{-1}$ | $3{,}98 \times 10^{-5}$ | 0,57 |
| Pó fluxante | $D_{flux} = 1mm$, $\lambda_{sys} = 1\ Wm^{-1}K$ | $100 \times 10^{-5}$ | 14,23 |
| "Gas gap" | $D_{gap} = 0{,}6mm$, $To = 1200°C$, $Tm = 78°C$ | $590 \times 10^{-5}$ | 83,96 |
| Recobrimento de níquel | $D_{coat} = 5mm$, $\lambda_{Ni} = 90\ Wm^{-1}K^{-1}$ | $5{,}55 \times 10^{-5}$ | 0,79 |
| | **Total** | $7{,}03 \times 10^{-3}$ | 100 |



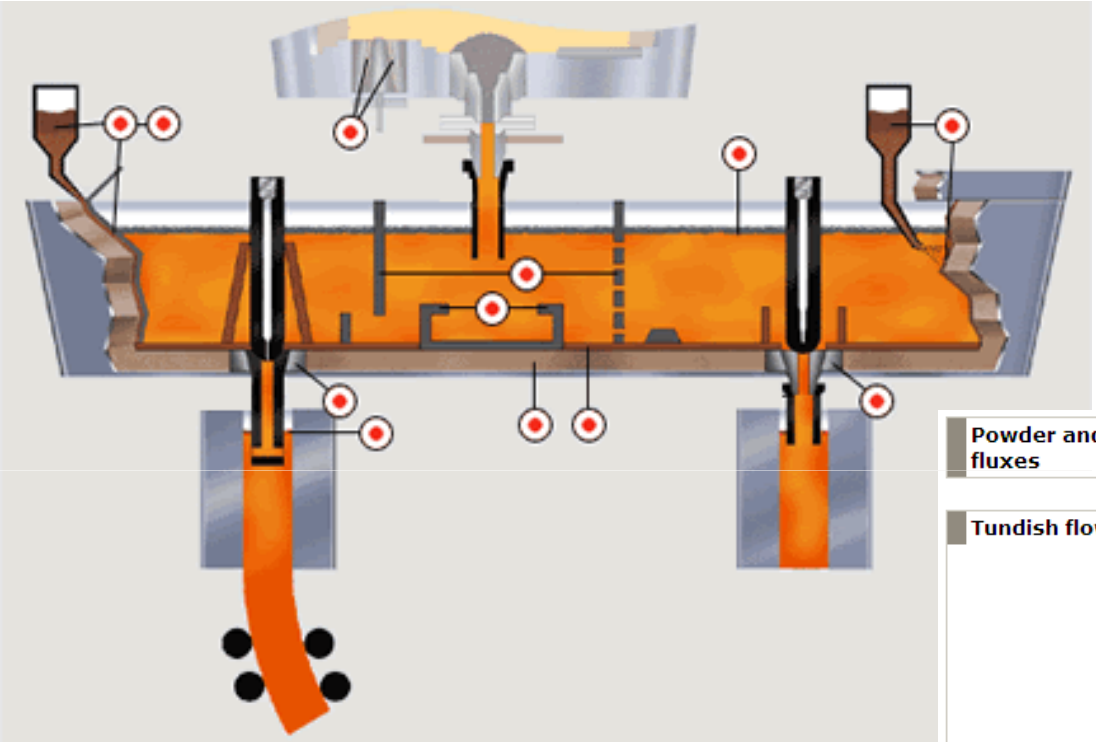

SCHWERDTFEGER, K. *Enhancing fundamental knowledge end industry pratice for the world Iron and Steel Industry*: 4th independent model – Overview of metallurgical phenomena in the mould for billet, bloom, round and slabs. Belo Horizonte: RS Consultants, 2006

# Molde


Camada de Escória de Proteção
Aço Líquido
DISTRIBUIDOR
Carcaça de aço do distribuidor
revestimento refratário do distribuidor
saída do distribuidor
VÁLVULA GAVETA
VÁLVULA SUBMERSA
MOLDE DE COBRE
Pó Fluxante Sólido
Pó Fluxante Líquido
Meniscus
Profundidade de Imersão
camada de aço sólido


Válvula Submersa
Pó fluxante
MOLDE
Fluxante líquido
Fluxante resolidificado
inclusão de fluxante líquido
bolhas de argonio
Marcas de Oscilação
Resistências de contato
Air Gap
camada de aço sólido
inclusões e bolhas
Rolo de suporte
pressão ferrostática
Spray
abalamento
Rolo
B.G. Thomas

## Distribuidor (Tundish)

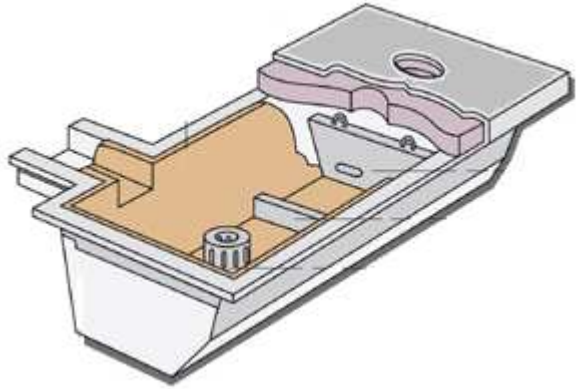


Exemplos de insumos para lingotamento contínuo (Foseco)

| | |
|---|---|
| **Powder and granular fluxes** | **AFAX™** Continuous casting mould fluxes |
| **Tundish flow control** | **FOSCAST™** Well blocks and seating blocks<br>**FOSCAST™ DWI** High temperature refractory materials<br>**REACTOL™** Active tundish cover<br>**TUNDISOL™** Active tundish cover<br>**TURBOSTOP™** Tundish flow control system |
| **Tundish lining products** | **FOSCAST™** Permanent tundish lining<br>**GARNEX™** Preformed Board Tundish Lining System<br>**TUNCAST™** Spray tundish working lining<br>**TUNDEX™ CS** Cold set tundish working lining<br>**TUNDEX™ HS** Hot set tundish lining |

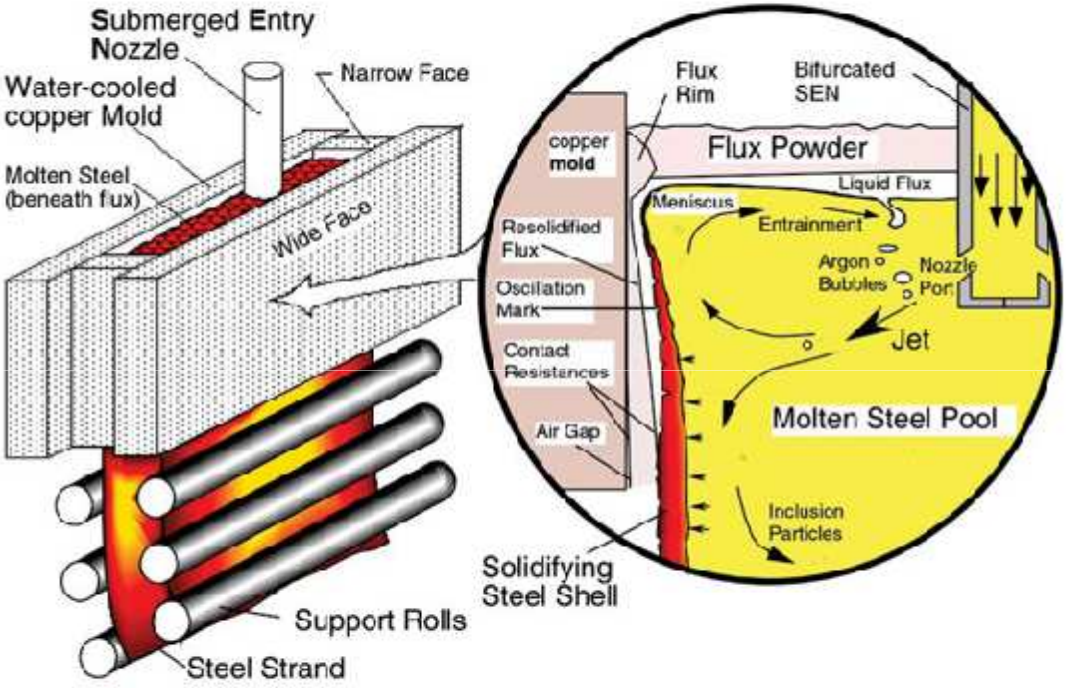
**http://www.foseco-steel.com/steel/products_and_services/continuous_casting/ima**

## Distribuidor (Tundish)

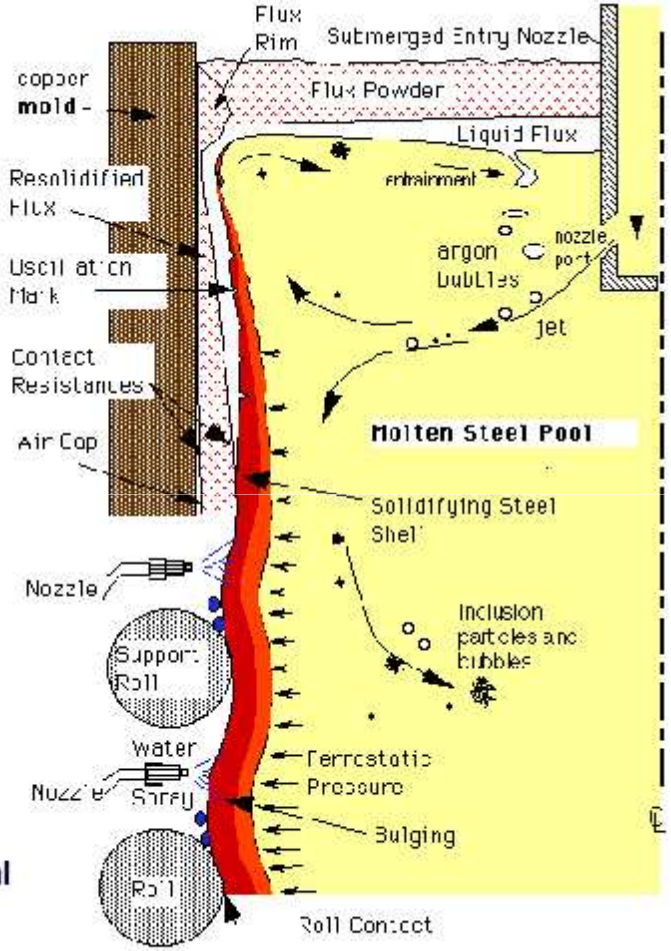


- Principais funções
  - Reservatório de aço permitindo a troca de panelas
    - Manter velocidade constante de lingotamento
  - Eliminação de inclusões
    - Barragens e escória sintética
  - Adição de elementos de liga

**http://www.psc.edu/science/USS/USS.html**




http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0612/Thomas/Thomas-0612.html




http://ccc.illinois.edu/introduction/basicphenom.html

# Pós fluxantes

**Composição química**

$CaO/SiO_2/MgO/Al_2O_3$ + aditivos;
-Aditivos: Zr, Li, B, F, Na, K, etc.
-Determinada de acordo com condições operacionais de lingotamento;
-Velocidade de lingotamento;
-Tipo de aço/temperatura de lingotamento;
-Características da válvula submersa;
-Injeção de argônio na válvula submersa;
-Problemas de qualidade

**Valores visados de propriedades**

-Viscosidade ($\eta$): $\eta V$ = 1 a 3,5
- Alta - Deficiência na lubrificação
- Baixa - Arraste de pó e escória, ataque à válvula submersa;

-Break point (temperatura de solidificação)
- Geralmente entre 1000 e 1250 °C
- Determinado pela temperatura de lingotamento
- Alto - Baixa lubrificação e fluxo de calor
- Baixo - Flutuações de temperaturas no molde

**Principais funções**

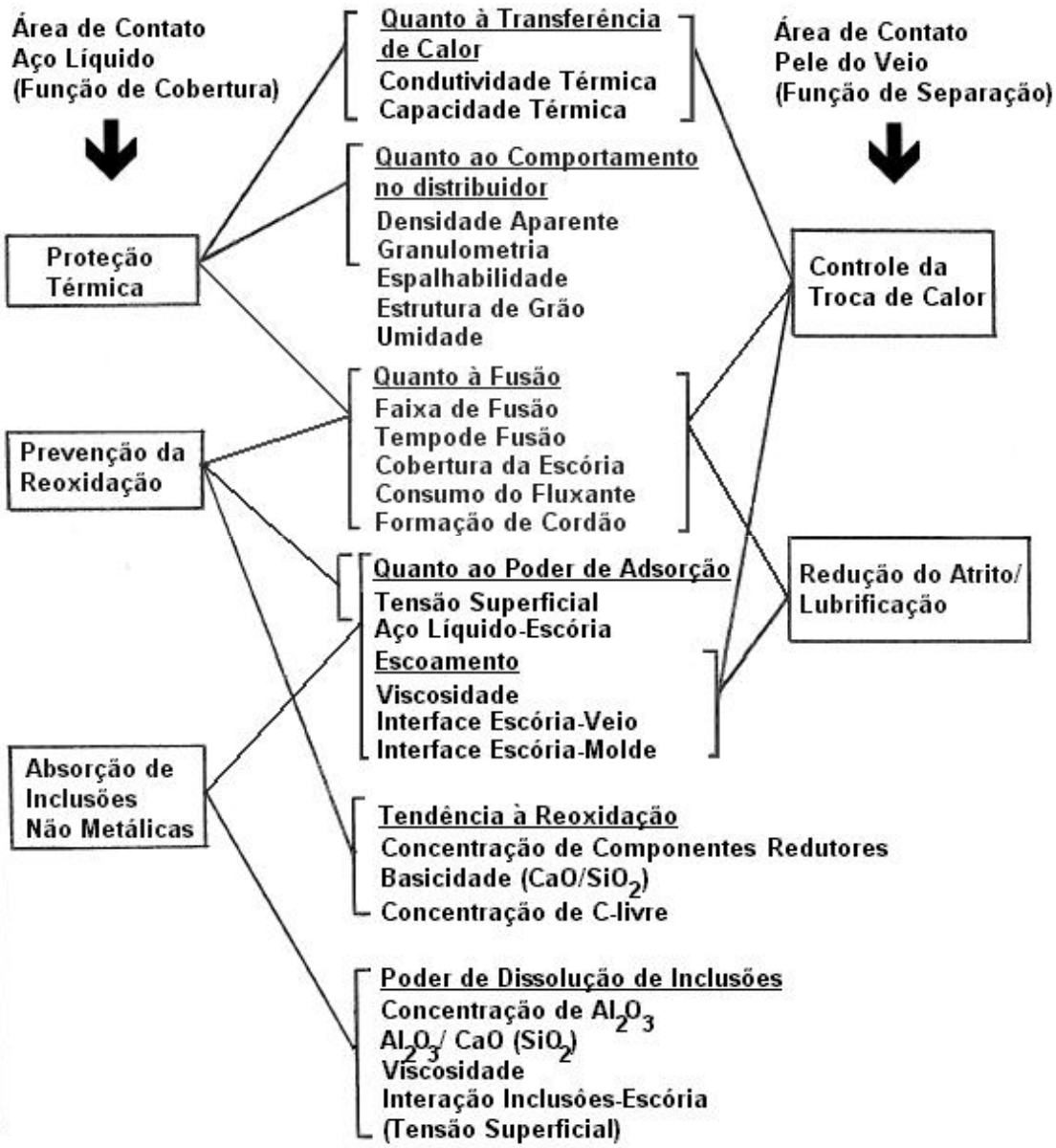
- Proteção térmica e química do menisco
- Densidade
- Espessura da camada líquida
- Absorção de inclusões
- Composição química
- Lubrificação
- Viscosidade, temperatura de solidificação
- Controle do resfriamento no molde

# Pós fluxantes: composição química

Composição química (% de massa) dos pós de cobertura disponíveis comercialmente.

| Tipo de escória | $SiO_2$ | CaO | MgO | $Al_2O_3$ | $Fe_2O$ | $Na_2O+K_2O$ | C total | Observações |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a base de MgO | 6 | 10 | 80 | 2 | / | / | / | para panela e distribuidor |
| Cinza de Palha de arroz | 93 | 0,6 | 0,5 | / | / | 2,1 | 2,6 | para panela e distribuidor |
| Silicato-Al (com baixo C ) | 36 | 2,5 | 1,8 | 20 | 7 | 2,7 | 25 | para panela e distribuidor bom isolante |
| Silicato de Cálcio | 39 | 43 | 4,2 | 10 | 0,5 | 1 | 0 | para panela e distribuidor Livre de C |
| Silicato - Al -Na (com baixo C ) | 36 | 2,5 | 1,6 | 20 | 6,5 | 8 | 18 | forma camada de escória líquida, tem boa absorção de inclusões |
| Dolomita-Cálcio | 4,9 | 60 | 32 | 2,1 | 1,4 | 0,5 | 3 | pequeno poder de redução |
| Aluminato de Cálcio | 4 | 42 | 1,5 | 45 | 1 | 1 | 1,4 | pequeno poder de redução, boa absorção de inclusões |
| $CaO-MgO-Al_2O_3$ | 4 | 48 | 20 | 22 | 0,5 | 1,3 | 0,5 | pequeno poder de redução, boa absorção de inclusões |

# Funções dos pós fluxantes



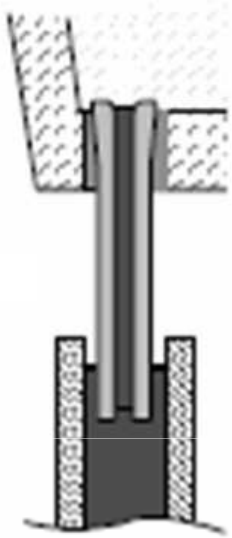

Fases mineralógicas na escória dos pós fluxantes.

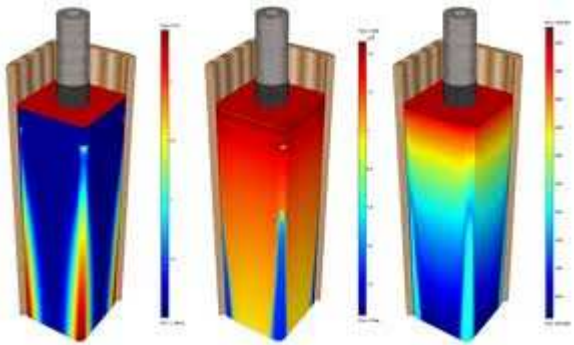
| Mineral | Fórmula Química |
|---|---|
| Pseudo Volastonita | $\beta$ - CaO • $SiO_2$ |
| Petalita | $Na_2O \bullet 4CaO \bullet 6SiO_2 \bullet H_2O$ |
| Gehlenita | $2CaO \bullet Al_2O_3 \bullet SiO_2$ |
| Carnegieita | $Na_2O \bullet Al_2O_3 \bullet SiO_2$ |
| Combeita | $4Na_2O \bullet 6SiO_2 \bullet Ca(OH)_2 \bullet CaF_2$ |
| Nefelina | $Na_2O \bullet Al_2O_3 \bullet 2SiO_2$ |
| Xenolita | $6CaO \cdot 6SiO_2 \cdot H2O$ |

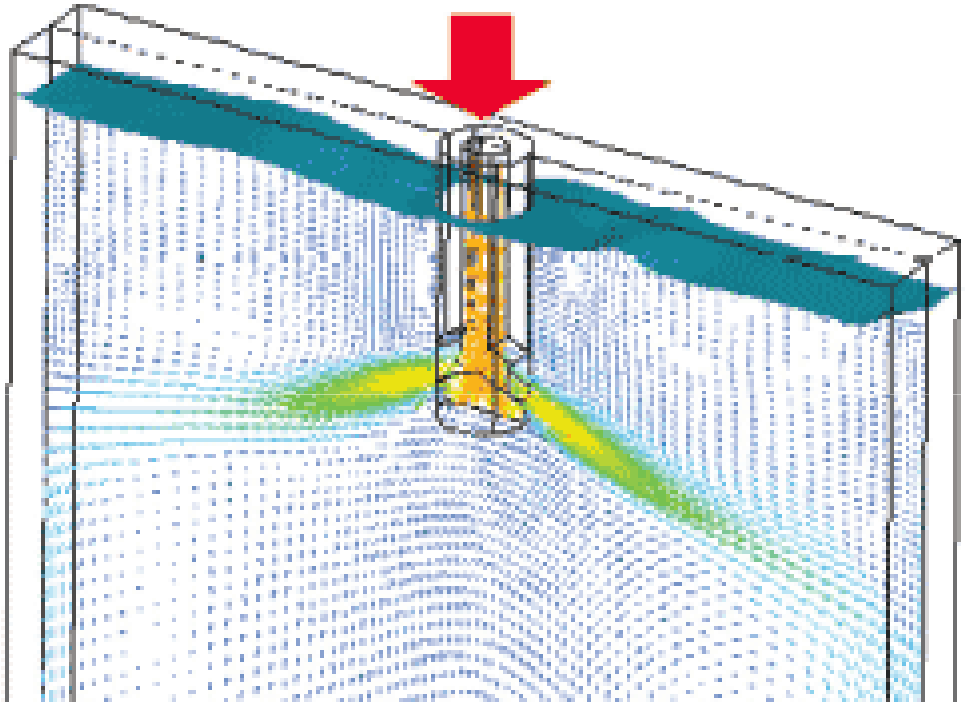
# Efeito dos elementos sobre o pó fluxante

| Increase in | Viscosity | solidification temperature | Melting point |
|---|---|---|---|
| CaO | Decrease | Increase | Increase |
| $SiO_2$ | Increase | Decrease | Decrease |
| $CaO/SiO_2$ | Decrease | Increase | Increase |
| $Al_2O_3$ | Increase | Decrease | Increase |
| $Na_2O$ | Decrease | Decrease | Decrease |
| F | Decrease | Increase | Decrease |
| $Fe_2O_3$ | Decrease | Decrease | Decrease |
| MnO | Decrease | Decrease | Decrease |
| MgO | Decrease | Decrease | Decrease |
| $B_2O_3$ | Decrease | Decrease | Decrease |
| BaO | Decrease | Decrease | Decrease |
| $Li_2O$ | Decrease | Decrease | Decrease |
| $TiO_2$ | No change | Increase | Increase |
| $K_2O$ | Decrease | Decrease | Decrease |

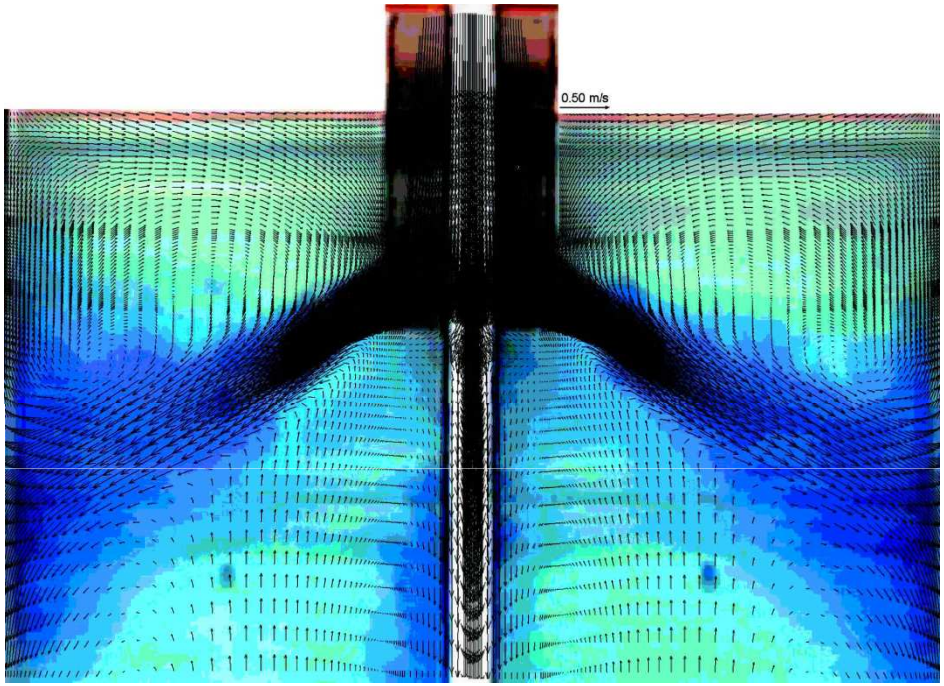
# Válvula Submersa

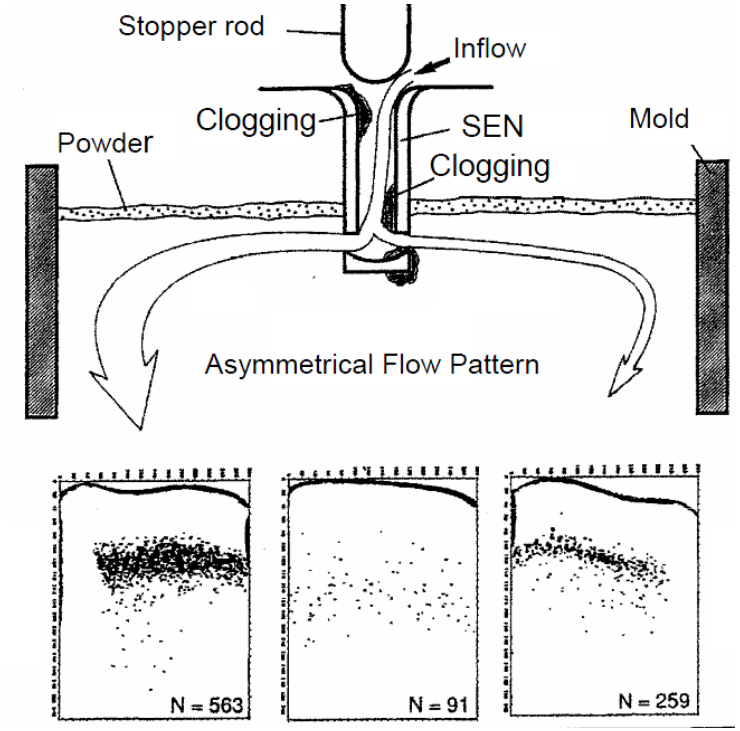






# Válvulas submersas + Fluxantes: remoção de incçisões

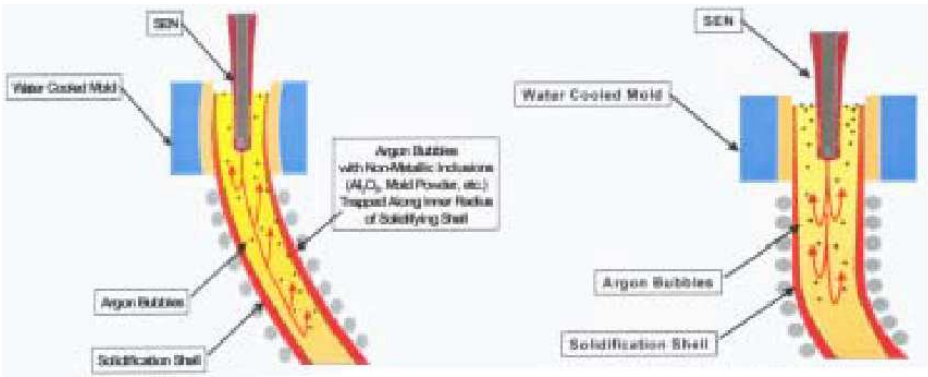


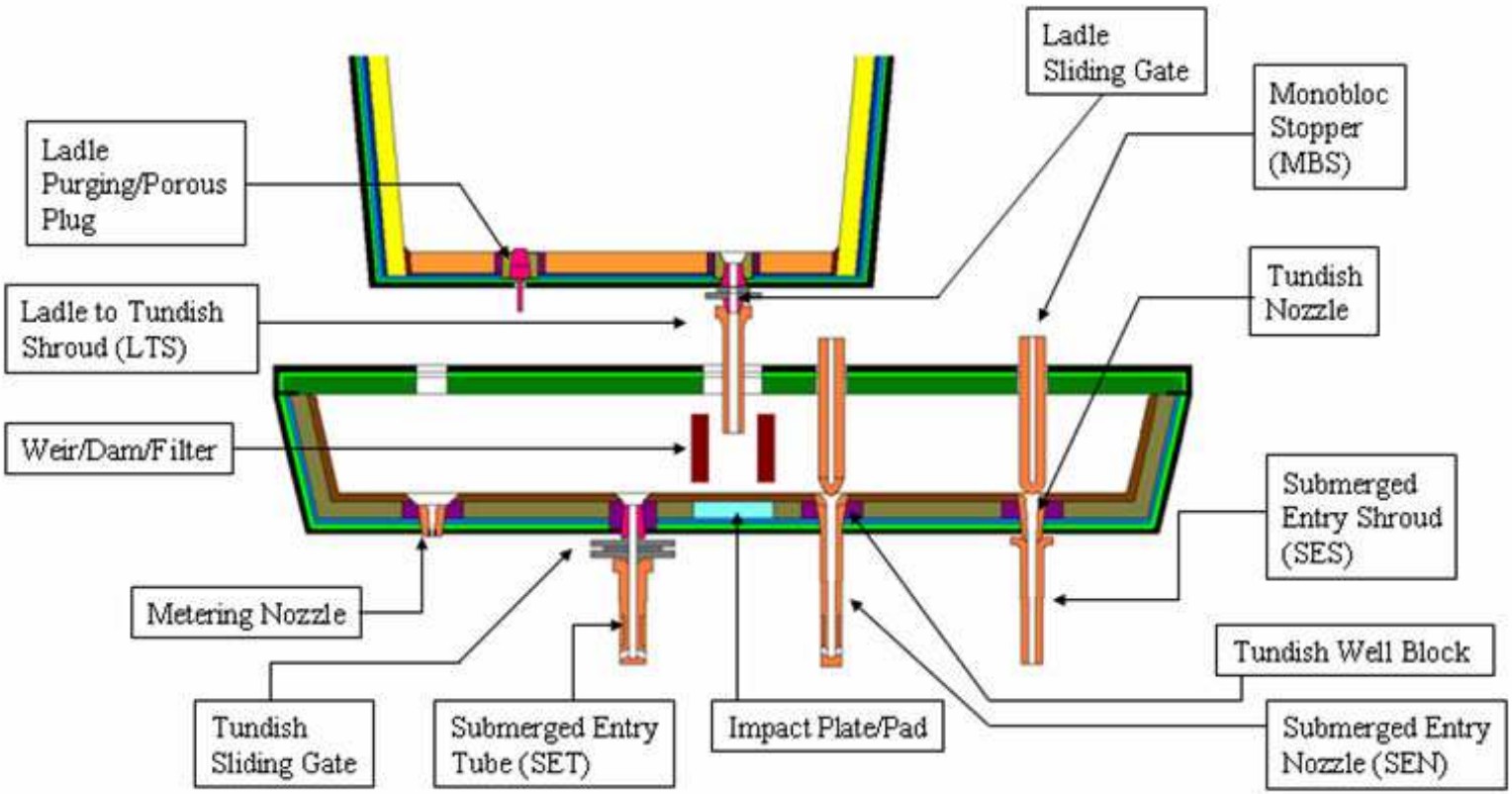

**Top surface Control**

**Fluid flow pattern**

**Caster Curvature**

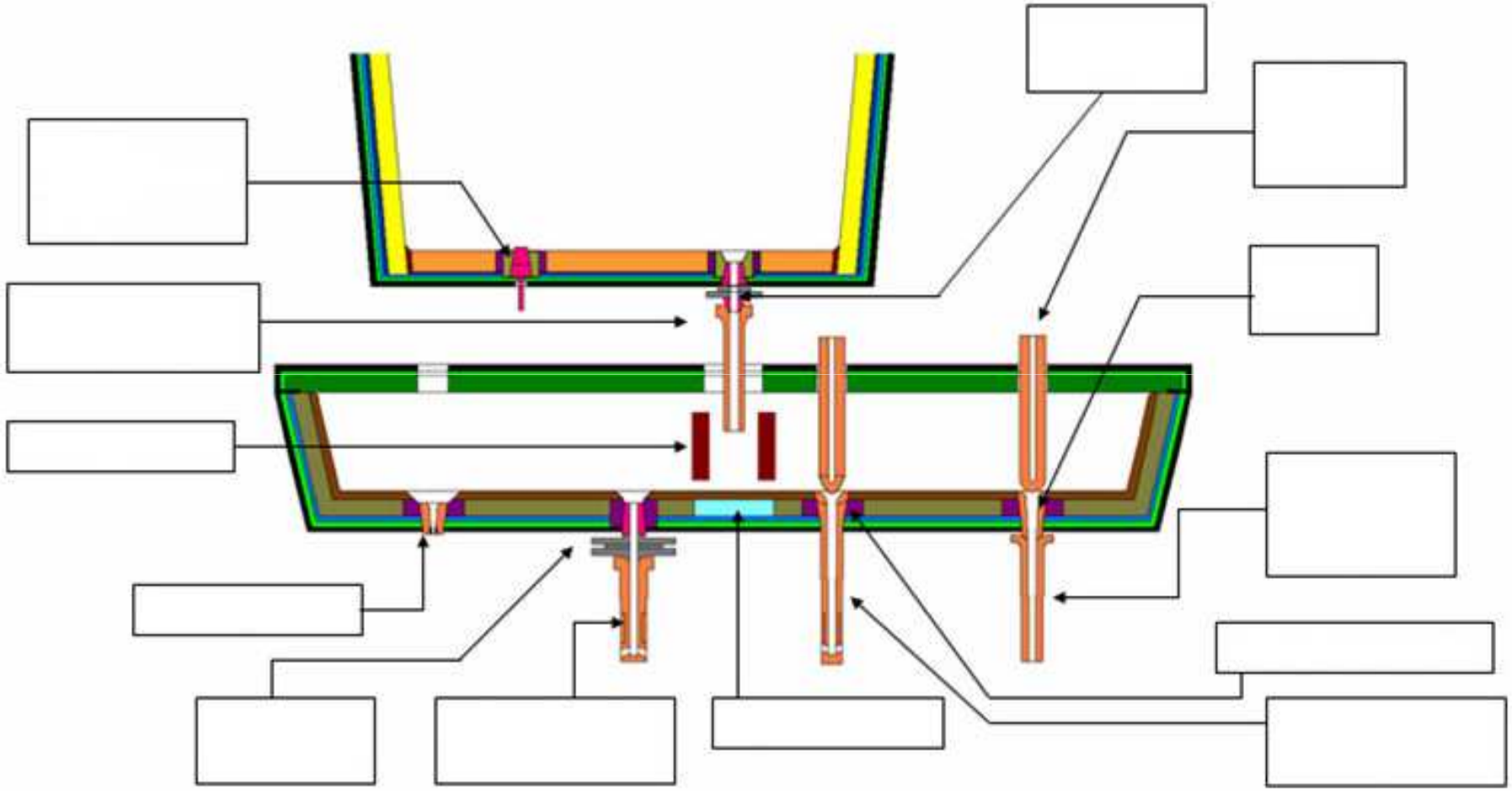


# Lingotamento contínuo: principais refratários




http://www.mayerton.com/index.php?id=109

# Exercício: Insira o nome de cada dispositivo ( em Português) de cada caixa associada.



# Máquina de Adição Automática de Pó Fluxante

# Moldes

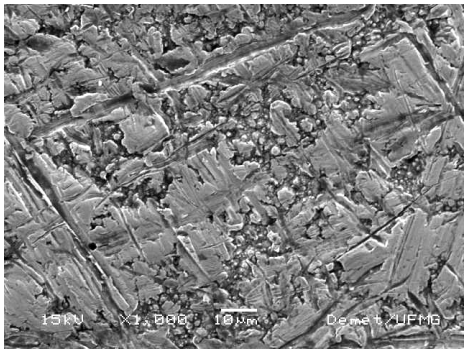
http://www.godongraphite.com/product2.htm

| Composição Química | | Propriedades Mecânicas (mínimas) | | | | Cond. Elétrica |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu (%) | Outros (%) | Resistência a Tração | 0,2 % "Proof" Resistência | Alongamento % | Dureza (HB) | % IACS (20°C) |
| **99,9** | **-** | 200 | 40 | 40 | 45 | 98 |
| **Cu + Ag 99,9** | **Ag**<br>0,07 / 0,12 | 250 | 200 | 10 | 80 | 98 |
| **Cu + Ag 99,9** | **P**<br>0,004 / 0,915<br>**Ag**<br>0,07 / 0,12 | 250 | 200 | 15 | 80 | 85 |
| **98** | **Cr**<br>0,5 / 1,5 | 350 | 280 | 10 | 110 | 80 |
| **98** | **Cr**<br>0,5 / 1,50<br>**Zr**<br>0,08 / 0,30 | 350 | 280 | 10 | 110 | 70 |
| **98** | **Cr**<br>0,5 / 1,50<br>**Zr**<br>0,08 / 0,30 | 300 | 240 | 15 | 100 | 70 |

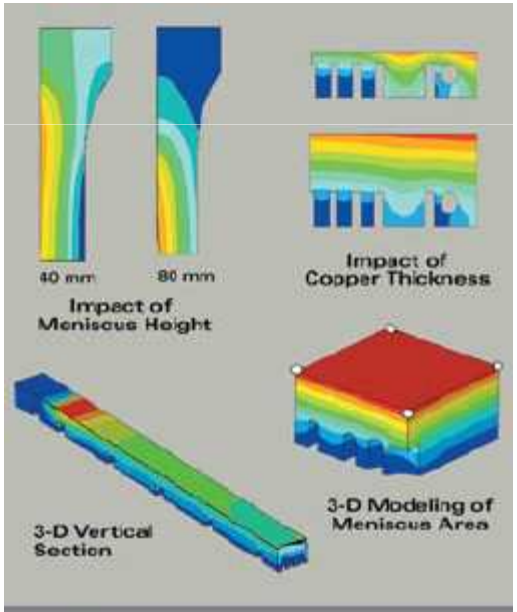
# Ligas de cobre para uso em moldes tubulares

| | CuP | CuAgP | CuCrZr | CuCrZr (50/70%IACS) |
|---|---|---|---|---|
| Condutividade Térmica (20°C) W/ (m.K) | Alta 340 | Muito alta 377 | Alta 355 | Média 245 ~ 290 |
| Temperatura de Recristalização (°C) | Média 350 | Média 370 | Muito alta 700 | Muito alta 700 |
| Resistência / Dureza (20°C) HB | Média 95 | Média 95 | Alta 130 | Alta 125 - 140 |
| Condutividade Elétrica (20°C) %IACS | Média 83 | Alta 95 | Média 86 | Baixa 55 ~69 |
| Expansão Térmica 20 ~300°C $10^{-6}$K | 17,7 | 17,7 | 18 | 18 |
| Aplicação | Condições Normais | Maior Fluxo de Calor e Tensionamento Térmico | | Uso de EMS |

# Molde de lingotamento contínuo revestido em níquel



Erik Luís Sardinha Cecconello, dissertação de mestrado / UFMG – DEQ 2006




▲ Modelagem térmica para otimização do projeto do resfriamento primário

http://www.smsdemag.com.br/Catalogos/Novas%20placas%20em%20cobre_L2.pdf

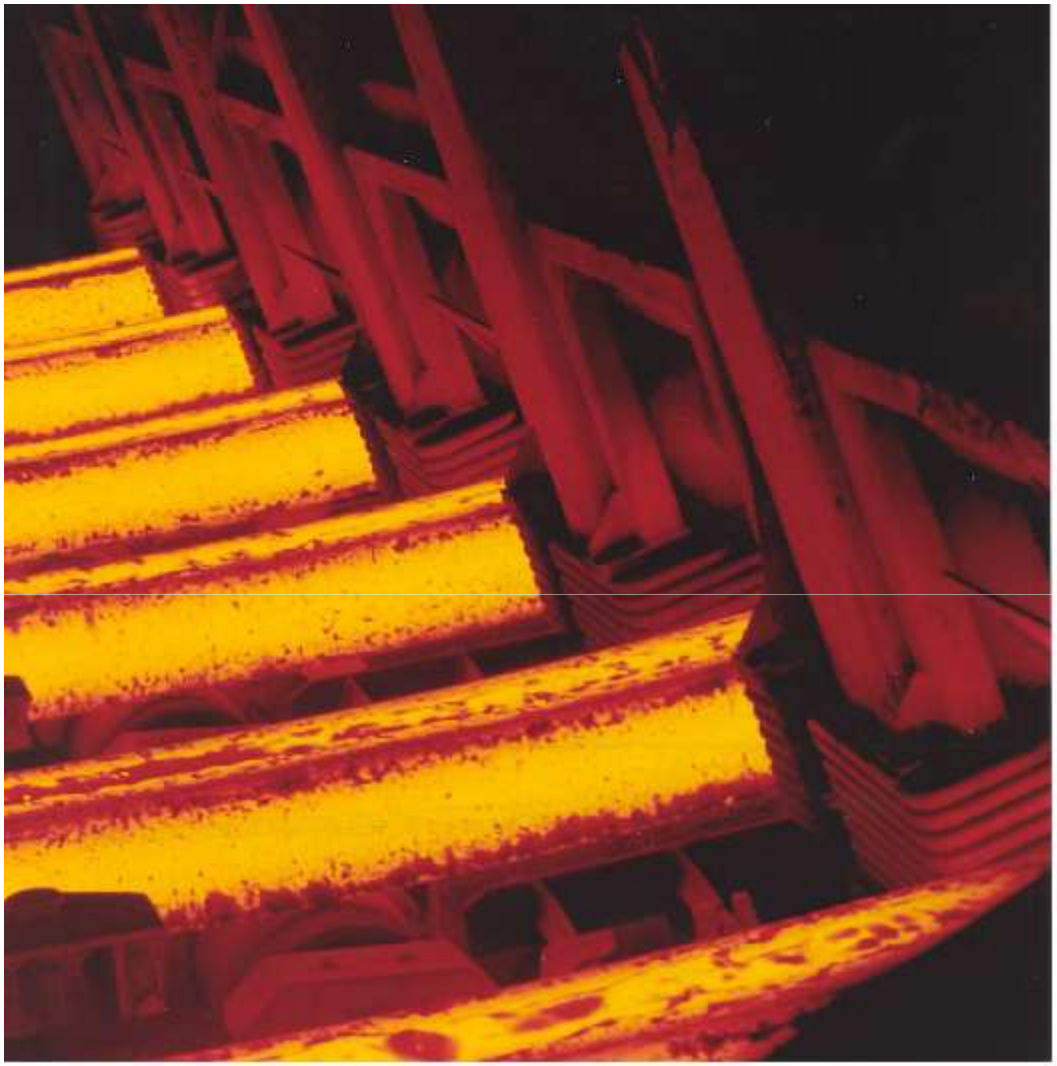
# Novas tecnologias: aspersão térmica de materiais cerâmicos para cobertura do molde substituindo a galvanização (usualmente com níquel)

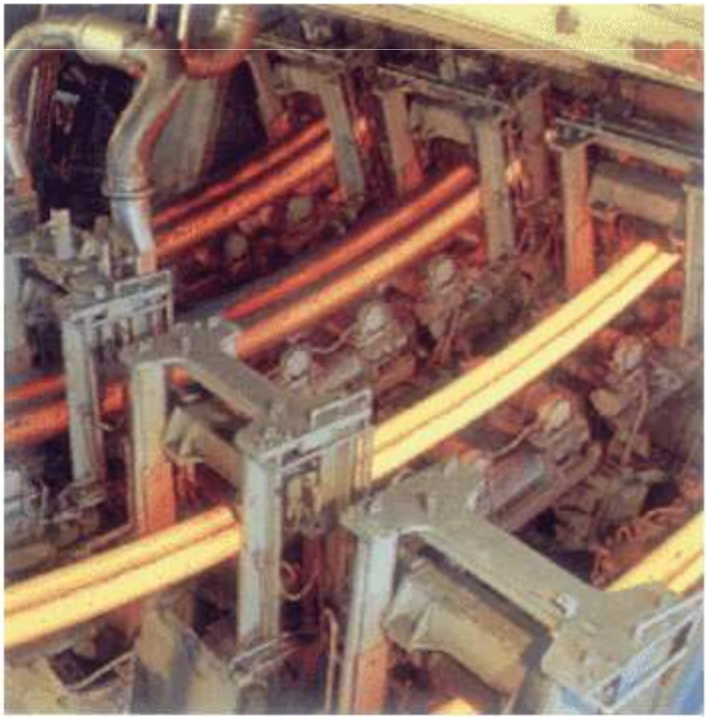
| Casos | Revestimento em Ni | Revestimento Cerâmico | Resultados | |
|---|---|---|---|---|
| Vida Útil | Vida Útil | Aumento V.U. | Custo | |
| A | 120.000 ton | 300.000 ton | 150% | U$ 897.000,00 |
| B | 150.000 ton | 500.000 ton | 233% | U$ 989.000,00 |
| C | 135.000 ton | 385.000 ton | 185% | U$ 785.257,00 |
| D | 130.500 ton | 302.000 ton | 131% | U$ 556.047,00 |

(*) Aspersão Térmica Hipersônica

**Problema: custo de investimento e custo da retificação (ferramentas e material de consumo) para reparo ou novo recobrimento !**

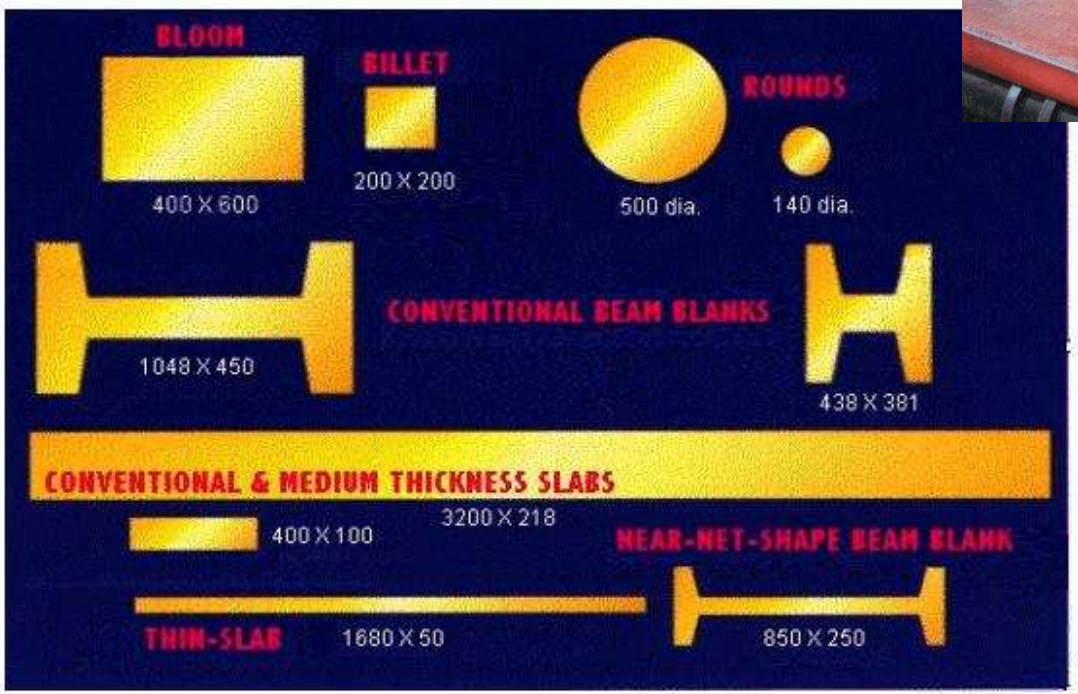
Equipamento HVOF (*)





PRODUTOS

http://www.steel-intelligence.com



http://www.emt-india.net/process/iron_steel/cont_cast_steel.htm

Solidificação

Transformações de fase

Fatores termomecânicos

# Defeitos

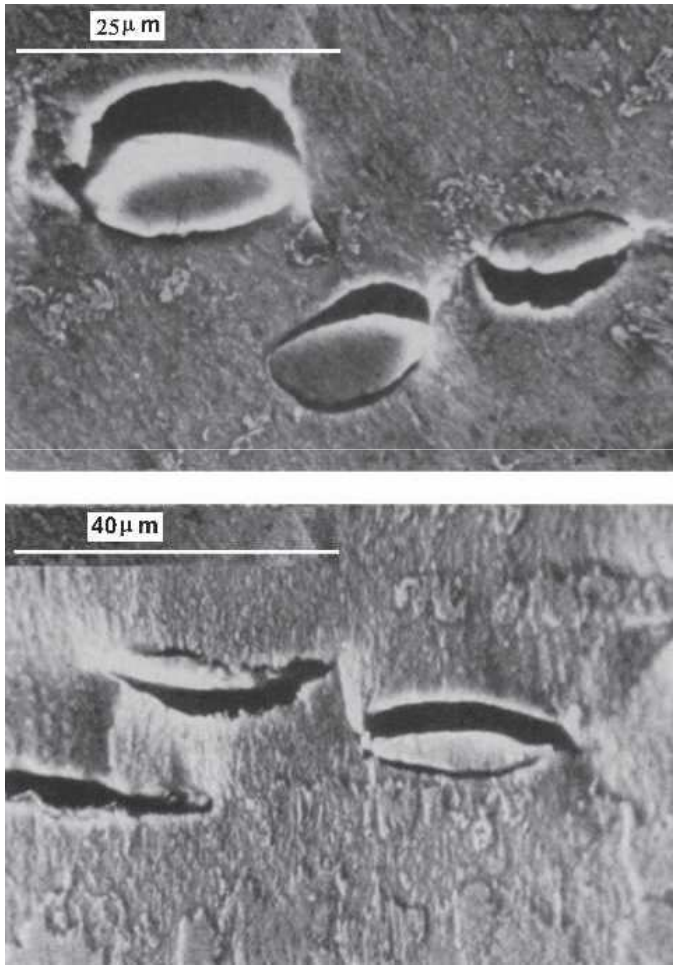
Processamento, acabamento e manuseio das placas e tarugos

Gases e produtos gasosos e de solubilidade

Limpeza: rota metalúrgica:
- Produtos da de(re)-oxidação: exposição ao ar, escórias oxidantes, ou pó fluxante;
- Reações com elementos de liga;
- Produtos de solubilidade;
- Refratários.

Inclusões:
- Exógenas
- Endógenas

# Defeitos: Inclusões e propriedades



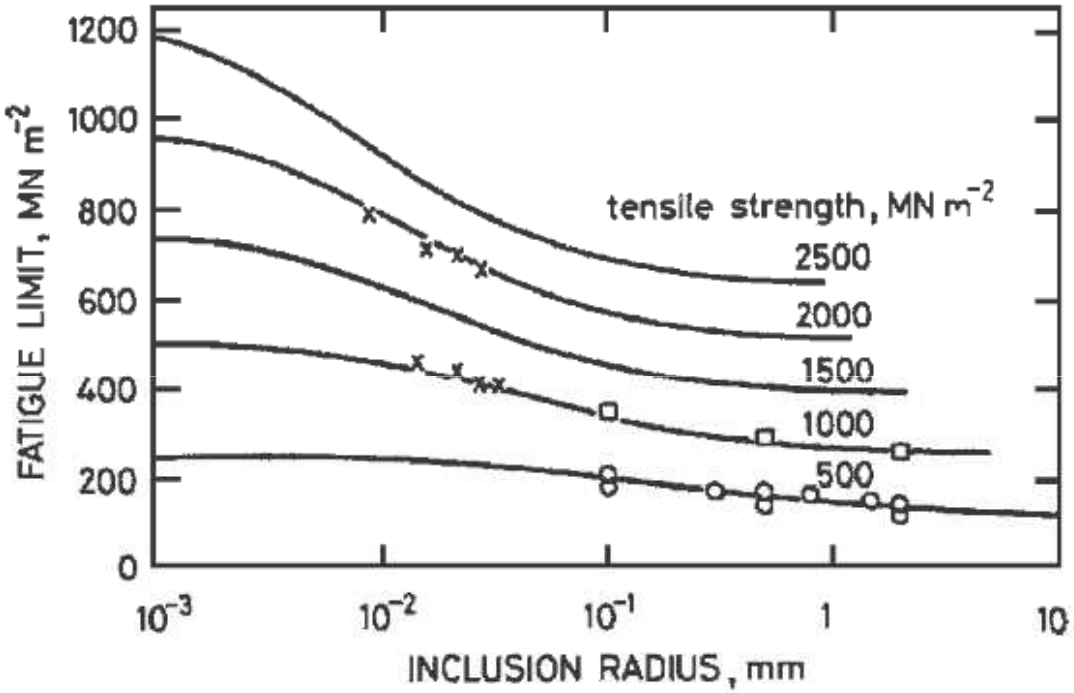
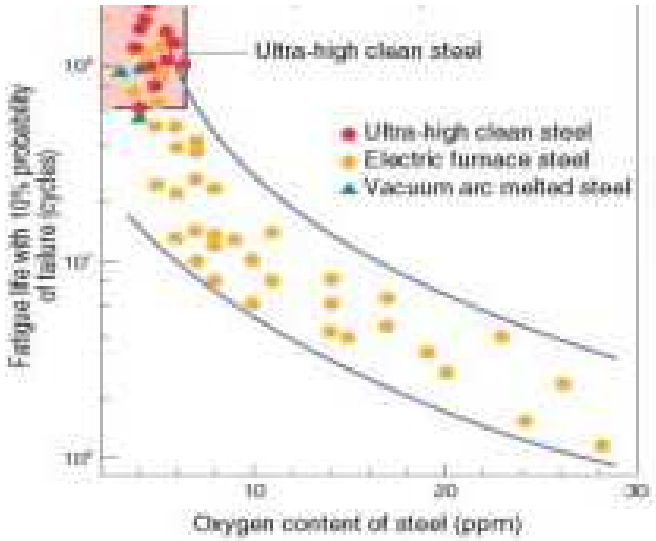




Fig. 4—Comparison between experimental (dots) and predicted fatigue limit (curve) for different inclusion sizes at different strength levels.[10]

Efeito das inclusões na criação de vazios e interconexão destes durante a deformação

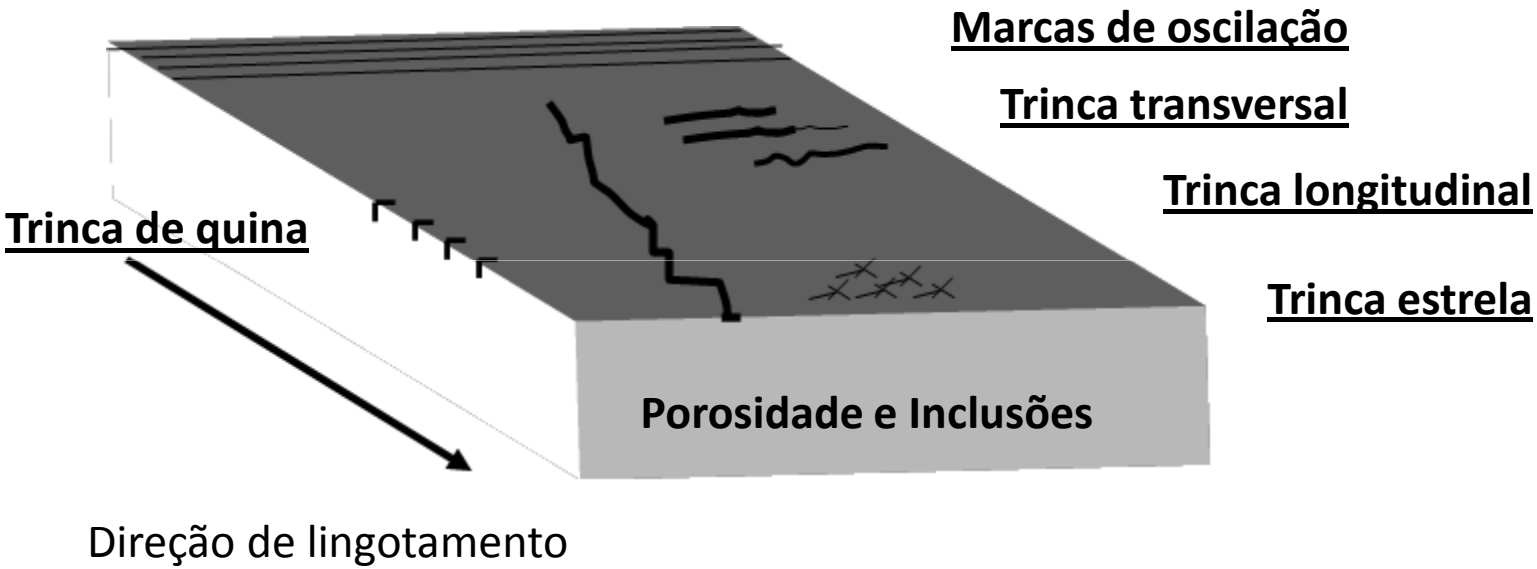
# "Limpeza" típica requerida para vários tipos de aços

| Steel Product | Maximum Impurity Fraction | Maximum Inclusion Size |
|---|---|---|
| Automotive and deep drawing Sheet | [C] ≤ 30 ppm, [N] ≤ 30 ppm[260] | 100 μm[260,261] |
| Drawn and ironed cans | [C] ≤ 30 ppm, [N] ≤ 30 ppm, T.O. ≤ 20 ppm[260] | 20 μm[260] |
| Line pipe | [S] ≤ 30 ppm,[263] [N] ≤ 35 ppm, T.O. ≤ 30 ppm,[263] [N] ≤ 50 ppm[264] | 100 μm[260] |
| Ball bearings | T.O ≤ 10 ppm[111,262] | 15 μm[111,263] |
| Tire cord | [H] ≤ 2 ppm, [N] ≤ 40 ppm, T.O. ≤ 15 ppm[263] | 10 μm[263] 20 μm[261] |
| Heavy plate steel | [H] ≤ 2 ppm, [N]30 to 40 ppm, T.O. ≤ 20 ppm[263] | single inclusion 13 μm[260] cluster 200 μm[260] |
| Wire | [N] ≤ 60 ppm, T.O. ≤ 30 ppm[263] | 20 μm[263] |



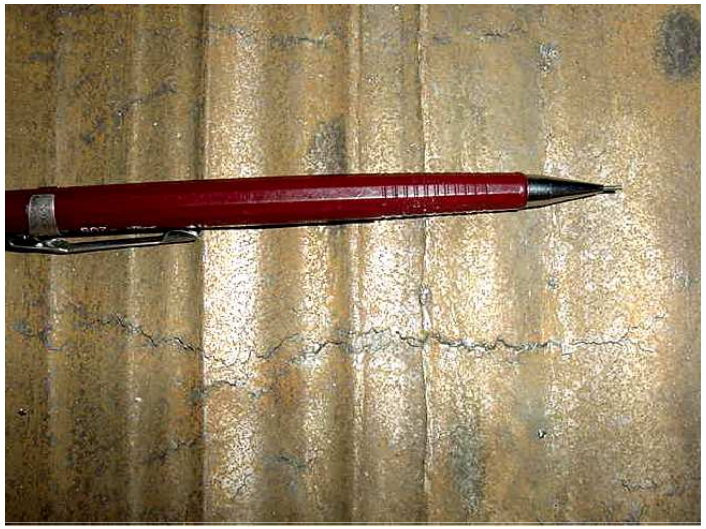

**INCLUSIONS IN CONTINUOUS CASTING OF STEEL Lifeng Zhang (Dr.), Brian G. Thomas (Prof.)**

# Defeitos típicos em uma placa lingotada (lingotamento contínuo)



## Trincas Longitudinais

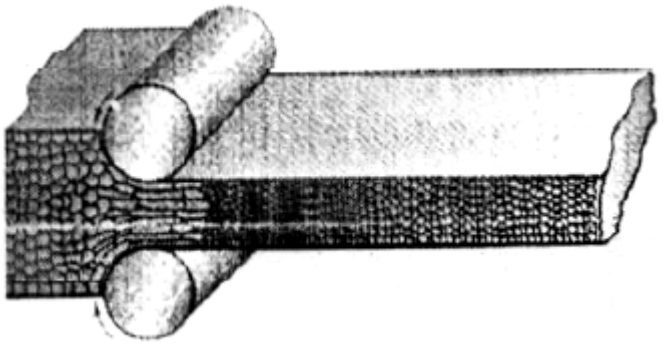
## Trincas Transversais

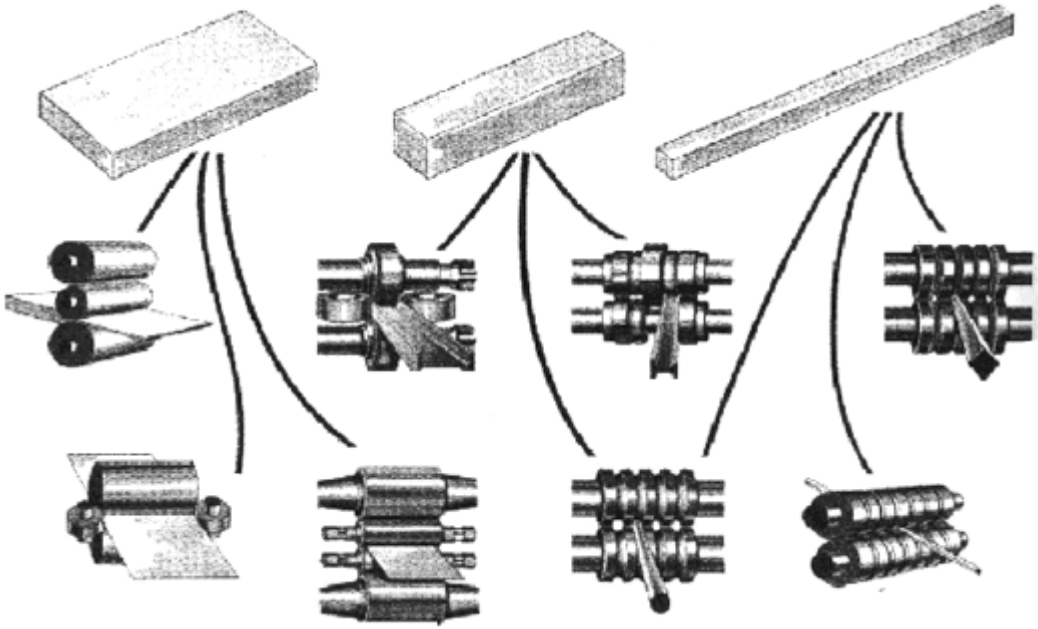


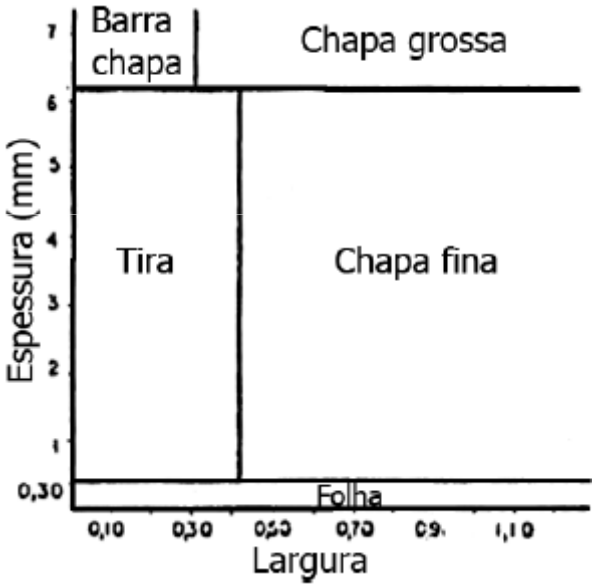
## Trincas de quina

## Trinca Estrela

# Laminação






Barra
chapa
Chapa grossa
Tira
Chapa fina
Folha
Espessura (mm)
7
6
5
4
3
2
1
0,30
0,10
0,30
0,50
0,70
0,9
1,10
Largura

# Laminação

**Defeitos nos Produtos Laminados**

Os produtos laminados podem apresentar defeitos que geralmente são originados na fabricação do próprio lingote. Os defeitos mais comuns dos produtos laminados são:

**A)** **Vazios:** Podem ter origem de rechupes ou gases retidos durante a solidificação do lingote. Eles causam tanto defeito na superfície quanto enfraquecido da resistência mecânica do produto;

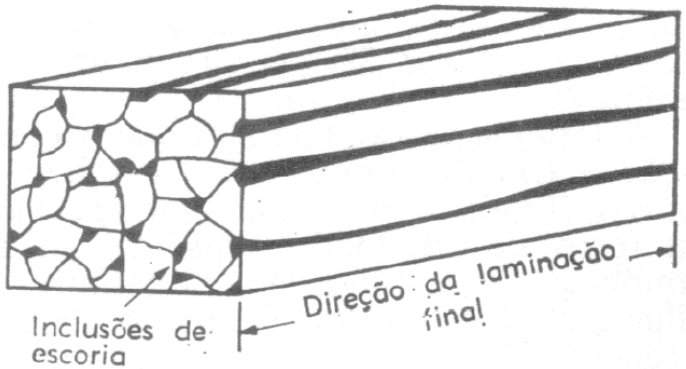
B) **Gotas frias:** São respingos de metal que se solidificam nas paredes da lingoteiras durante o vazamento. Posteriormente, eles se agregam ao lingote e permanecem no material até o produto acabado na forma de defeitos na superfície;

C) **Inclusões:** São partículas resultantes da combinação de elementos presentes na composição química do lingote (endógenas) , ou do desgaste de refratários (exógenas) e cuja presença pode tanto fragilizar o material durante a laminação quanto causar defeitos na superfície;

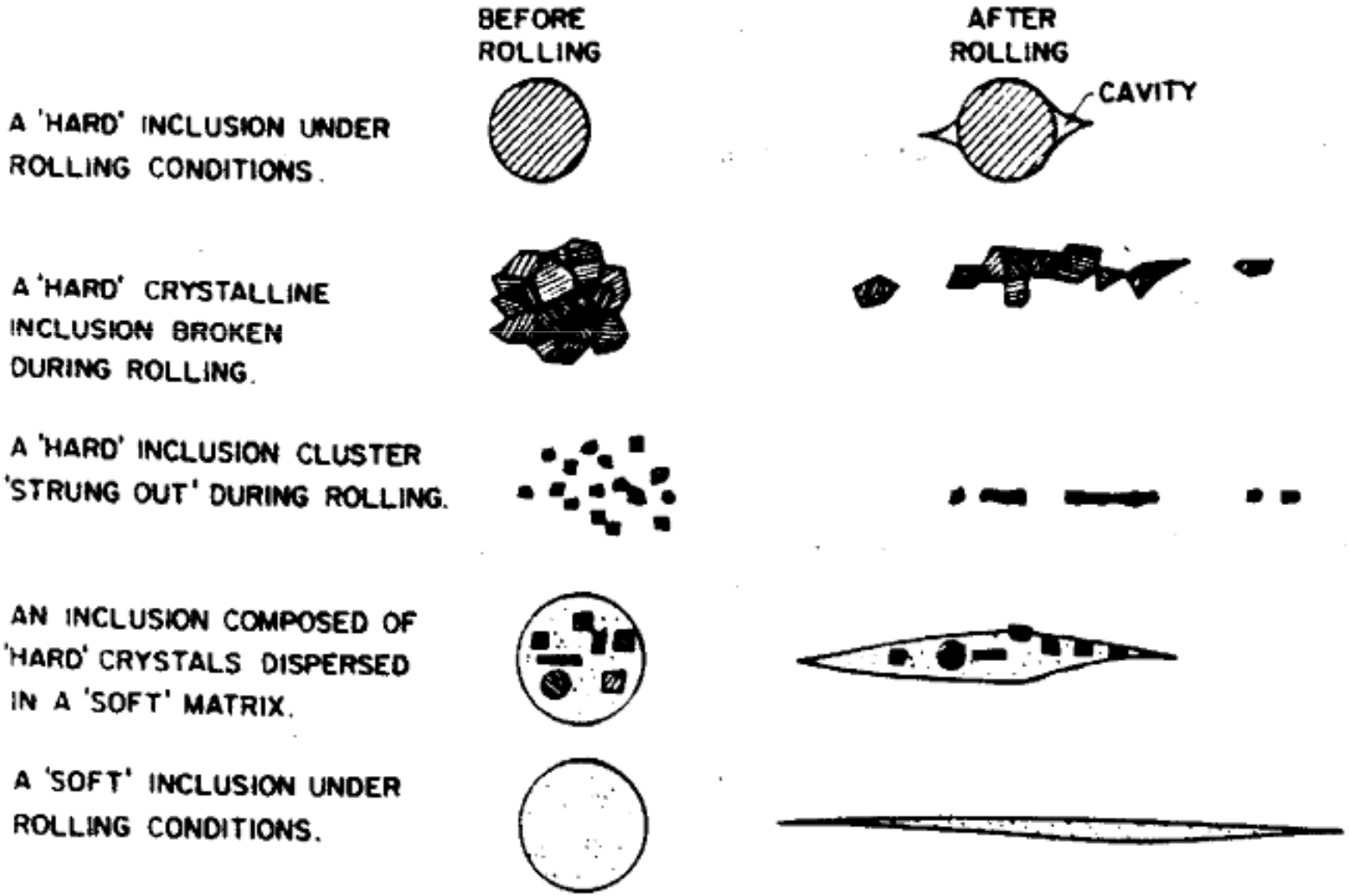
Como resultado do trabalho mecânico, as partículas de segunda fase, inclusões, vazios e segregações tendem a assumir um formato análogo à deformação da peça como um todo.

Se as partículas e inclusões são dúcteis e mais macias do que a matriz, assumem forma alongada.

**Representação esquemática de alongamento de inclusões**



# Representação esquemática da morfologia das inclusões: antes e depois da laminação



# Classificação das inclusões não metálicas:

**Classification of non-metallic inclusions**

Non-metallic inclusions

oxides (simple — FeO, MnO, $Cr_2O_3$, $SiO_2$, $Al_2O_3$, $TiO_2$ and others; compound — $FeO{\cdot}Fe_2O_3$, $FeO{\cdot}Al_2O_3$, $FeO{\cdot}Cr_2O_3$, $MgO{\cdot}Al_2O_3$, $2FeO{\cdot}SiO_2$ and others;

sulfides (simple — FeS, MnS, $Al_2S_3$, CaS, MgS, $Zr_2S_3$ and others; compound — FeS·FeO, MnS·MnO and others);

nitrides (simple — ZrN, TiN, AlN, CeN and others; compound — Nb(C, N), V(c, N) and others), which can be found in alloyed steel and has strong nitride-generative elements in its content: titanium, aluminium, vanadium, cerium and others;

phosphides ($Fe_3P$, $Fe_2P$ and others)

The majority of inclusions in metals are oxides and sulfides since the content of phosphorus is very small. Usually nitrides are present in special steels that contain an element with a high affinity to nitrogen.

By mineralogical content, oxygen inclusions divide into the following main groups:

Free oxides — FeO, MnO, $Cr_2O_3$, $SiO_2$ (quartz), $Al_2O_3$ (corundum) and others

Spinels — compound oxides formed by bi and trivalent elements

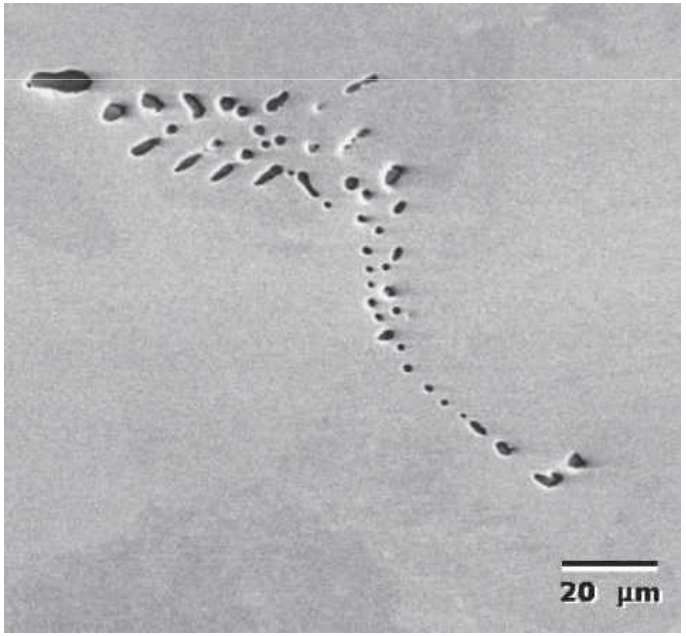
Ferrites, chromites and aluminates are in this group.

silicates, which are present in steel like a glass formed with pure $SiO_2$ or $SiO_2$ with admixture of iron, manganese, chromium, aluminium and tungsten oxides and also crystalline silicates. Silicates are the biggest group among non-metallic inclusions. In liquid steel non-metallic inclusions are in solid or liquid condition. It depends on the melting temperature.

# Fonte das macro-inclusões em lingotes

| Source | Approximate Frequency of Occurrence, pct |
|---|---|
| Attack or fluxing of refractories | 58 |
| High-alumina refractories | 15 |
| Deoxidation products | 15 |
| Slag | 8 |
| Slag + deoxidation products | 4 |

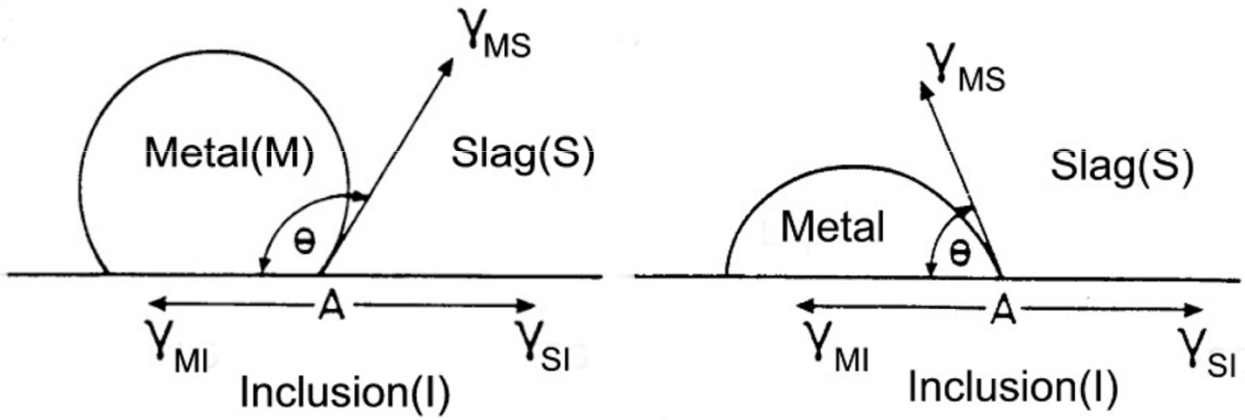
Melhoria dos aços (limpeza) decorrente de processo anteriores de metalurgia secundária




Inclusão típica de sulfeto (MnS) em um lingote

# Inclusões e energia de superfície:

O ângulo de contato é o resultado da tensão interfacial ou balanço da energia de superfície – As inclusões serão mais estáveis se o ângulo de contato for inferior a 90º . Note que para o óxido de titânio ($TiO_2$), há maior molhabilidade entre o óxido e o metal, tornando mais difícil sua remoção.




| Material | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $TiO_2$ | $ZrO_2$ | MgO | Graphite | TiN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Angle (θ) | 135 | 115 | 84 | 122 | 125 | 120 | 132 |

# Flotação de inclusões

Balanço de forças: gravitacionais e empuxo

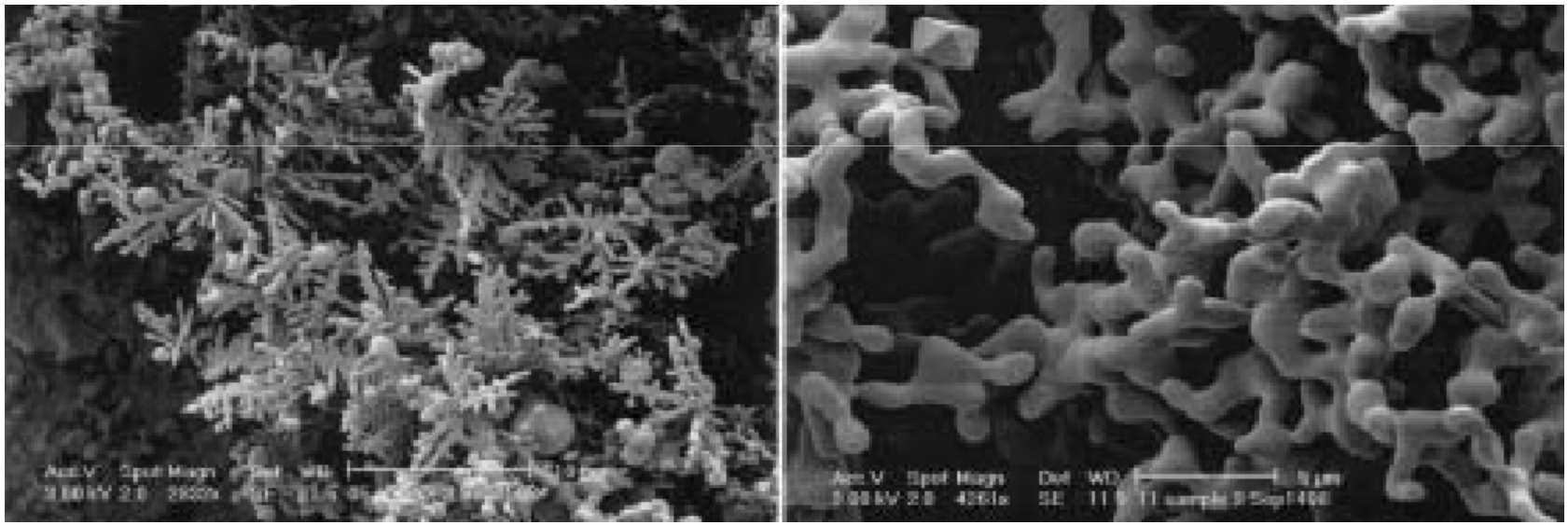
- Diferença entre densidades: metal – inclusão;
- Tamanho é importante: fenômenos de aglomeração e crescimento;

- Taxa: Lei de Stoke's

$$v = \frac{2 * g * (\rho_s - \rho_l) * r^2}{9 * \eta}$$

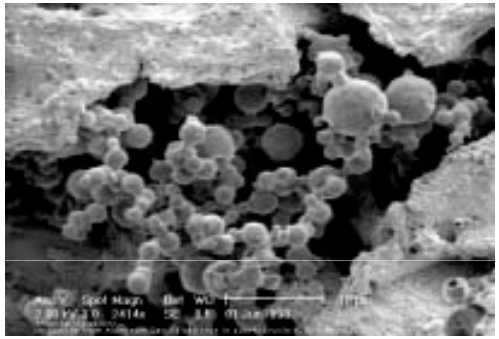
Algumas inclusões, por exemplo inclusões frágeis, fragmentam com orientação paralela à direção principal de trabalho (por exemplo, $Al_2O_3$). Caso as inclusões sejam mais duras e mais resistentes do que a matriz, esta não se deformarão (por exemplo, $SiO_2$).

Inclusões endógenas: Produtos da desoxidação ou precipitações ocorridas durante a solidificação do aço

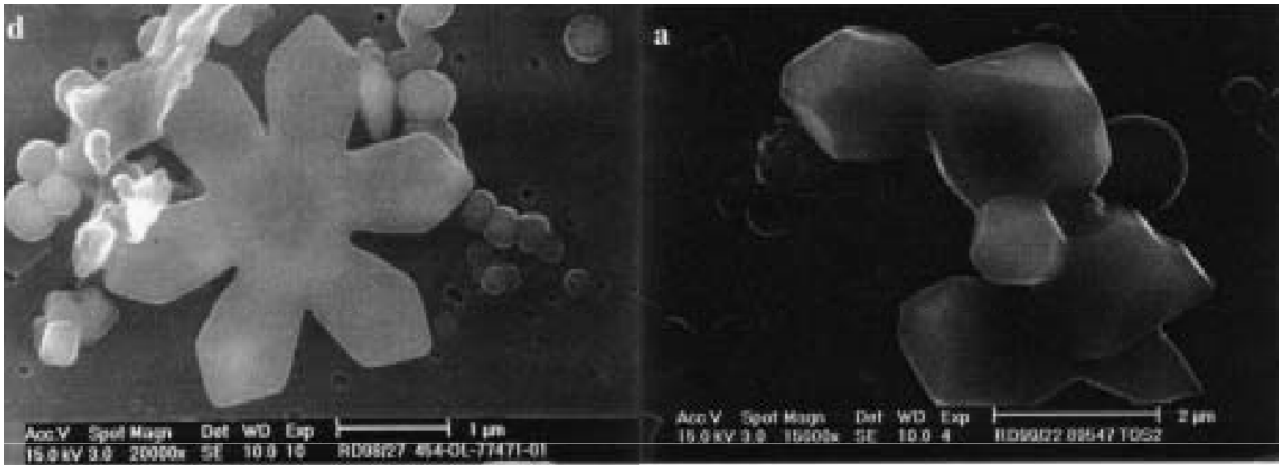


Dendritic and clustered alumina inclusions (left), and coral-like alumina inclusions (right) formed during deoxidation of pure iron

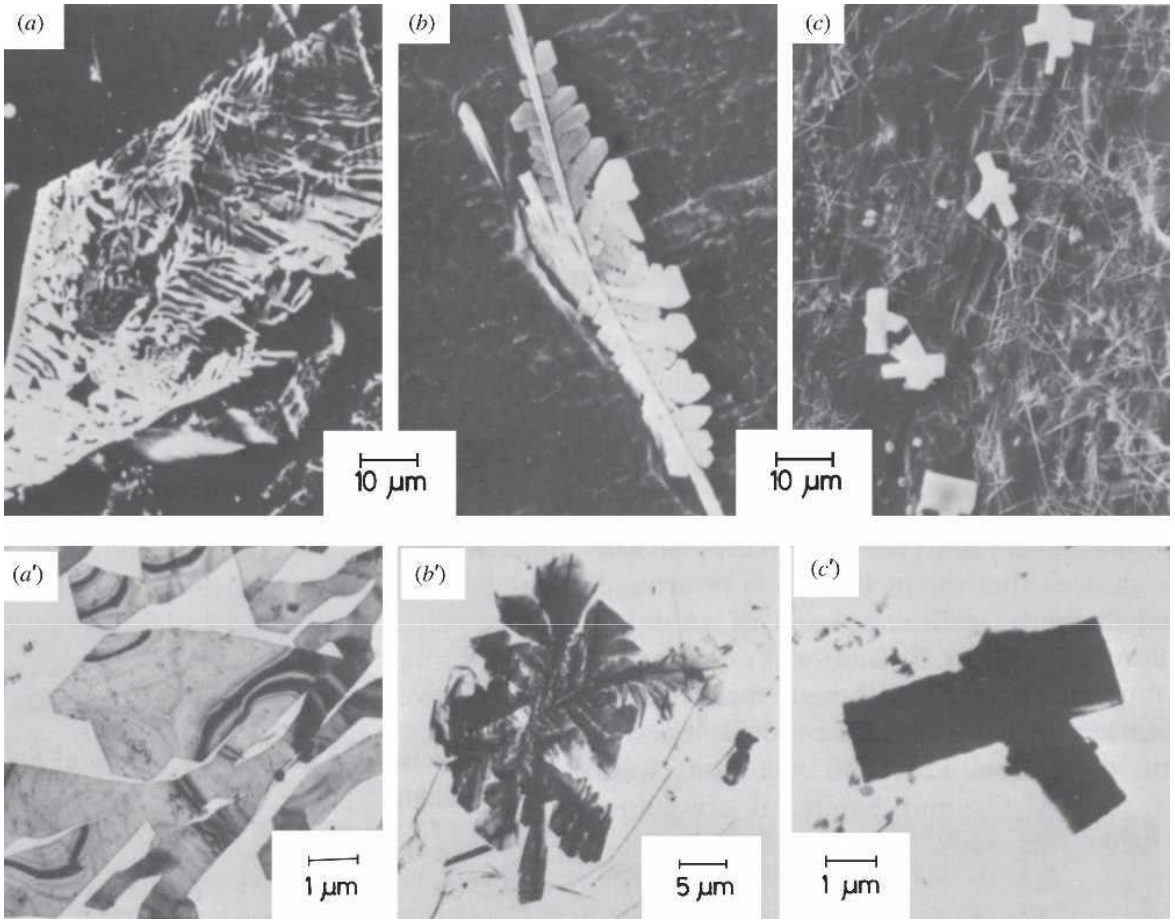
# Produtos da desoxidação



Alumina cluster during deoxidation of low carbon steel by aluminum



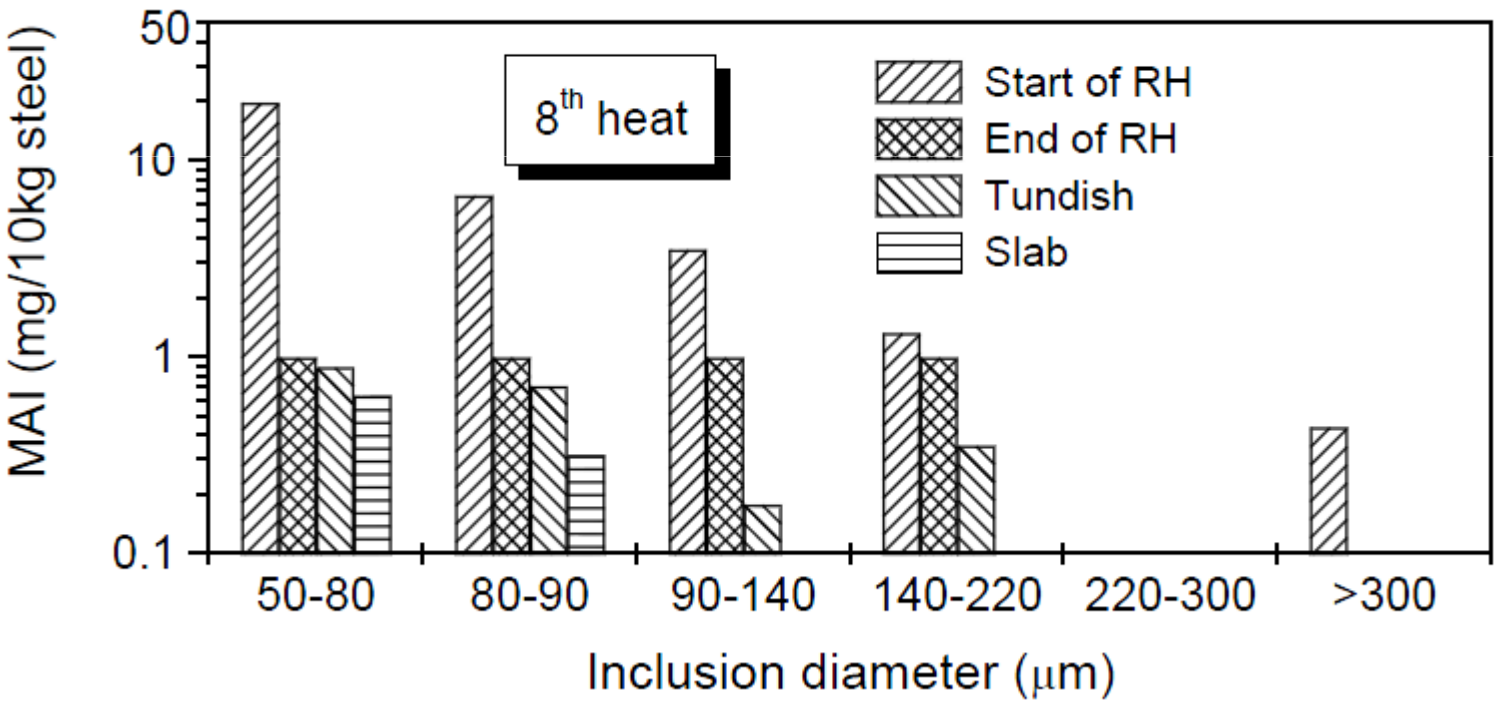

Alumina inclusions formed during the deoxidation of LCAK steel (left: flower-like plate alumina; right: aggregation of small polyhedral particles).



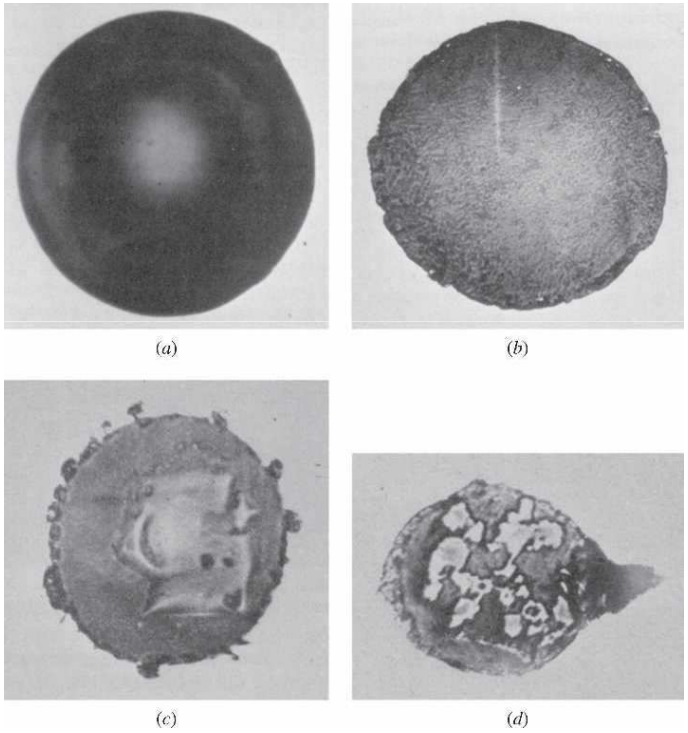

(a) plate-like, (b) feathery, (c) branched rod-like, and formed both during and after solidification of the matrix.

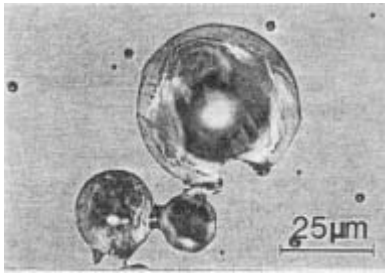
SEMs and TEMs of ALN inclusions in high Al ingot ((a)(a') plate-like, (b) (b') feathery, (c)(c') branched rod-like).

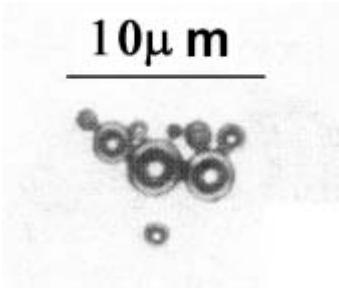
# Distribuição do tamanho das inclusões : Lingotamento contínuo



# Inclusões de escórias e óxidos



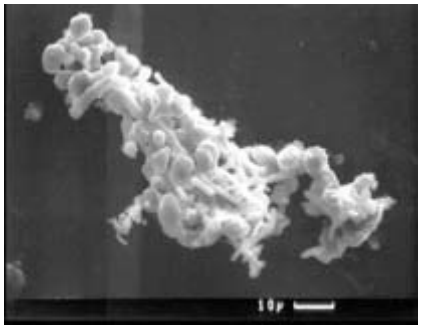




Agglomeration of round silica inclusions

Typical slag inclusions in steel ingot:
(a) calcium-alumina silicate;
(b) either alumina silicate or a mixed oxide phase;
(c) crystals of alumina;
on the surface of a globular slag inclusion;
(d) globular inclusions of aluminosilicate with impregnated magnesium spinel.

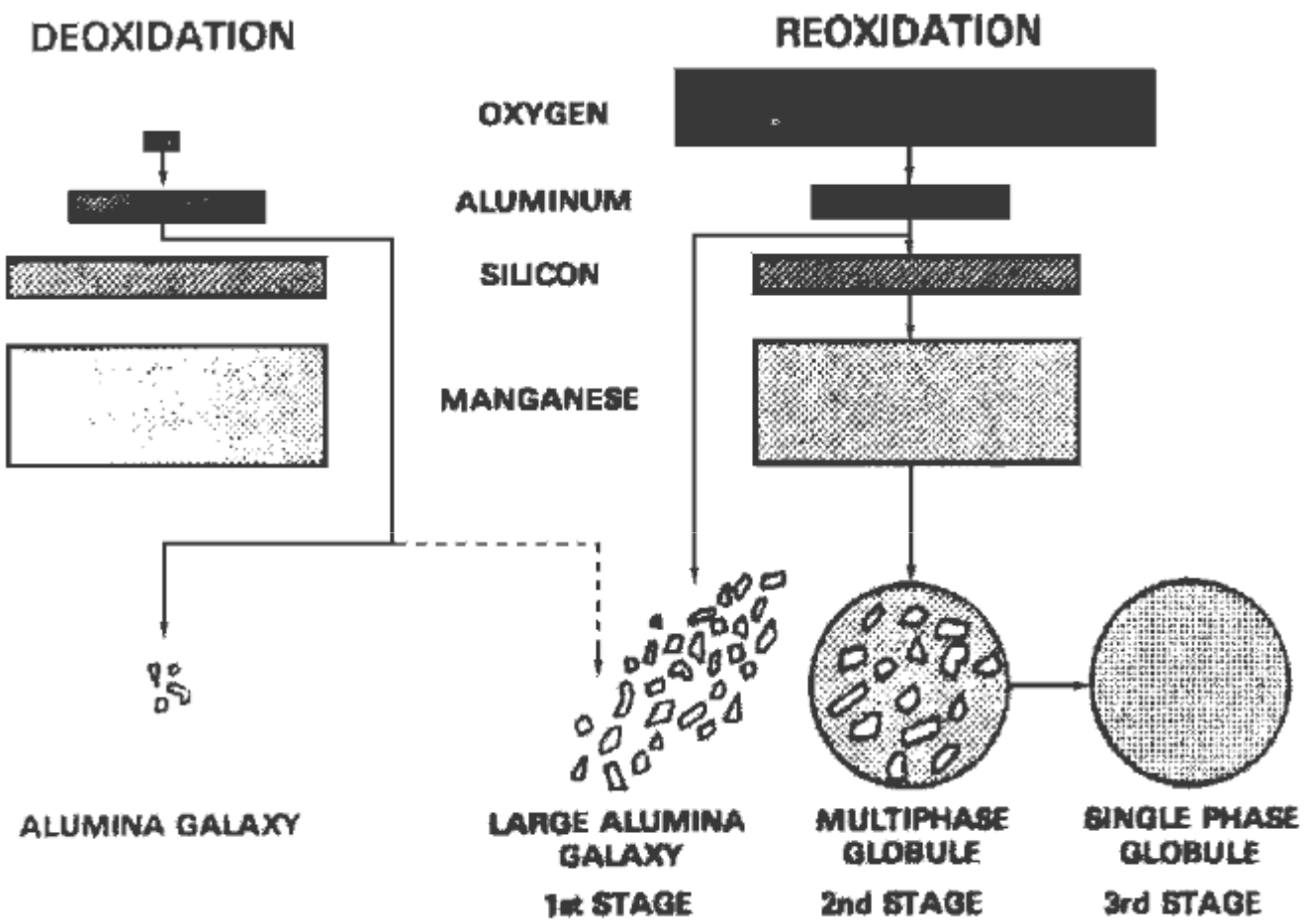
# Inclusões exógenas proveniente da re-oxidação



Inclusion clusters in LCAK steel

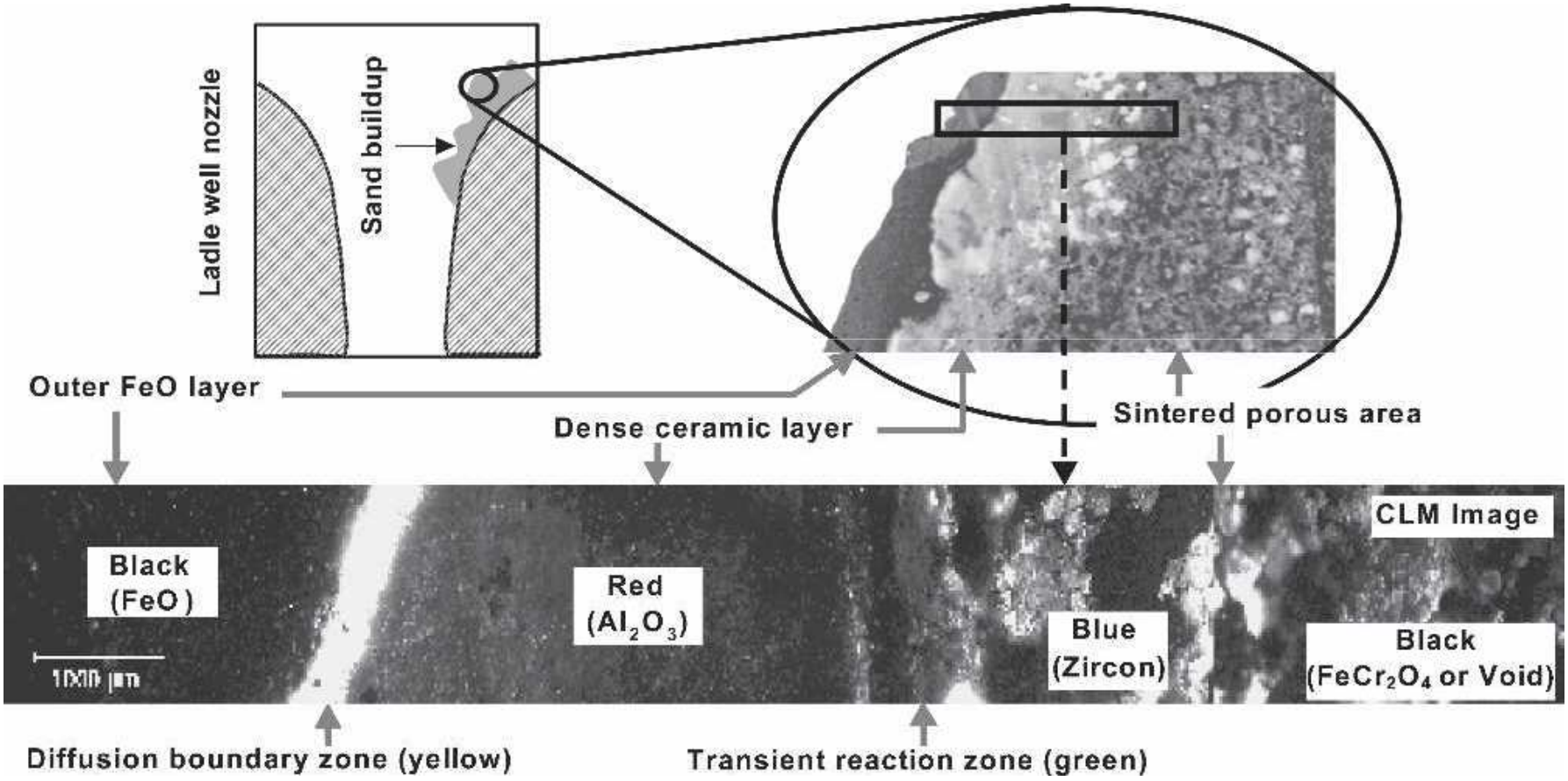
$$SiO_2/FeO/MnO+[Al] \rightarrow [Si]/[Fe]/[Mn]+Al_2O_3.$$

- A forma mais comum de grandes macro-inclusões decorrente de processos de re-oxidação encontrado em aço, como os cluster de alumina são mostrados na Figura acima. O ar é a fonte mais comum de oxigênio para a re-oxidação que pode ocorrer nos seguintes aspectos:
- aço fundido no distribuidor se mistura com o ar da sua superfície superior no início do vazamento devido à forte turbulência. Filmes de óxido na superfície do líquido que flui são misturados no líquido, formando partículas de óxido;
- Ar é sugado para o aço fundido na superfície superior ( panela ou distribuidor) e transferido durante o lingotamento.




The formation of inclusions in steels deoxidized with aluminum (based on Hilty)

# Defeitos decorrente de areia de vedação:

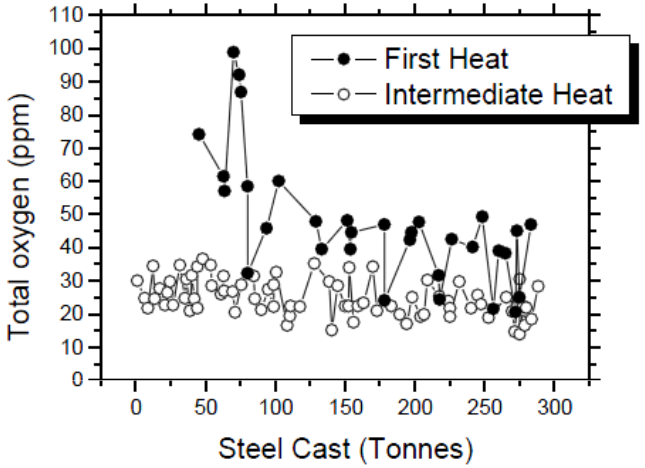


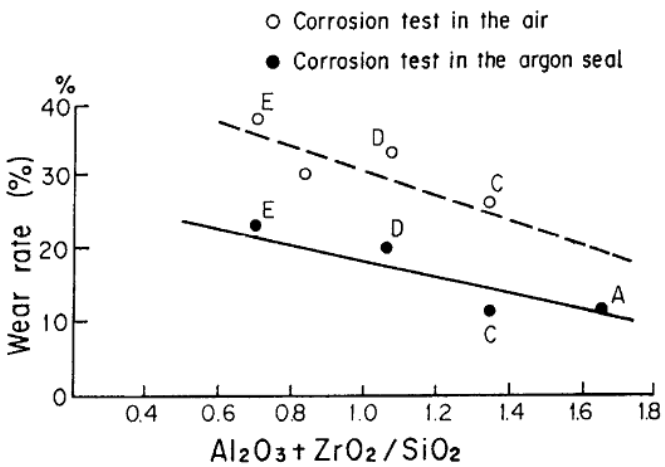
# Oxigênio total (ppm): aços baixo carbono (Al) – Várias usinas .

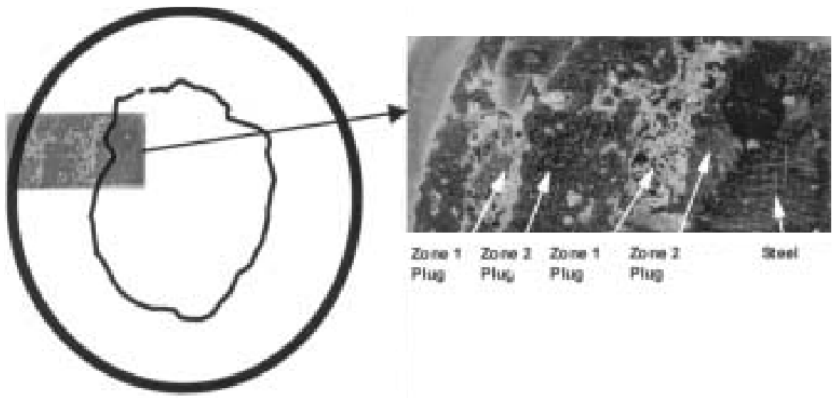
| Steel Works | Refining | Ladle | Tundish | Mold | Slab | Year | Ref. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *America* | | | | | | | |
| Inland No.4 BOF shop | LMF | 30 | 24 | 21 | 15 | 1990 | 104) |
| | RH-OB | 60-80 | 8-30 | | | 2003 | 192) |
| Armco Steel, Middletown Works | | 60-105 | 15-40<br>mean 25 | | 16.9-23.8 | 1991 | 186) |
| Armco Steel, Ashland Works | | | 16.3 | | | 1993 | 193) |
| US Steel, Lorain Works | | | | | 13-17 | 1991 | 194) |
| National Steel, Great Lake | | | 25-50<br>mean 40 | 20-40 | <31-36 | 1991<br>1994<br>1995 | 186)<br>139)<br>195) |
| Some plant in North America | | 20-35 | | 20-30 | 10-15 | 1991 | 196) |
| Timken Steel, Harrison Plant | | | | 20-30 | | 1991 | 164) |
| Usiminas, Brazil | | | | | 20 (13*) | 1993 | 185) |
| Dofasco, Canada | | | 19 | | 13 | 1994 | 197, 198) |
| LTV Steel, Cleveland Works | | | 21-27 | | | 1995 | 199) |
| Sammi Atlas Inc., Atlas Stainless Steels | Gas stirring treatment | 36-45 | 30-38 | | | 1995 | 187) |
| Lukens Steel | | | 16-20 | | | 1995 | 66) |

# Aços limpos ....

- Pó (escória de cobertura);
- Distribuidor de elevada capacidade;
- Dispositivos de controle de fluxo de aço;
- Controle das transições: proteção de argônio, selos, técnicas anti- “clogging”.
- Refratário

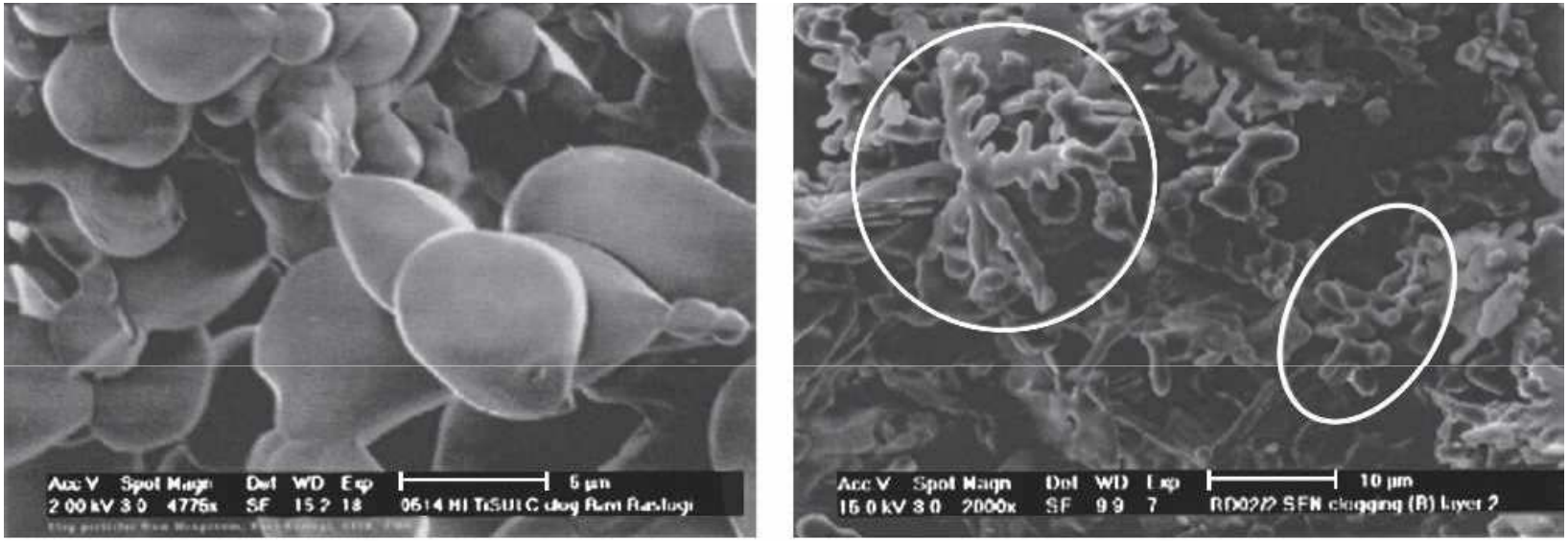



Effect of brick materials on wear rate (high manganese steel)

# “Clogging”



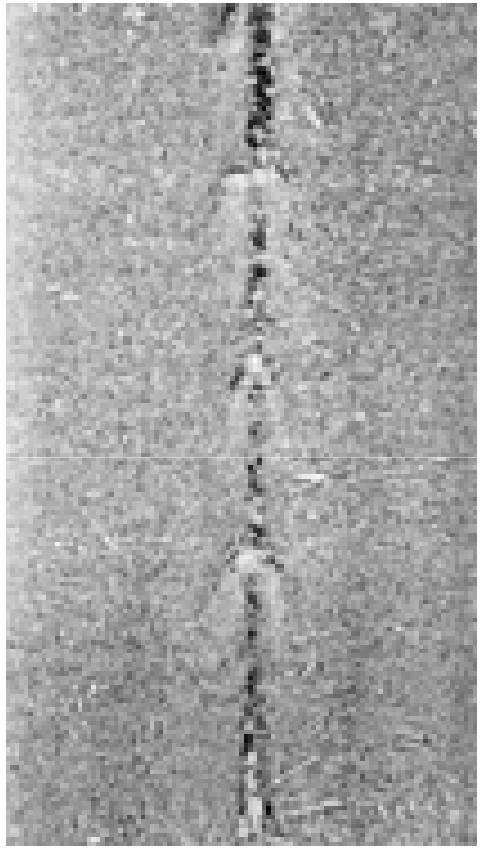

(a) (b)

“clogs” de alumina em uma válvula submersa usada em lingotamento de aços de baixo carbono acalmados ao alumínio.

a) Inclusão
b) “Cluster” dendrítico a na forma de plaquetas

D) Segregações:

- Acontecem pela concentração de alguns elementos nas partes mais quentes do lingote, as últimas a se solidificarem. Elas podem acarretar heterogeneidades nas propriedades, além de fragilização e enfraquecimento de seções dos produtos laminados.



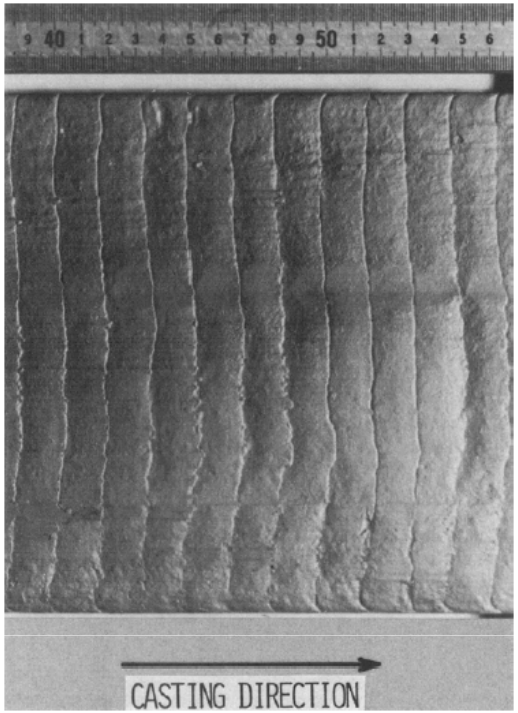
# E - Marcas de oscilação do molde (Lingotamento)

Função: fazer com que o molde desloque-se para baixo mais rápido que o lingote Fornecer uma estripagem negativa (um "*negative strip time tn*") Se houver qualquer colamento ou aderência da casca sólida com o molde, **esta será descolada.** Se ocorrer a ruptura da mesma, haverá tempo para um posterior preenchimento.

$$t_{n_3} = \frac{1}{\pi.f}.\arccos\left(\frac{V_{ling}}{\pi.f.C_M}\right)$$

Valores práticos $t_n$:
0,12 e 0,15s tarugos
0,05 e 0,30s placas.

**f: freqüência (cpm)**
**$C_M$: deslocamento (m)**
**$V_{ling}$: vel. Ling. (m/min)**



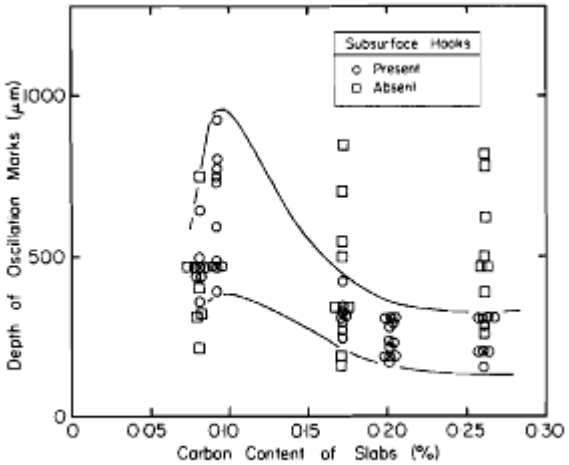
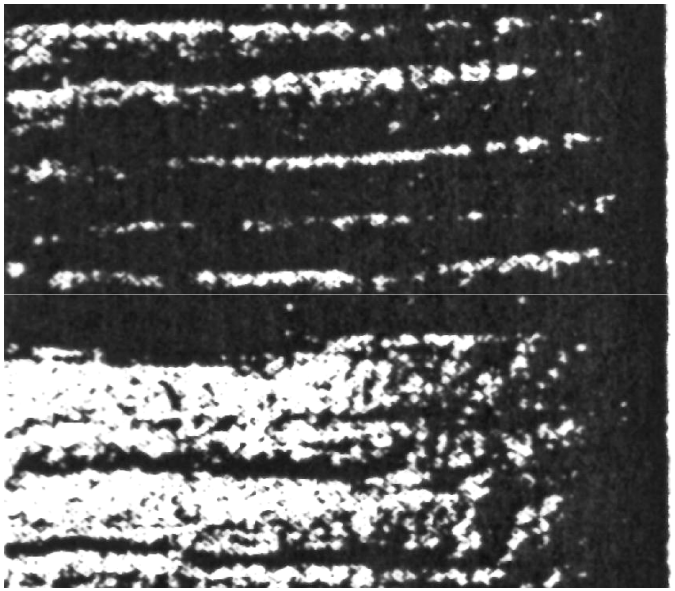



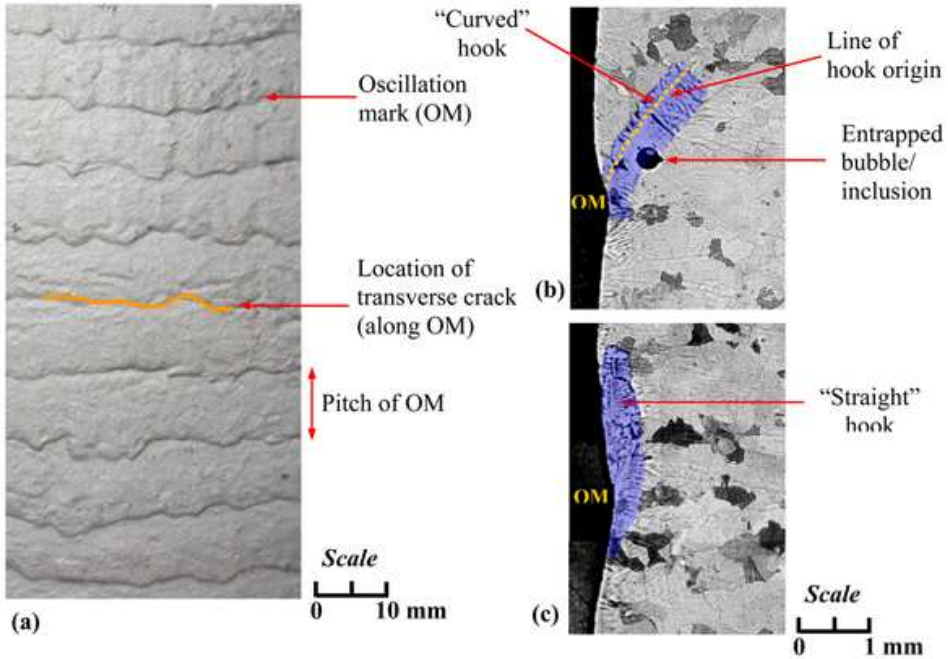

Fig. 6 — Influence of carbon content of the slabs on the depth of oscillation marks.

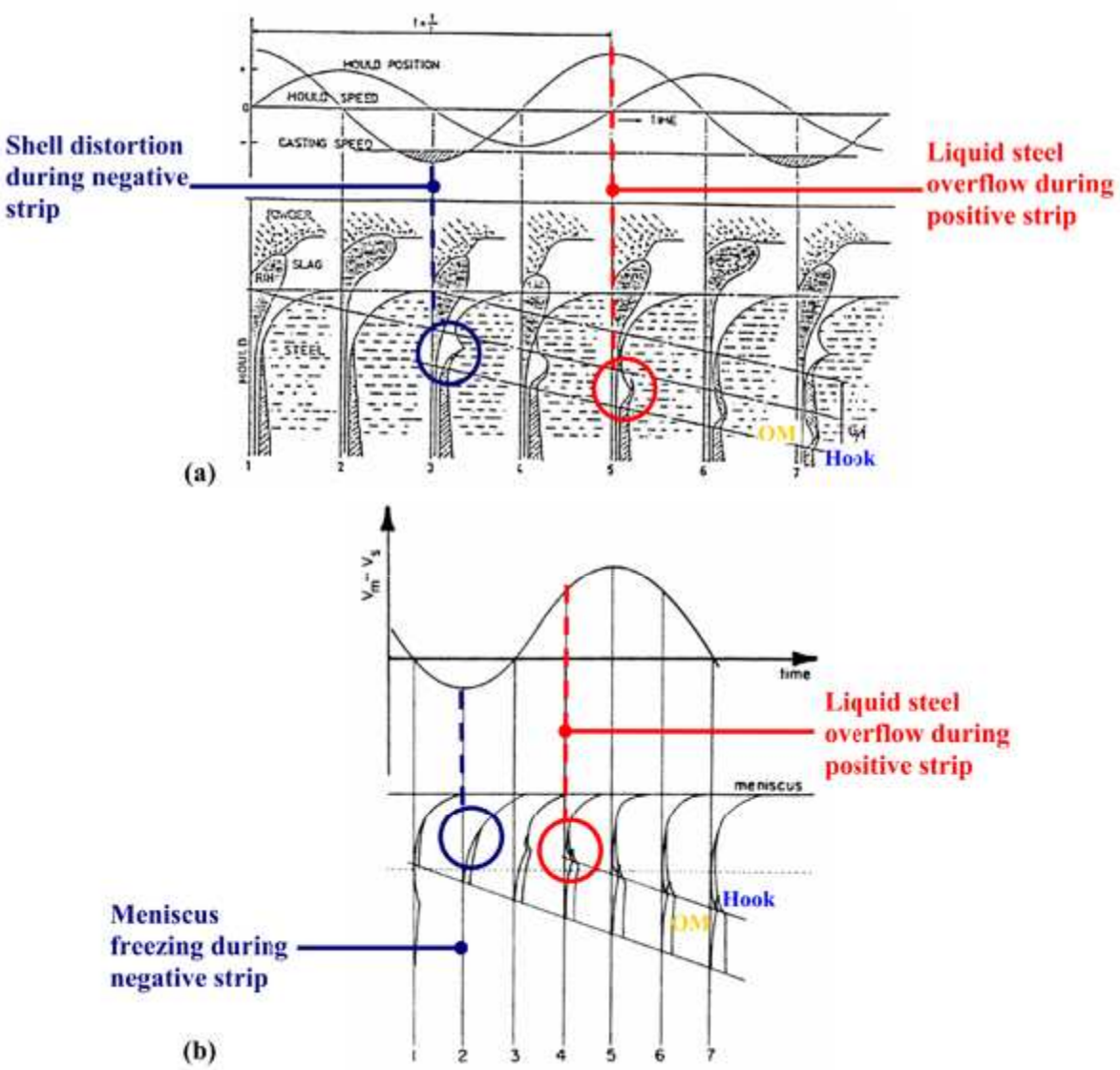
# Marcas de oscilação



Formação das marcas de oscilação durante o movimento senoidal do molde são:

**Amplitude de oscilação:** distância percorrida pelo molde de seu ponto mais alto até seu ponto mais baixo;
**Frequência de Oscilação:** Número de vezes que o molde oscila a cada minuto;
**Velocidade de Lingotamento:** Velocidade de movimentação do veio em processo de lingotamento.






Visualizing Hook and Oscillation Mark Formation in Continuously Cast Ultra-Low Carbon Steel Slabs
Joydeep Sengupta and Brian G. Thomas

# Seqüência da Solidificação:

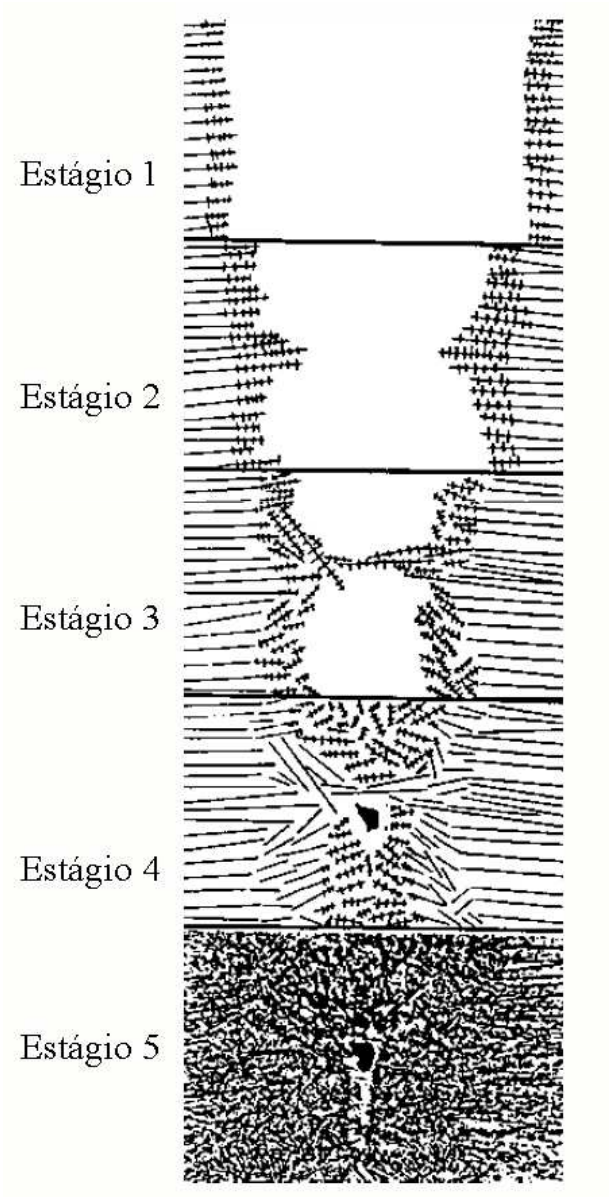
-Estágio 1: crescimento uniforme dendritas;

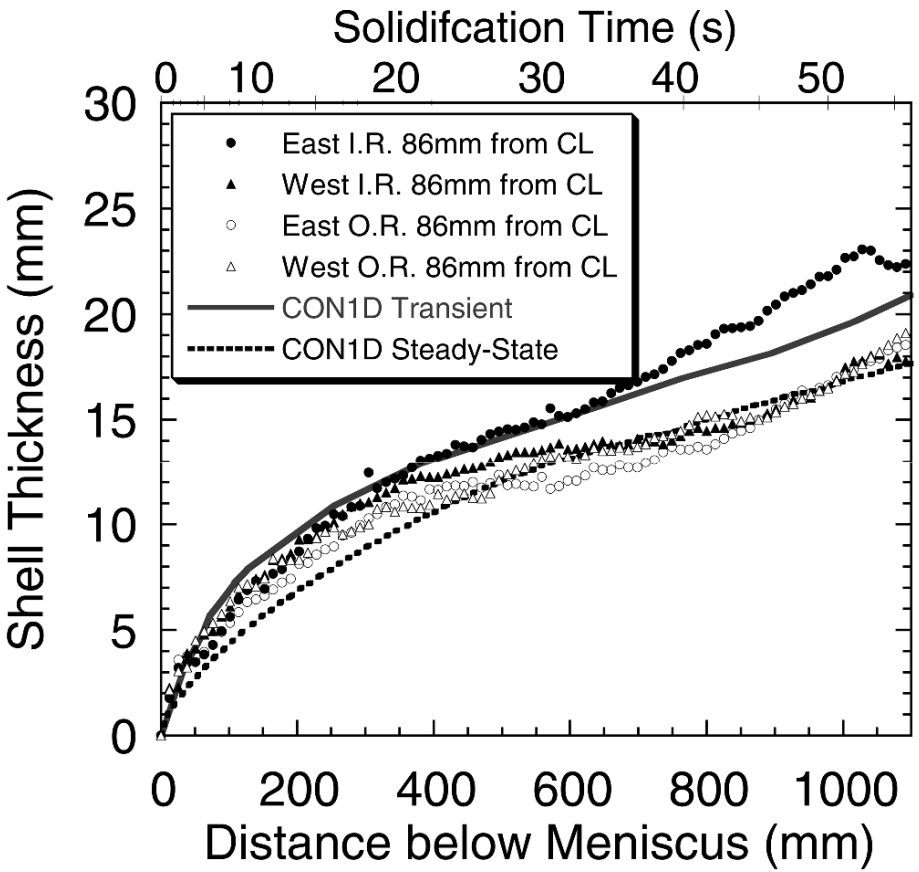
- Estágio 2: crescimento dendrítico colunar torna-se instável devido movimentação;

- Estágio 3: em algumas regiões o crescimento dendrítico pode produzir pontes;

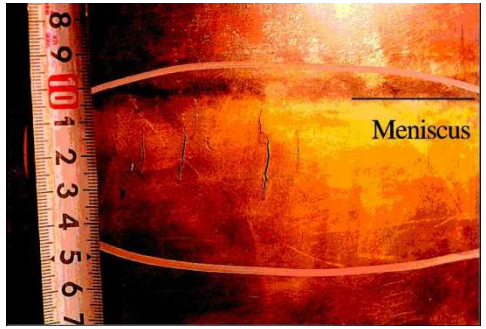
- Estágio 4: formação de segregação e porosidade centrais para cada região isolada;

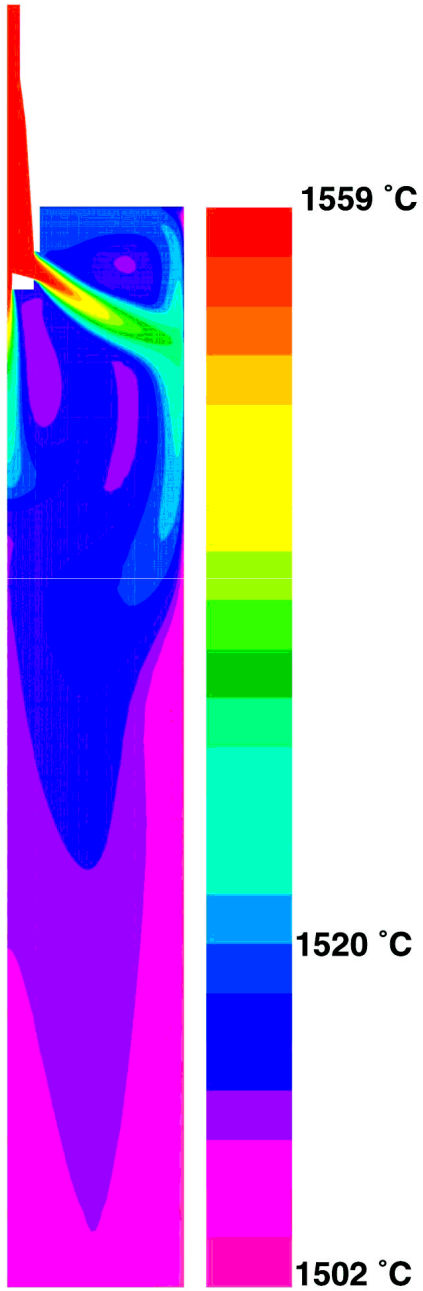
- Estágio 5: estrutura final



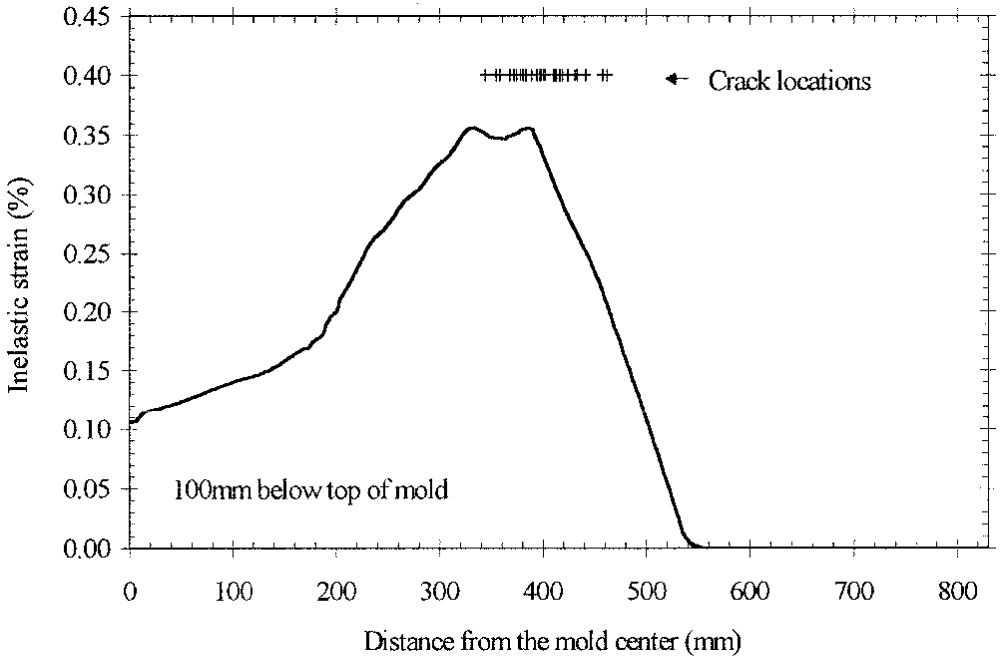


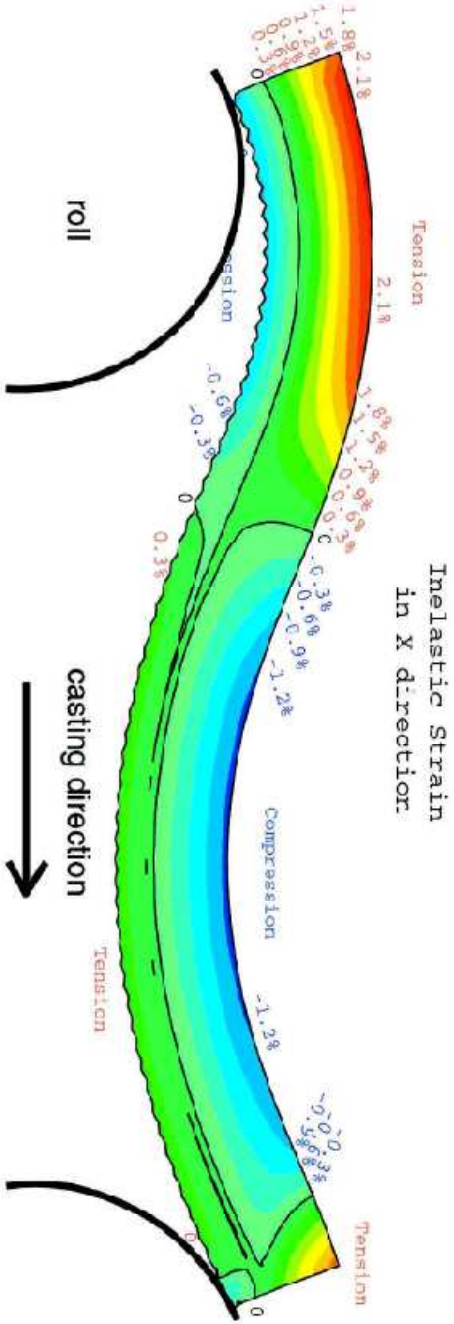

Shell thickness along the narrow face

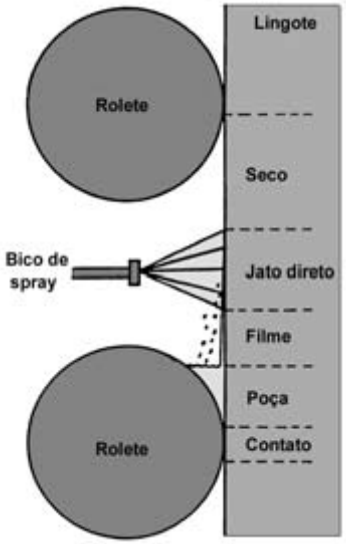


# Solidificação: tensões e defeitos



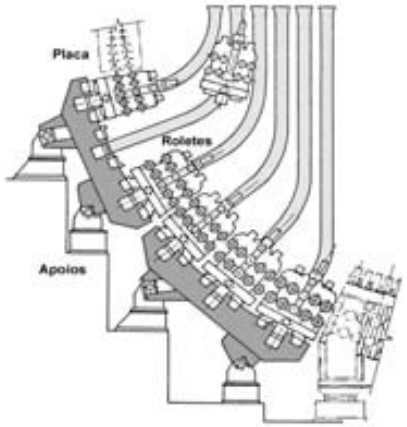



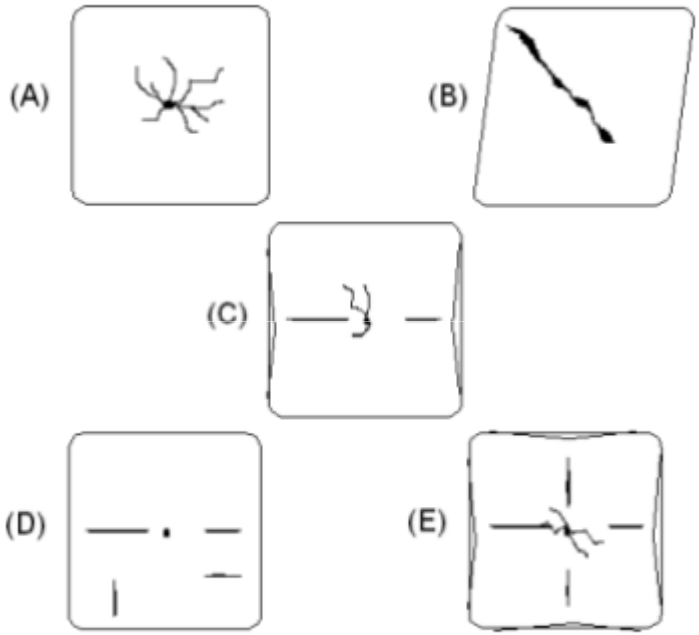
# A importância do secundário na solidificação:

⇒ Qualidade do aço: fortemente determinada pelas condições de resfriamento e solidificação da casca sólida que contêm o líquido abaixo do molde;
⇒ Oscilações de tensão e temperatura na casca: podem produzir trincas internas e externas, e estas determinarão a redução da qualidade final do aço;
⇒ Pressão metalostática do aço líquido: causa deformações na superfície do lingote, na passagem entre os rolos guias abaixo do molde até o desempeno;
⇒ Caso ultrapasse o limite de tensão suportada pelo aço, ocorrerá a formação de trincas, além de abaulamento do lingote;
⇒ Resistência mecânica e a ductilidade do aço: caem muito rapidamente para temperaturas elevadas, grandes deformações ocorrem e trincas;
⇒ Deformações que excedam a faixa de 0,2 a 0,4%, para a interface sólido/líquido correspondem a deformações suficientes para gerar uma trinca;

**4 parâmetros exercem influência no seu comportamento:**
**- velocidade de lingotamento;**
**- quantidade e tipo de roletes;**
**- vazão de água nos *sprays*;**
**- comprimento das zonas de *sprays*.**



# Defeitos Internos: tarugos




Tipos de trincas observadas em tarugos do LC:

**(A)** Trinca em forma de estrela; usualmente decorrente de interação do cobre (molde) com a pele/camada de metal durante a solidificação.

**(B)** Trinca diagonal;

**(C)** Trinca de espremedura;

**(D)** Trincas térmicas e

**(E)** Trincas de depressão

# Origem e tipo de macro-inclusões em usina fabricante de tarugos de aço ao carbono e acalmados ao silício e manganês.

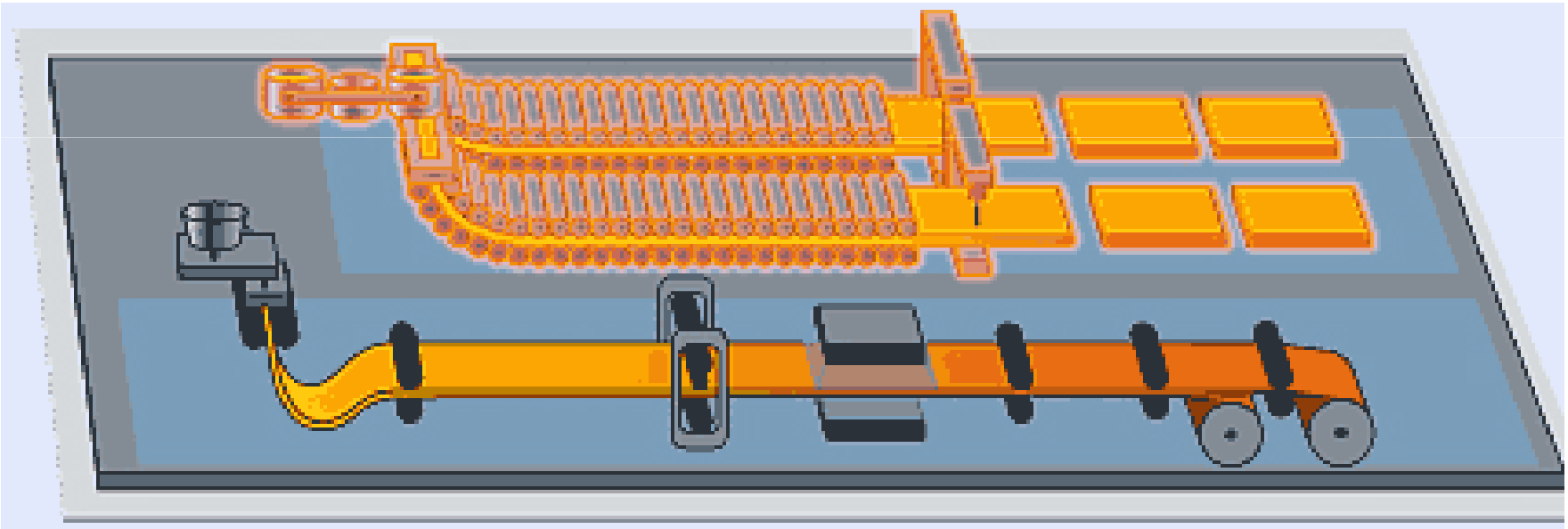
| | | | |
|---|---|---|---|
| Reoxidação | • Estrangulamento da válvula da panela.<br>• Tipo de jato.<br>• Zona de impacto do jato no distribuidor.<br>• Zona de impacto do jato no molde. | Silicato de Manganês<br>Silicato de Manganês com Rosetas de Cristobalita | • Tubo cerâmico entre o distribuidor e a panela.<br>• Proteção com fluxante entre distribuidor e molde. |
| Revestimento do distribuidor | • Ataque da escória e dos aços com alta quantidade de Mn e relação Mn/Si elevada. | Silicato de Manganês<br>Silicato de Manganês com Rosetas de Cristobalita | • Qualidade da placa ácida.<br>• Uso de revestimento básico com elevada quantidade de Mn. |
| Escória do distribuidor | • Emulsificação<br>• Arraste por vórtice.<br>• Redução do nível do distribuidor. | Silicatos complexos com Mn, Al, Ca, Mg e Fe com ou sem precipitados | • Abertura direta.<br>• Controle automático de nível do distribuidor.<br>• Uso de barreiras no distribuidor. |
| Escória de Molde | • Válvula calibrada: desalinhada. | Alumino silicatos de Mn com cristais de alumina. | • Alinhamento da máquina.<br>• Adição de alumínio no molde. |
| | • Válvula Submersa: interação pó fluxante - válvula - aço | Silicatos com Mn, Ca, Al, Zr, K e Ti.<br>Precipitados de zircônio. | • Qualidade da válvula submersa.<br>• Variações lentas de nível. |

| Defeito | Causas | Fatores Influentes | Correção |
|---|---|---|---|
| **Trincas transversais superficiais** | Precipitação de AlN e temperaturas entre 700 e 900ºC | Composição do aço > 0,02% Al; > 1% Mn, Nb e V. | Ajustar a vazão dos sprays para sair da faixa de baixa ductilidade dos aços ($T_S$ acima de 1000ºC) |
| **Trincas longitudinais e no meio da face** | Resfriamento intenso na primeira zona de *sprays* e abaulamento (tensões) | Tensões internas junto à frente de solidificação,<br>Composição do aço (0,12% C e relação Mn/S),<br>Altas velocidades de lingotamento,<br>Larguras no caso de placas,<br>Superposição de jatos,<br>Alinhamento molde e rolo de pé. | Reduzir a vazão na primeira zona de *sprays* e monitorar o *abaulamento*,<br>Alinhar molde e roletes. |
| **Trincas em forma de estrela** | Abaulamento (tensões) | Velocidades de solidificação diferentes entre as faces | Reposicionar os roletes |
| **Trincas a meio caminho** | Abaulamento (tensões) | Altas velocidades de lingotamento<br>Aumento de S e P | Reposicionar os roletes,<br>Aumentar a vazão dos *sprays*,<br>Reduzir velocidade de lingotamento |
| **Trincas na linha central** | Abaulamento (tensões) | Altas velocidades de lingotamento | Reposicionar os roletes,<br>Aumentar a vazão dos *sprays*,<br>Reduzir velocidade de lingotamento |
| **Segregação central** | Abaulamento (tensões) | Altas velocidades de lingotamento<br>Altos superaquecimentos | Reposicionar os roletes,<br>Aumentar a vazão dos *sprays*,<br>Reduzir velocidade de lingotamento,<br>Reduzir o superaquecimento |

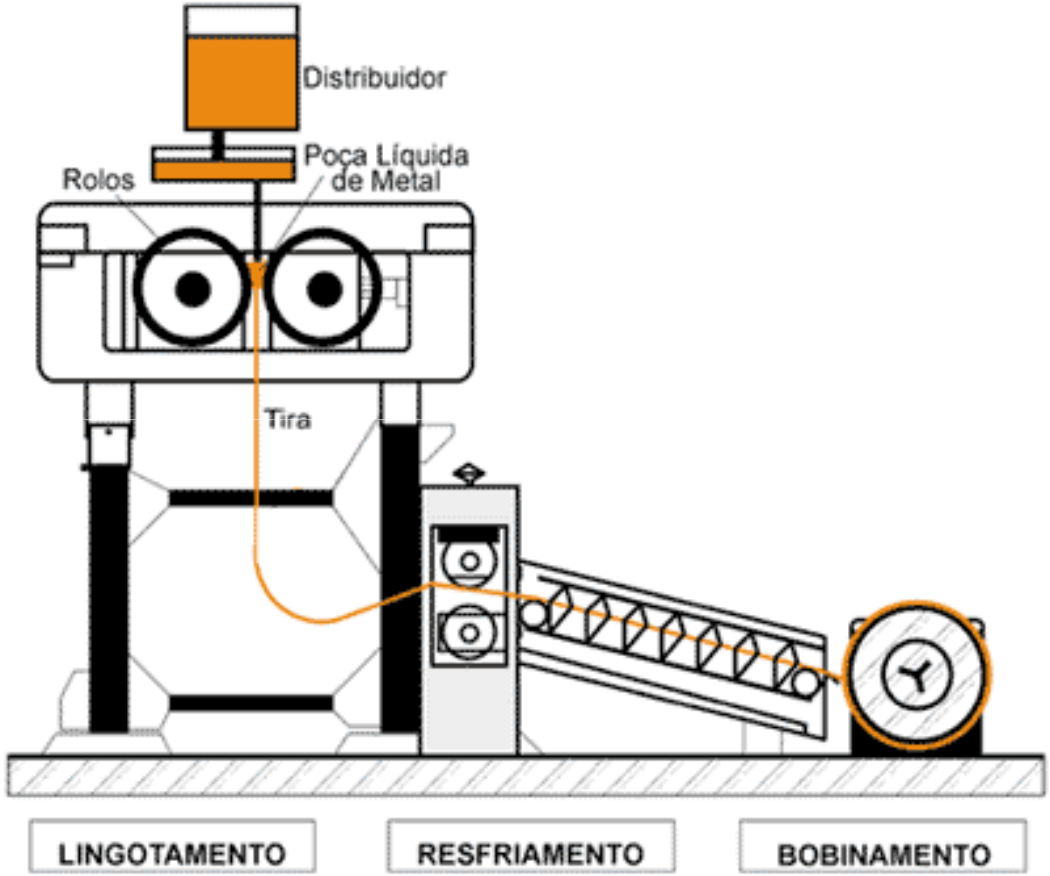
***Fonte: Prof. Carlos A. dos Santos: In:*** **LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS**

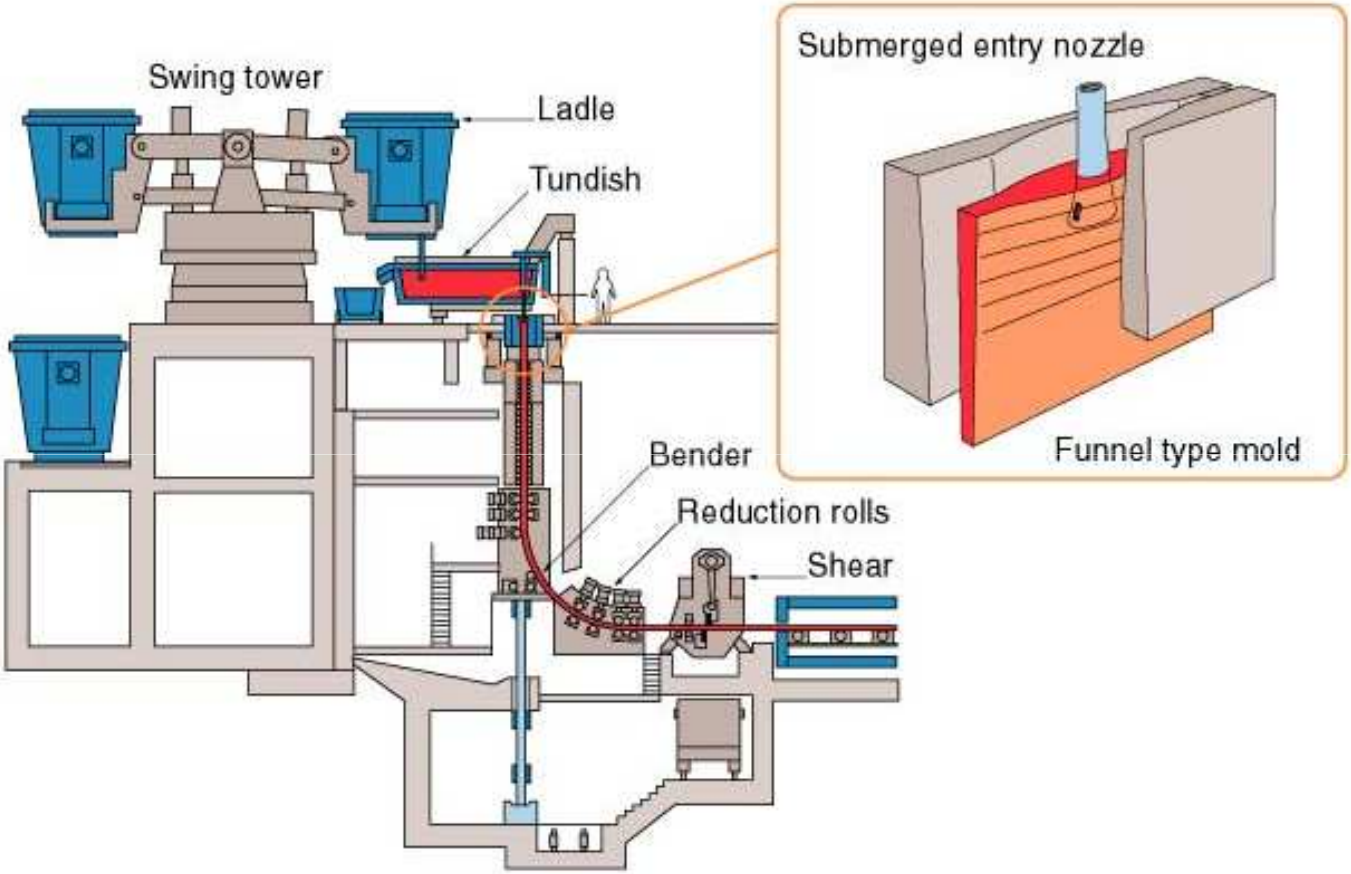
# Novas tecnologias:

# Lingotamento Contínuo de Placas Finas (Strip Casting)



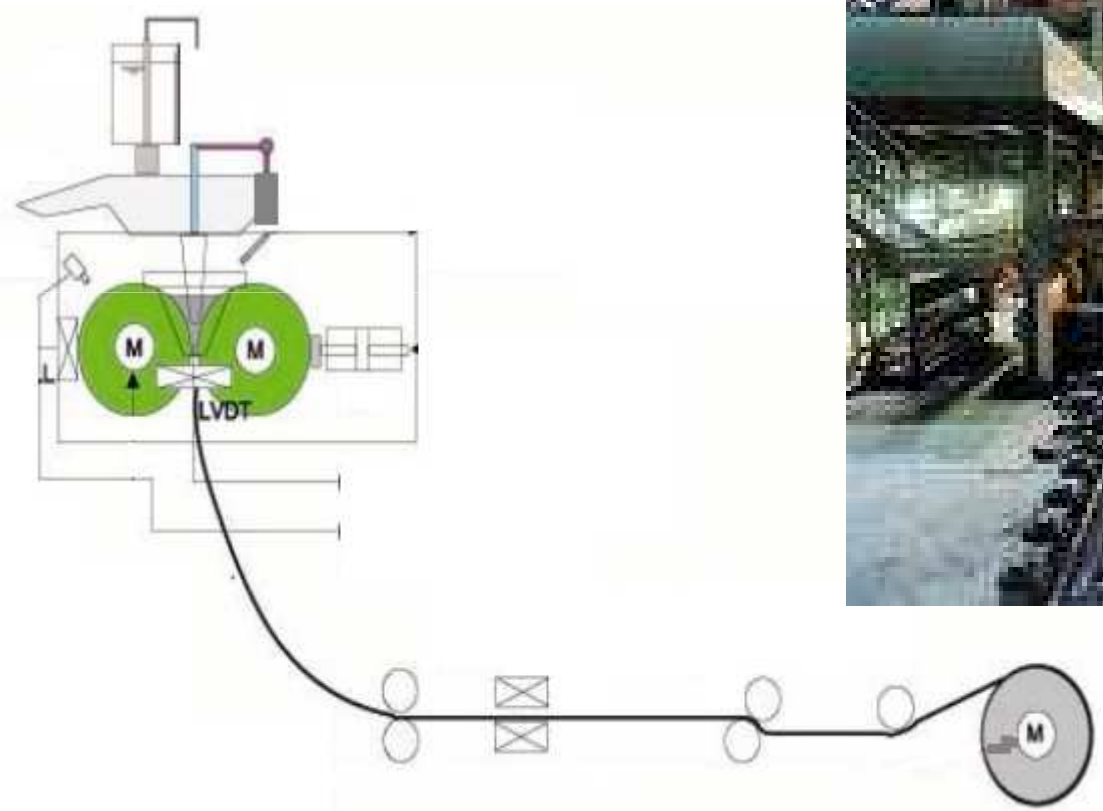
# Lingotamento Contínuo de Placas Finas (Strip Casting)



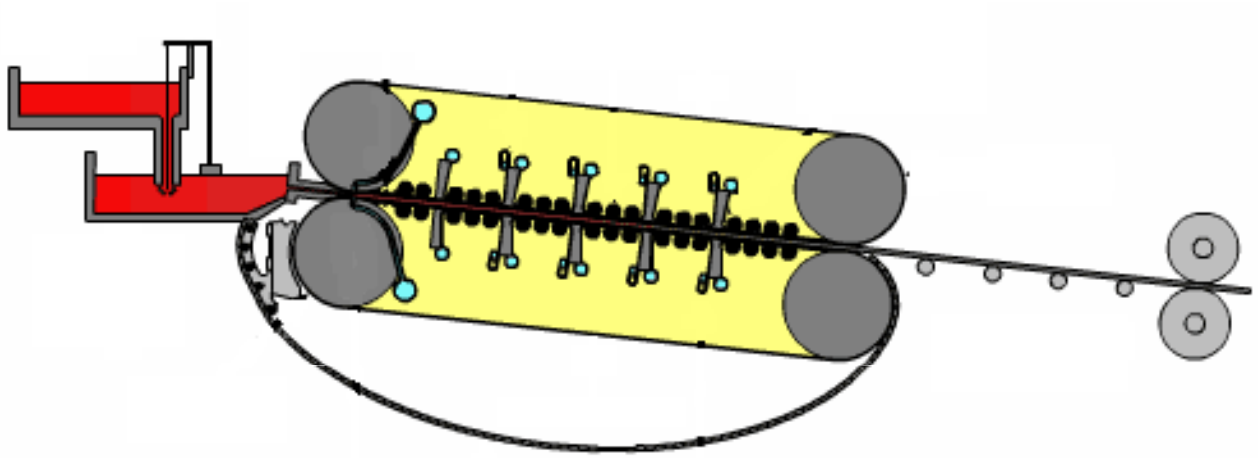


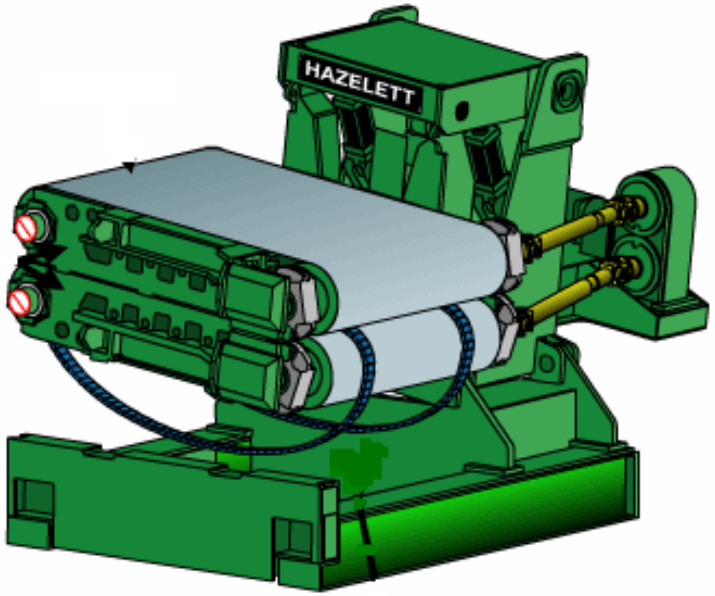

http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_6/6g_1_img.html

# Lingotamento Contínuo de Placas Finas (Strip Casting)



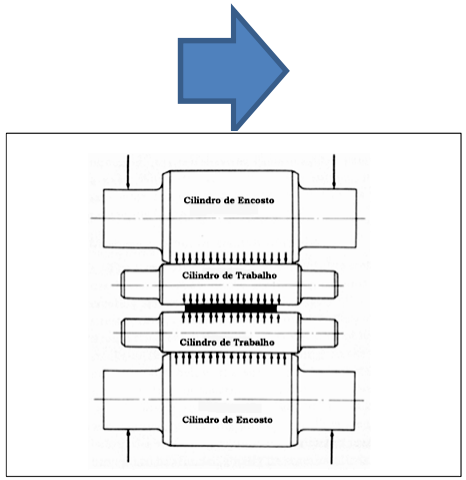
# Lingotamento Contínuo de Placas Finas (Strip Casting)





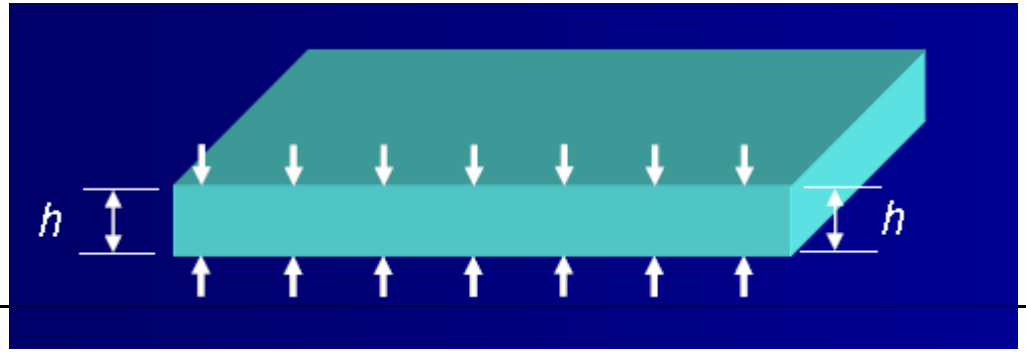
# Defeitos dos processamento durante laminação

- Trincas - Aparecem no próprio lingote ou durante as operações de redução que acontecem em temperaturas inadequadas;
- Dobras - São provenientes de reduções excessivas no qual um excesso de massa metálica ultrapassa os limites do canal e sofre recalque no passe seguinte;
- Não uniformidade dimensional

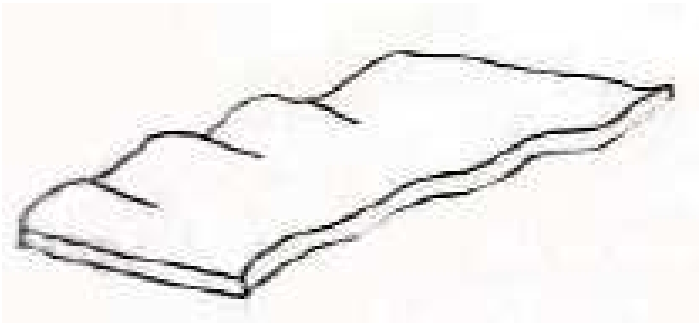


- Uniformidade dimensional

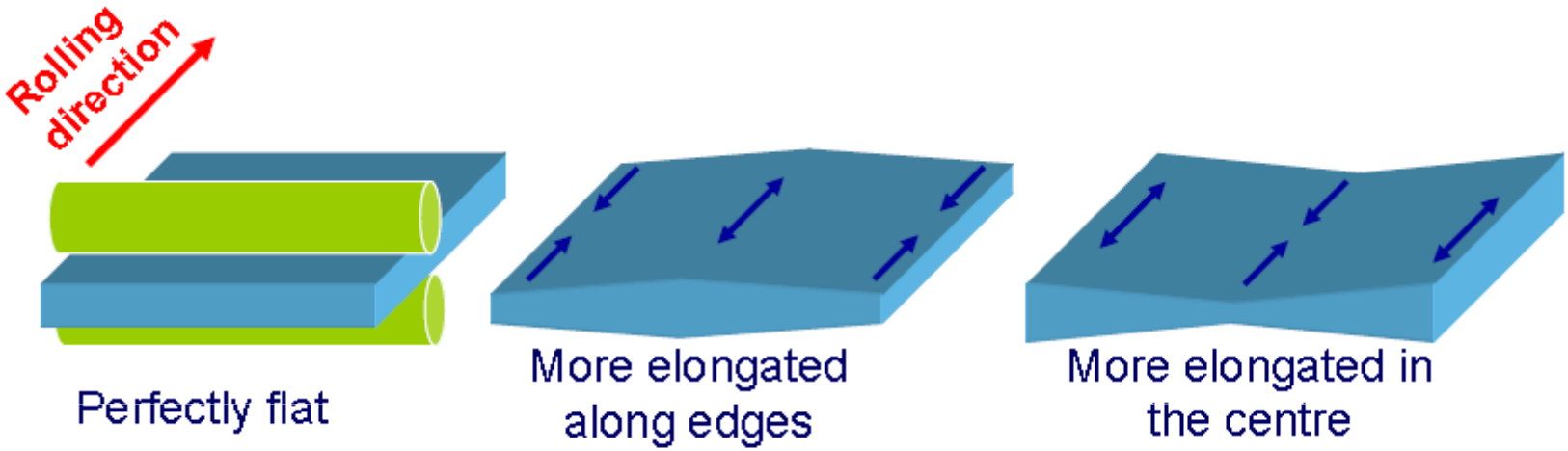
- A) Uniformidade de espessura:

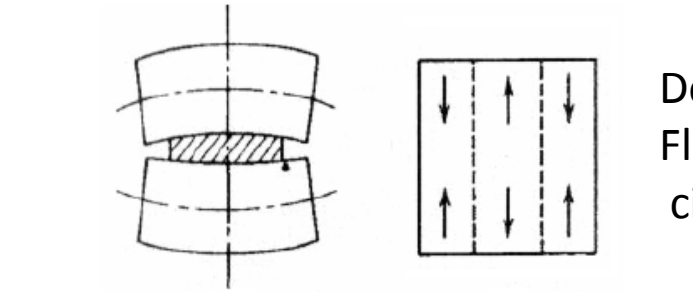



- B) “Flatness” deformação por flexão: difícil de ser medida

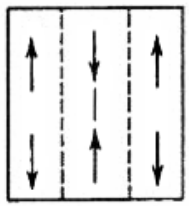


# Tensões ente cilindros e material

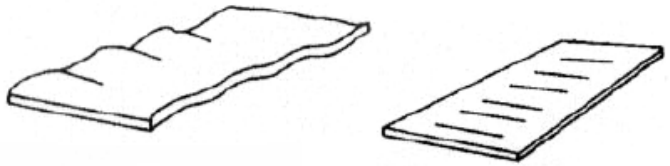


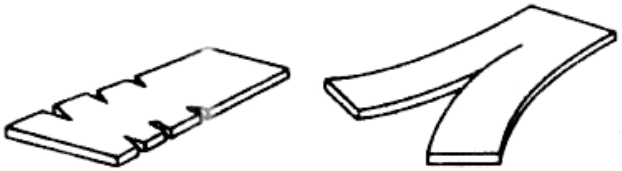



Defeitos: Flexão dos cilindros

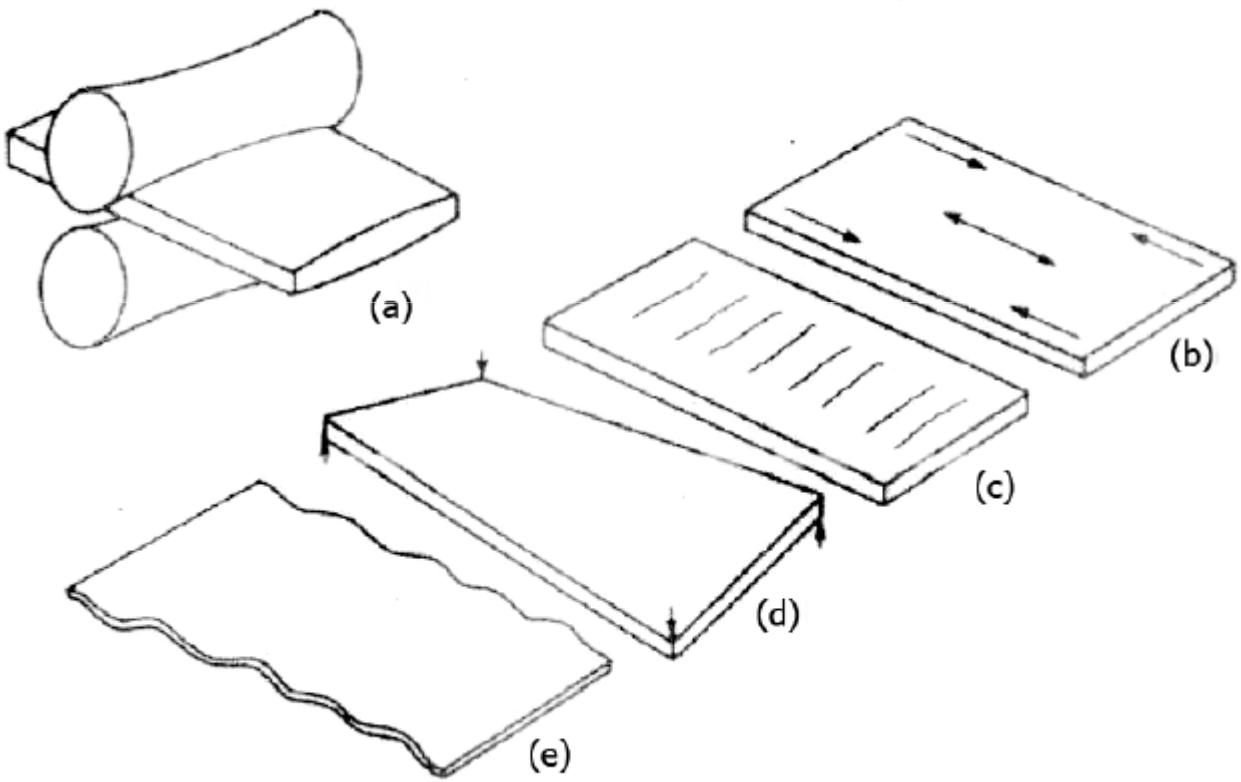


Defeitos: espalhamento lateral

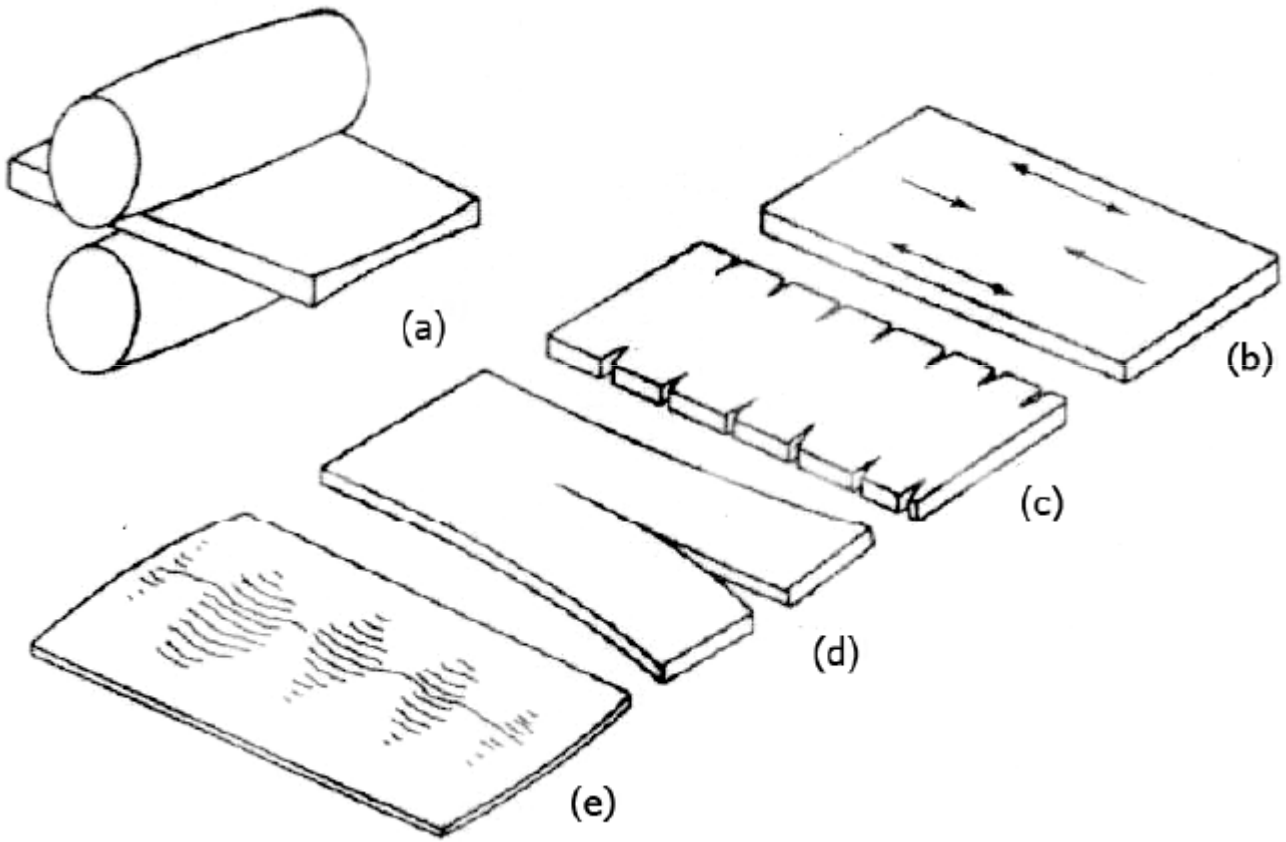


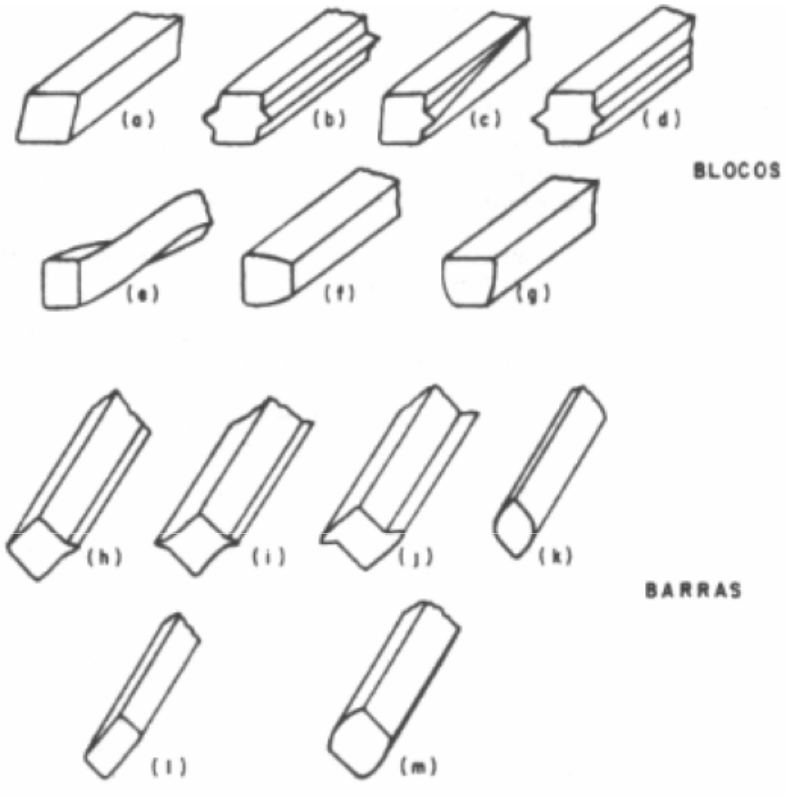


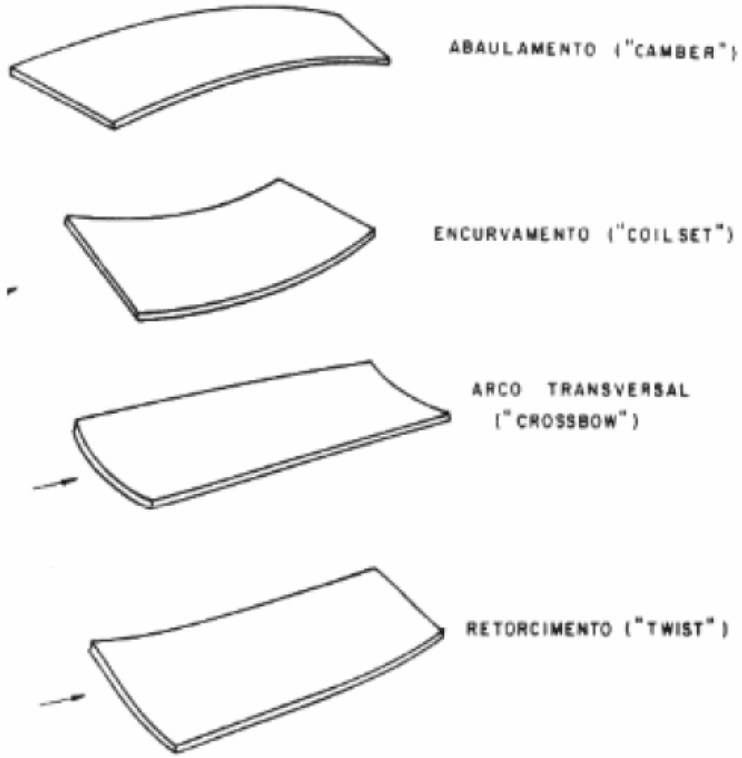
# Deformação côncava dos cilindros



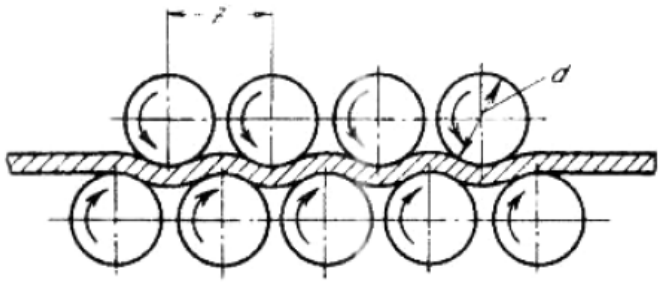
# Deformação convexa cilindros



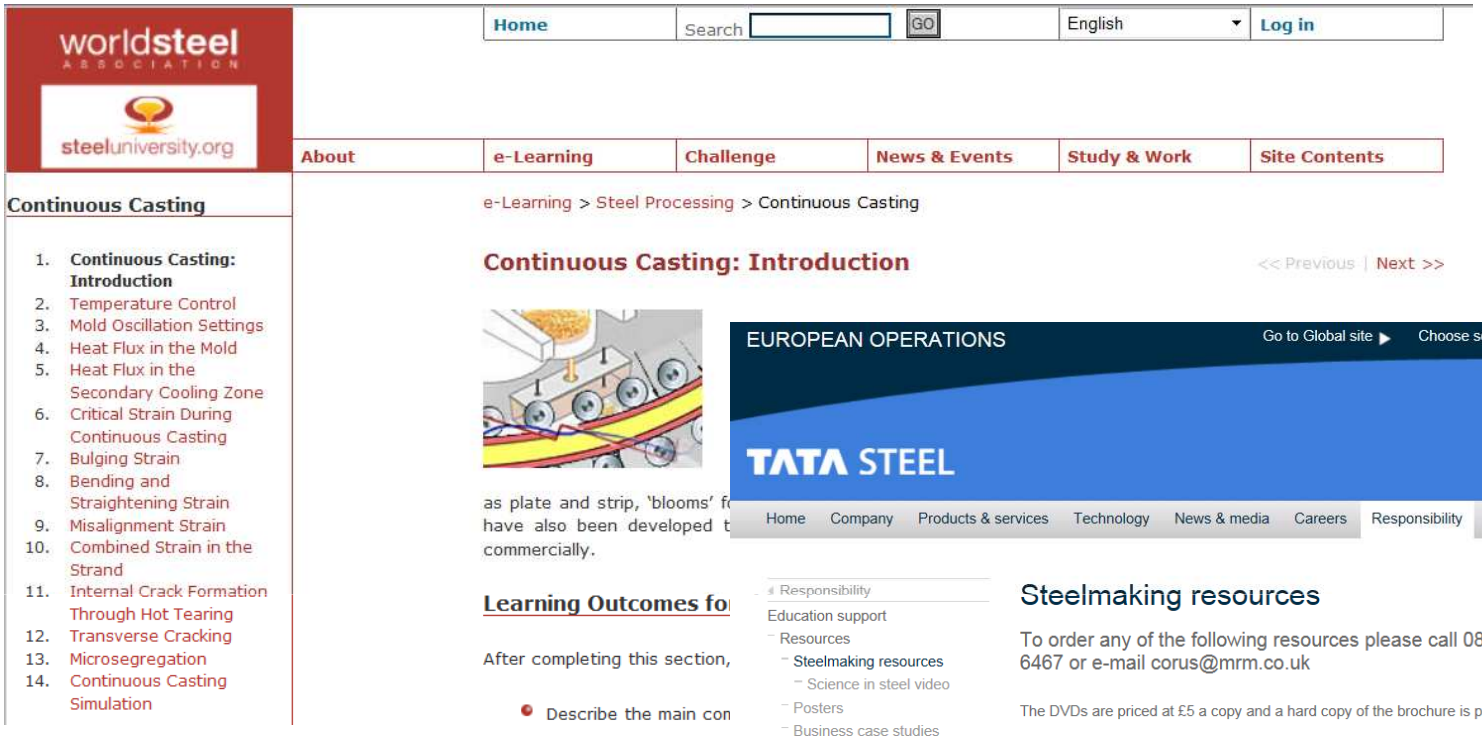


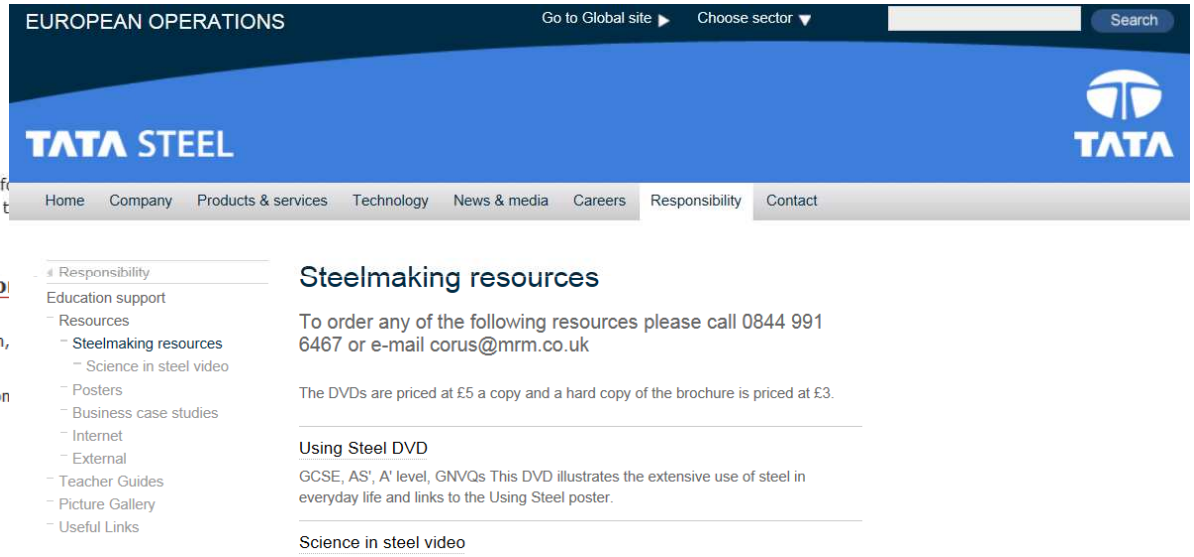




Endireitadores



# Informações adicionais ...




http://www.industry.siemens.com/INDUSTRYSOLUTIONS/METALS-MINING/EN/METALS/Pages/home.aspx

HOME

Continuous Casting Consortium

ILLINOIS
UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN

MechSE

- Intro to CC
- Members
- Director
- People
- Projects
- Laboratory
- Publications
- Downloads
- More Links
- Our Mission

Welcome to the

# Continuous Casting Consortium

The Continuous Casting Consortium (CCC) encompasses a cooperative research effort between the University of Illinois, the Steel Industry, and the Government (NSF Project). Its purpose is to develop comprehensive mathematical models of the continuous casting of steel slabs and to apply these models to improve understanding, optimize the process, and solve practical problems of interest to the participating members.

The Consortium was formally created in 1991 to provide a vehicle for continuing industrial interaction on work begun by Professor Brian G. Thomas in connection with his National Science Foundation Presidential Young Investigator Award. The idea for the CCC started in 1986, when Armco, Inland, and Bethlehem Steel cosponsored a project to model the continuous slab casting process.

http://ccc.illinois.edu/index.html

# ANEXOS

**Table 2. External cracks in slabs**

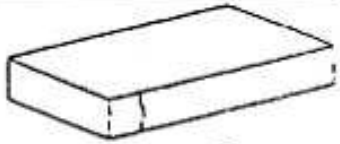
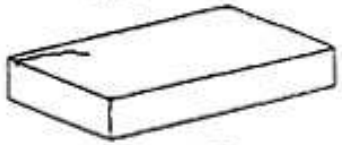
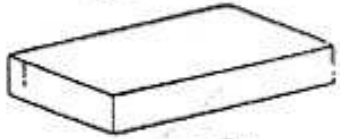
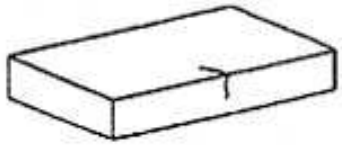
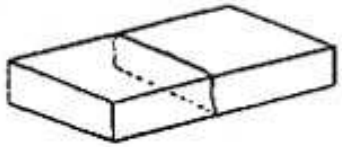
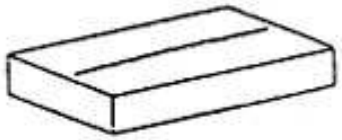
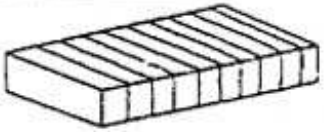
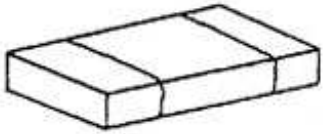
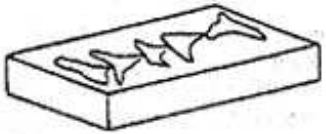
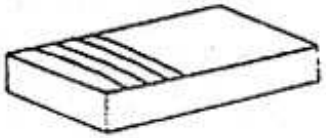
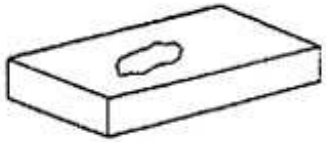
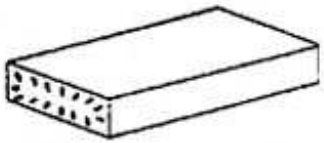
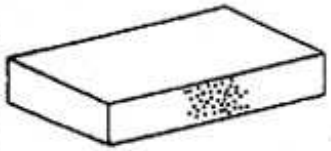
| No. | Defect | Appearance |
|---|---|---|
| 1. | **Hanger crack** – Occurs when the ingot is suspended in the mold due to a worn or improperly fitted feeder head, or due to overfilling of the mold. |  |
| 2. | **Fin cracks** – Caused by restrictions resulting from a fin. |  |
| 3. | **Basal cracks** – Occurs when free contraction of the ingot is limited by fins or flashes. |  |
| 4. | **Double skin crack** – A crack that is usually associated with double skin. | |
| 5. | **Transverse facial crack** – A crack that runs from the corner of the cast product across its face. |  |
| 6. | **Teeming arrest** – Appears as a transverse break in the continuity if the slab skin extends completely around the product and is caused by a temporary stoppage in teeming. |  |
| 7. | **Longitudinal facial crack** – A crack that runs along the slab face. |  |

**Table. 3 Surface defects in slabs**

| No. | Defect | Appearance |
|---|---|---|
| 1. | **Heavy reciprocation marks** – Distances between these marks are usually related to the amount of the product that has descended in one cycle of reciprocation. |  |
| 2. | **False wall** – A surface irregularity that completely rounds the product and is caused by temporary separation of the skin from the descending strand. |  |
| 3. | **Bleed** – A result of exudation of molten metal through a rupture in the skin. |  |
| 4. | **Lap** – A fold in the skin caused by the rising molten metal that engulfs a layer that is already solidifying against the mold wall. |  |
| 5. | **Plating** – Appears as a shallow indent on the surface. The origin of this defect is from the metal that has solidified on the surface of the meniscus and is then drawn toward the mold walls and subsequently entrapped. |  |
| 6. | **Blowholes** – Large holes that are elongated in the direction of columnar growth and can also break the surface. This defect is generally due to an incorrect level of oxidation. In stainless steel grades, hydrogen can be the cause. |  |
| 7. | **Pinholes** – Small holes close to the surface and often in clusters. When they appear on the surface, they are known as skin holes. Pinholes are frequently located under the skin of the cast product and are attributed to high levels of oxygen or hydrogen in steels. |  |

Separação temporária da pele solidificada durante o lingotamento.

Exudação de metal líquido através da camada solidificada.

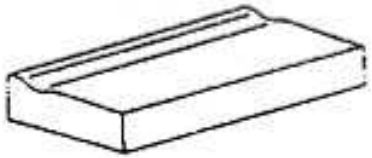
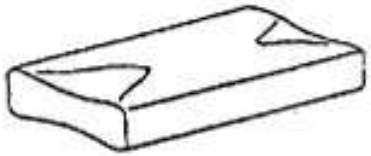
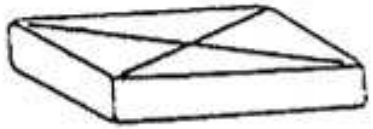
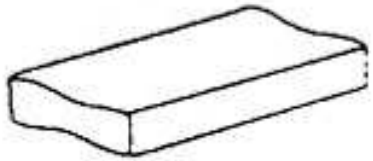
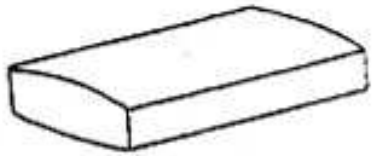
Metal líquido captura uma camada de metal sólido.

Metal solidificado na superfície do menisco.

“Buracos/bolhas” decorrente de elevado nível de oxidação do aço.

“Buracos” decorrente de elevado nível de oxigênio e hidrogênio no aço.

**Table 4. Shape defects in slabs**

| No. | Defect | Appearance |
|---|---|---|
| 1. | **Longitudinal depression** – This is a channel-shaped depression on the face of the slab, running in the direction of the axis. |  |
| 2. | **Transverse depression** – This is a localized depression of the slab surface, normal to the axis of the slab. This defect is mainly caused by uneven lubrication, too rapid cooling, and fluctuating level of metal in the mold. |  |
| 3. | **Fin** – This is a thin strip of metal protruding approximately at right angle to the surface of the slab. It is caused by molten steel having run into the open cracks in the mold. | |
| 4. | **Rhomboidity** – It is defined as a relative difference between diagonals of a rectangular section of the slab. |  |
| 5. | **Concavity** – It is a distortion of the slab which appears as a concave surface. This defect is usually attributed to an incorrect spray-cooling pattern. |  |
| 6. | **Bulging** – It is a distortion of the slab giving rise to a convex surface or surfaces. This defect is usually due to inadequate support of the skin against the effects of ferrostatic pressure. |  |

Flutuação de nível
no molde

Trincas abertas
no molde

Trincas decorrente de
problemas de resfriamento
( secundário)

Deformação decorrente de
excesso de tensão não
suportada pelo sistema de
suporte dos rolos
(elevada pressão ferrostática)

**Muito obrigado !**

# FIM

Prof. Guilherme F B Lenz e Silva
PMT-POLI/USP
guilherme.bernardo@poli.usp.br