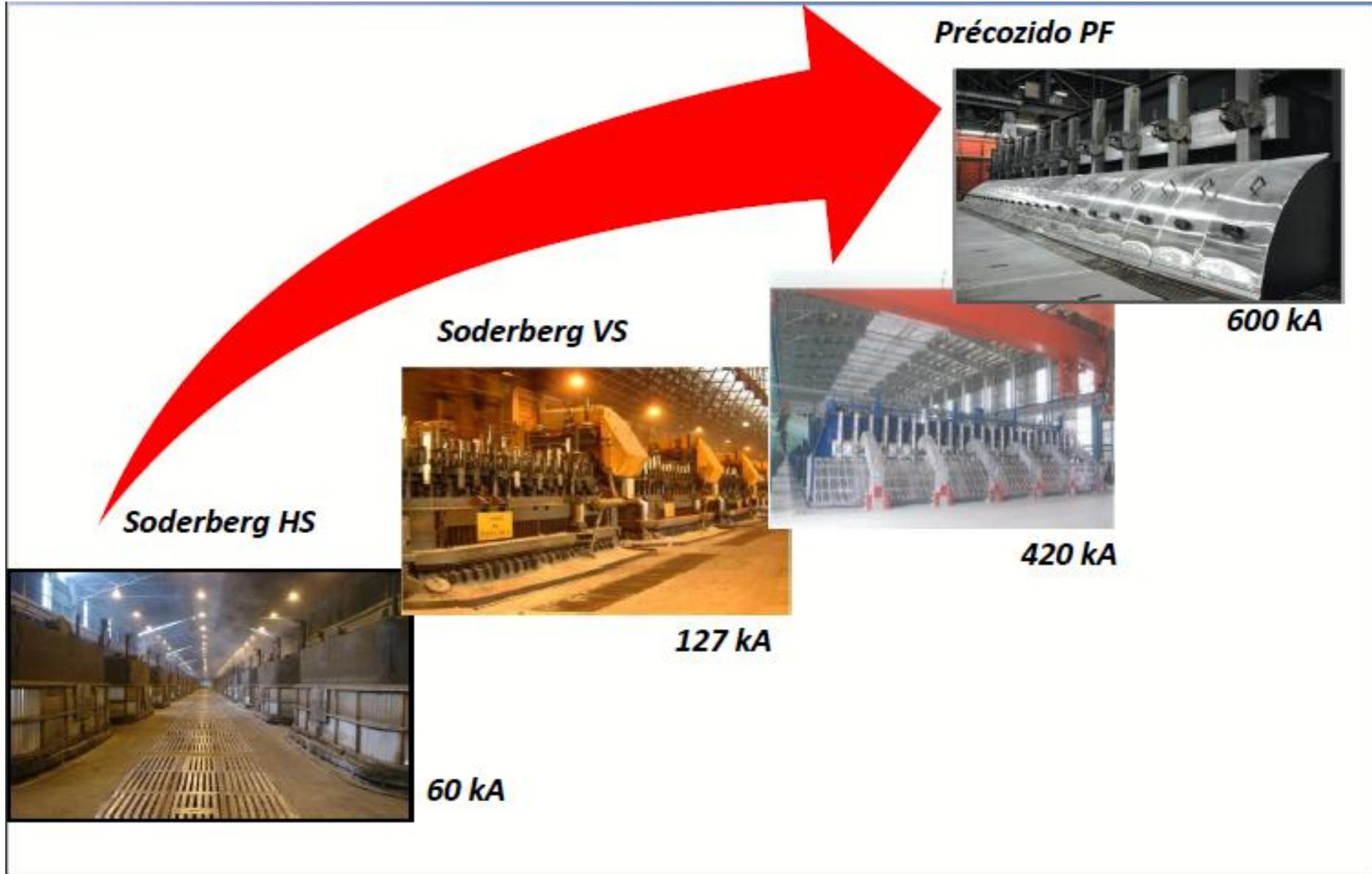


# METALURGIA EXTRATIVA DOS NÃO FERROSOS

**PMT 3409**

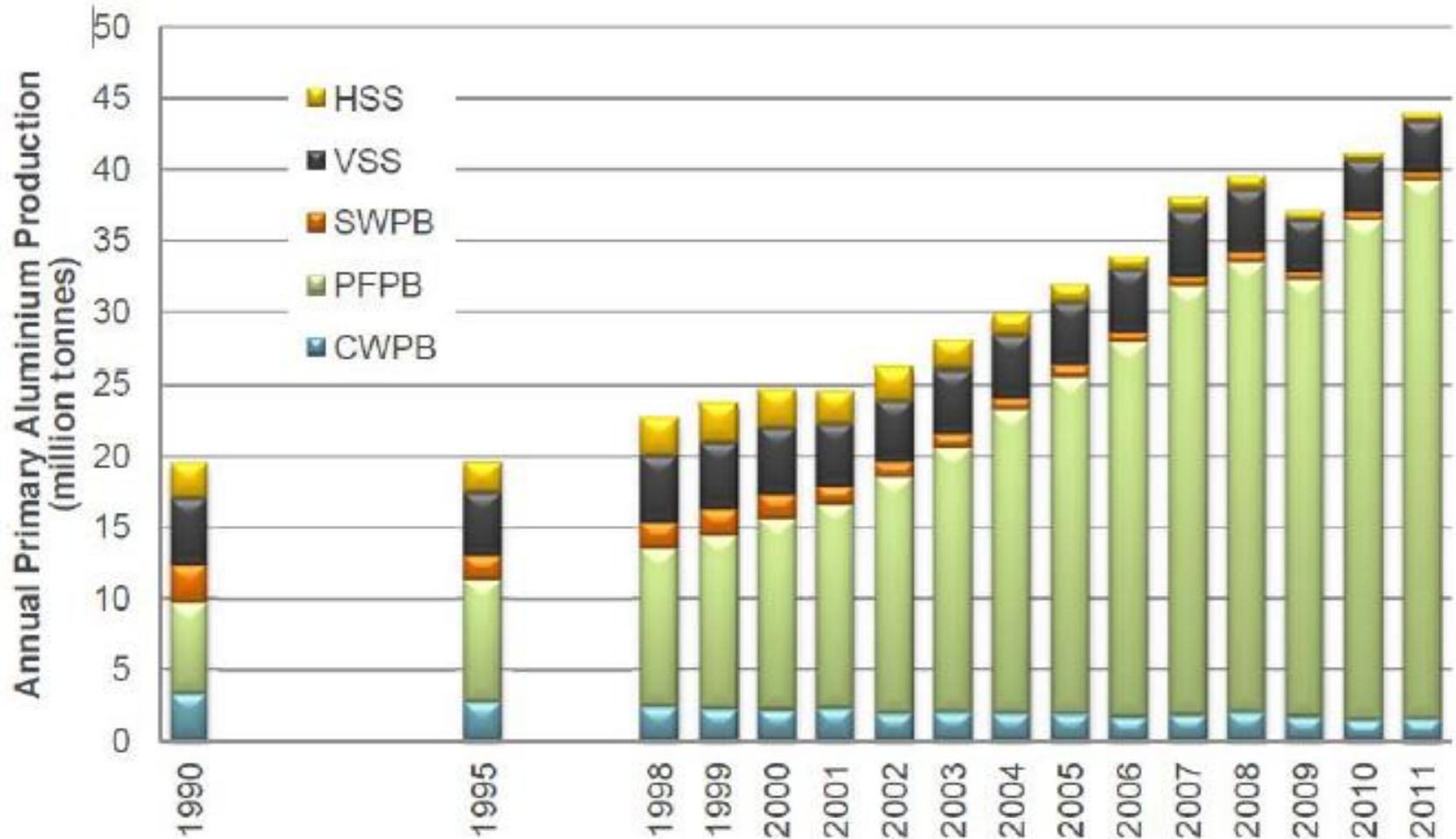
*Flávio Beneduce*

# PROCESSO HALL-HEROULT



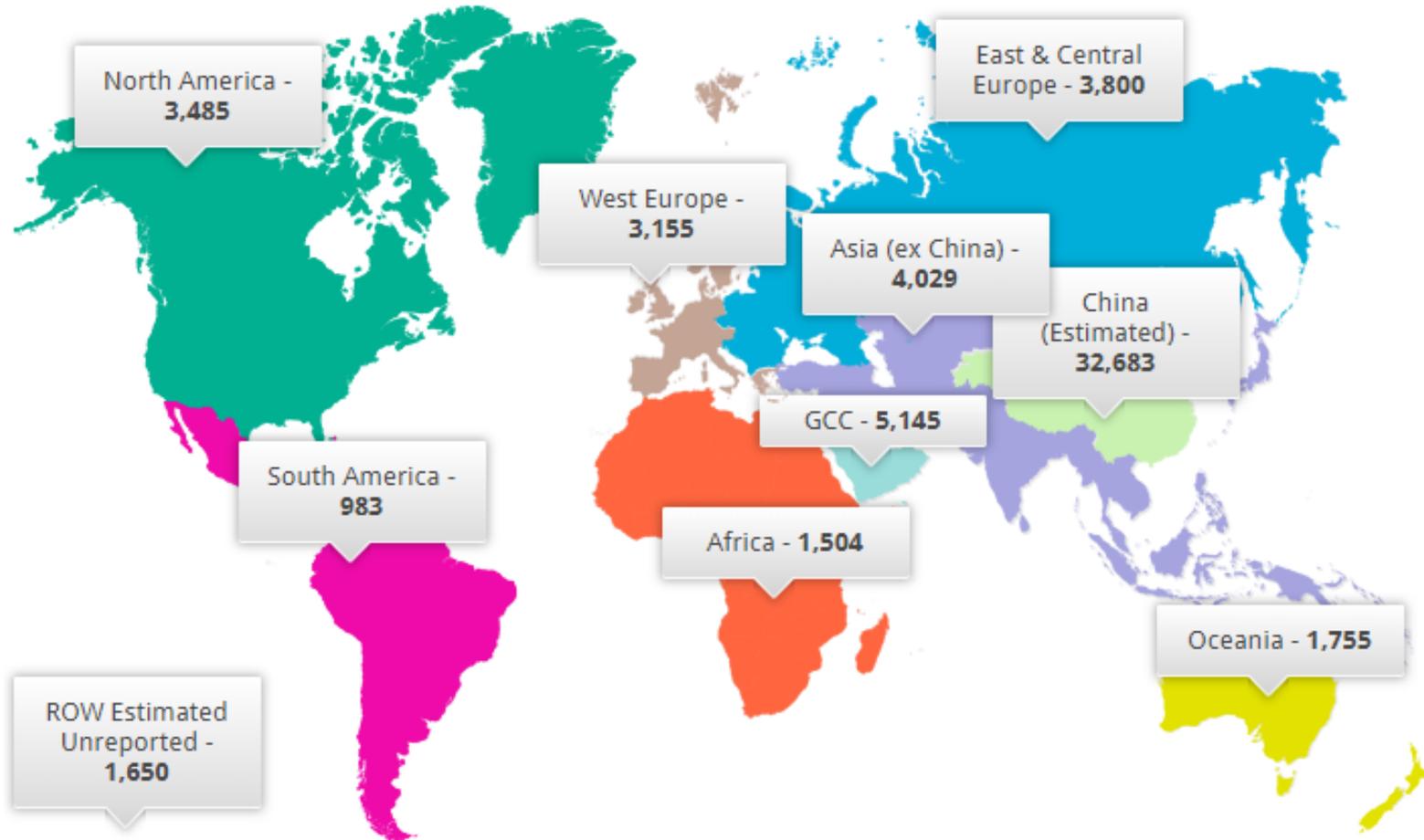
SW--side work, CW--center work, PF--point feed.

# PROCESSO HALL-HEROULT

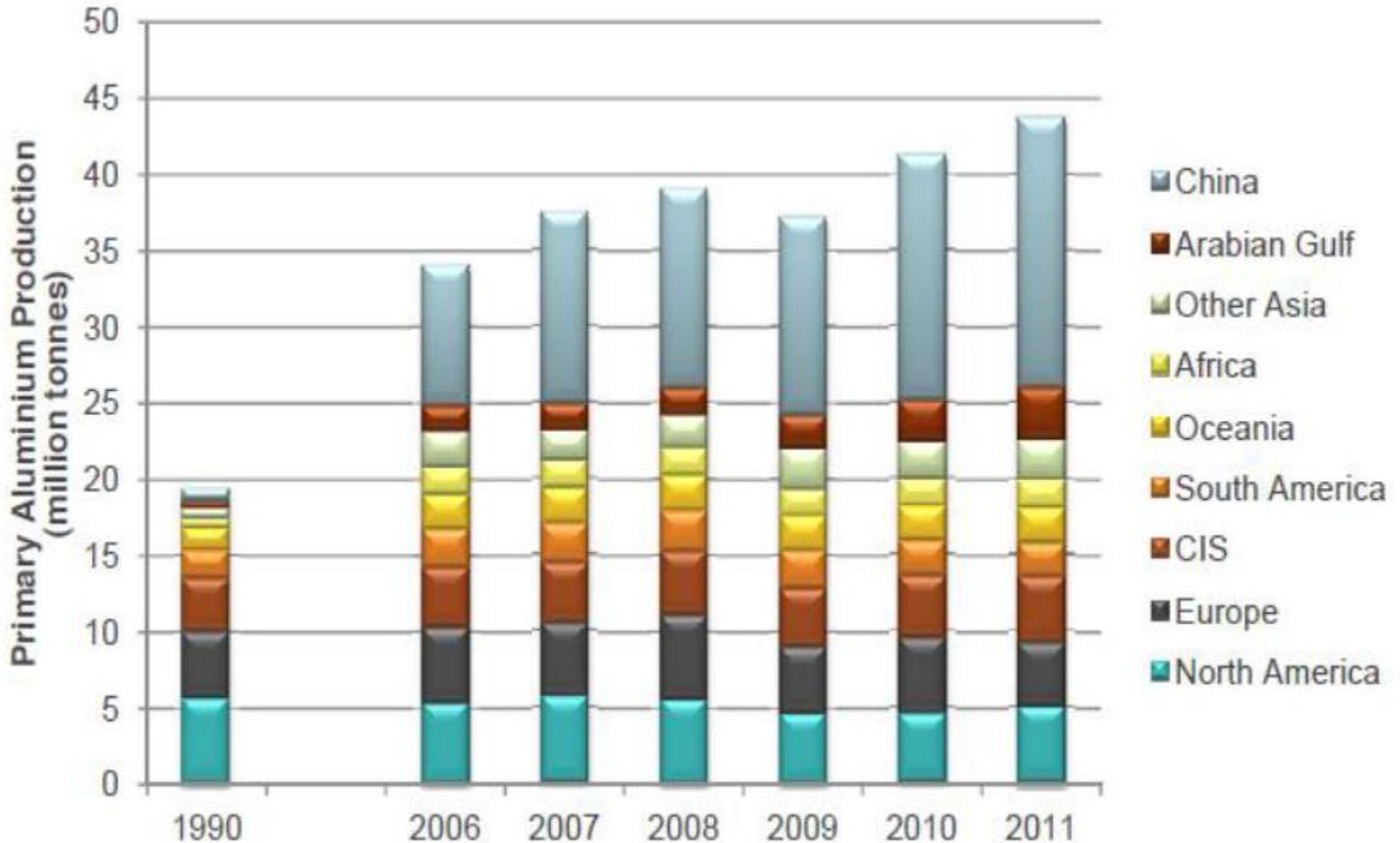


# PROCESSO HALL-HEROULT

Total for Jan 2019 to Nov 2019: 58,189 thousand metric tonnes of aluminium



# PROCESSO HALL-HEROULT



# PROCESSO HALL-HEROULT

Country	2016	2017 <sup>e</sup>	2017 (% of Total)	2016-2017 (% Change)	2017 Capacity	2017 (% Capacity)
<b>China</b>	31,900	32,600	54.30%	2.20%	44,500	73.30%
<b>Russia</b>	3,560	3,707	6.00%	1.10%	3,900	92.30%
<b>Canada</b>	3,210	3,210	5.40%	0.00%	3,270	98.20%
<b>India</b>	2,720	3,200	5.30%	17.60%	3,600	88.90%
<b>UAE</b>	2,500	2,600	4.30%	4.00%	2,600	100.00%
<b>Australia</b>	1,630	1,490	2.50%	-8.60%	1,720	86.60%
<b>Norway</b>	1,220	1,220	2.00%	0.00%	1,550	78.70%
<b>Bahrain</b>	971	960	1.60%	-1.10%	1050	91.40%
<b>Iceland</b>	855	870	1.50%	1.80%	870	100.00%
<b>Saudi Arabia</b>	740	740	1.20%	0.00%	740	100.00%
<b>Brazil</b>	793	800	1.30%	0.90%	1,400	57.10%
<b>Malaysia</b>	620	760	1.30%	22.60%	760	100.00%
<b>United States</b>	841	740	1.20%	-12.00%	2,000	37.00%
<b>South Africa</b>	697	714	1.20%	2.40%	720	99.20%
<i>Subtotal</i>	<i>52,257</i>	<i>53,504</i>	<i>89.20%</i>	<i>2.40%</i>	<i>68,680</i>	<i>77.90%</i>
Other countries	5,743	6,496	10.80%	13.10%	9,700	67.00%
<b>World Total</b>	<b>58,000</b>	<b>60,000</b>	<b>100%</b>	<b>3.40%</b>	<b>76,900</b>	<b>78.00%</b>

Source: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017.

All figures in thousand metric tons.

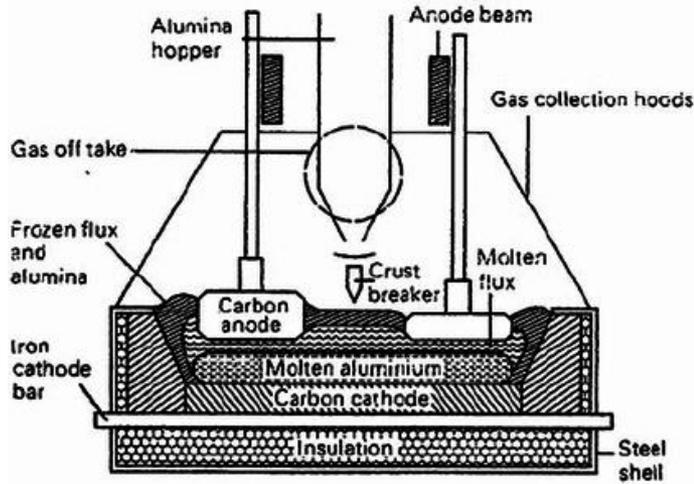
<sup>e</sup> = Year estimated.

SW--side work, CW--center work, PF--point feed.

# PROCESSO HALL-HEROULT

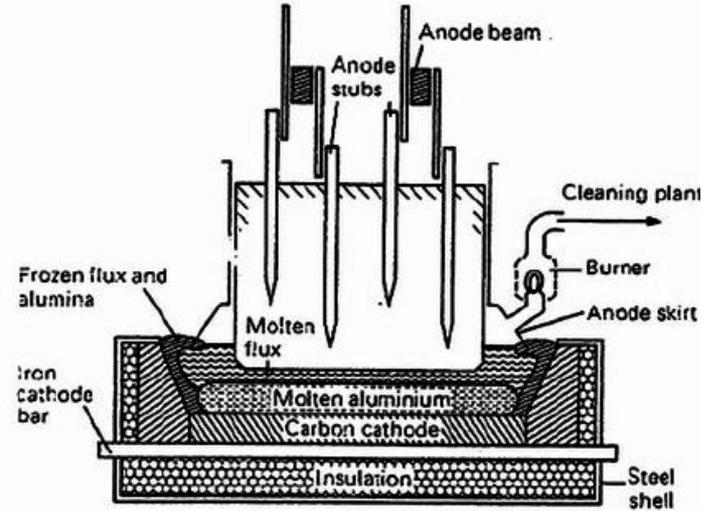
Center break prebake anode cell

CWPB



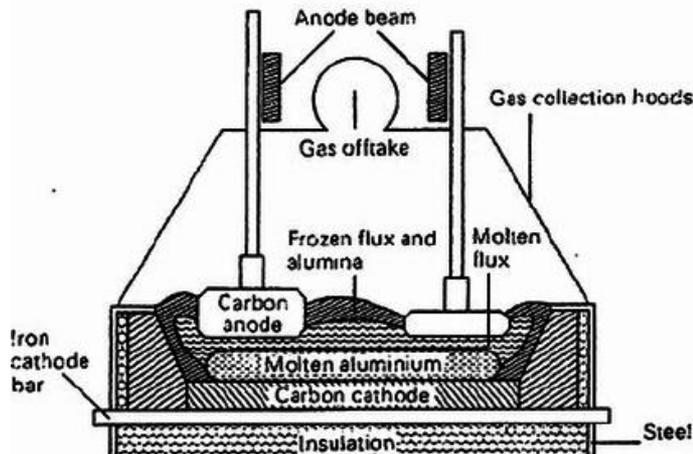
Vertical stud Soderberg cell

VSS



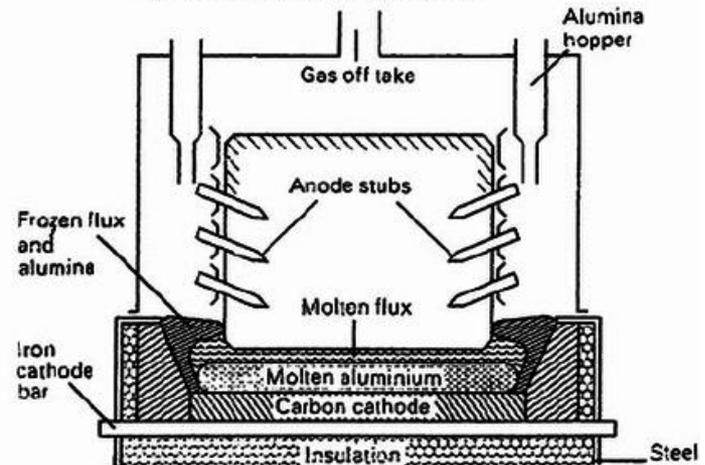
Side break prebake anode cell

SWPB



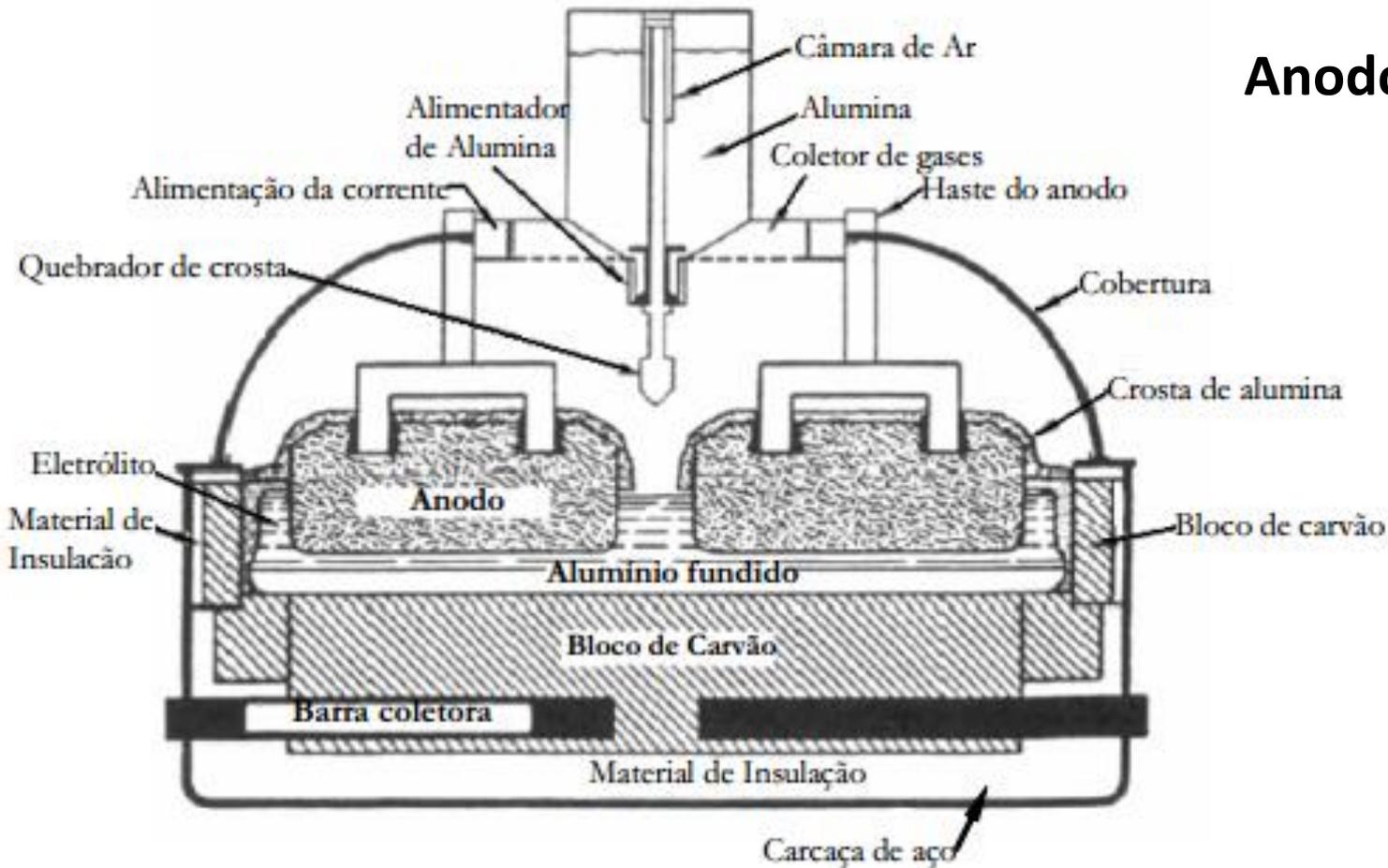
Horizontal stud Soderberg cell

HSS



# PROCESSO HALL-HEROULT

Anodo pré-cozido



# PROCESSO HALL-HEROULT



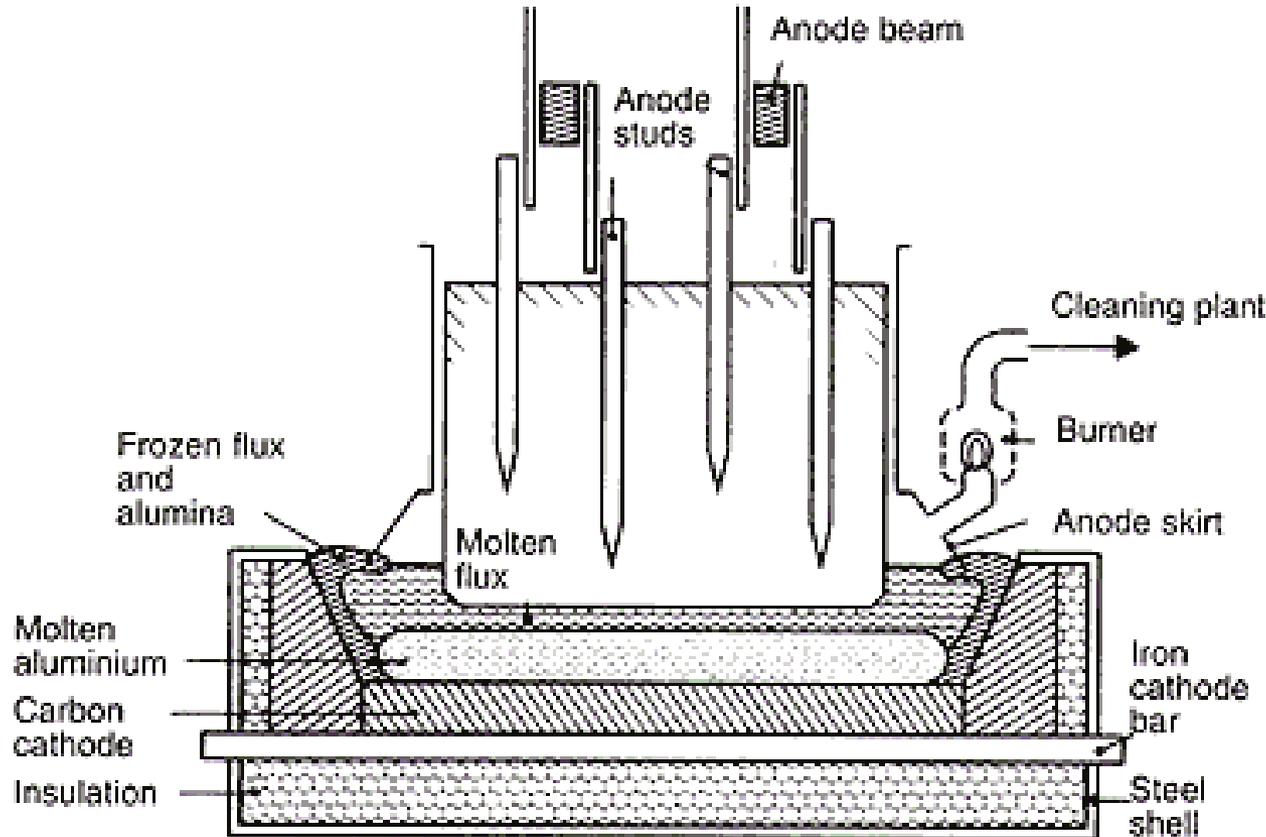
**Anodo pré-cozido**

# PROCESSO HALL-HEROULT

- **Anodos Pré-cozido**

- São formados a partir de mistura de coque de petróleo, anodos moídos já utilizados e piche
- Tal mistura, após um processo de prensagem, é aquecida a, aproximadamente,  $1100^{\circ}\text{C}$ , em fornos aquecidos a gás ou a óleo.

# PROCESSO HALL-HEROULT



Vertical stud Söderberg cell

Anodo Söderberg

# PROCESSO HALL-HEROULT



**Anodo Söderberg**

# PROCESSO HALL-HEROULT

- **Anodos Söderberg**
  - São formados a partir de mistura de coque de petróleo e piche.
  - A mistura é adicionada a um recipiente de aço com dimensões aproximadas de 6-8 m de comprimento, por 2 m de largura e 1 m de altura.
  - O calor proveniente do eletrólito e da corrente elétrica efetuam o cozimento da mistura, à medida que esta vai se desenvolvendo no interior do recipiente, de modo a permitir a contínua substituição do anodo posicionado na base do recipiente.

# PROCESSO HALL-HEROULT

- Efeito da corrente
  - Valores de tensão e de corrente empregados:
    - Tensão: 800V
    - Corrente: 34 a 130 kA verificar
- A eficiência de corrente é função das seguintes variáveis:
  - Temperatura do banho
  - Razão da criolita
  - Distância anodo-catodo
  - Densidade de corrente
- Teoricamente: 1kAh de corrente elétrica = 0,3356 kg Al
- Na prática: 85% - 95% de eficiência de corrente

# PROCESSO HALL-HEROULT

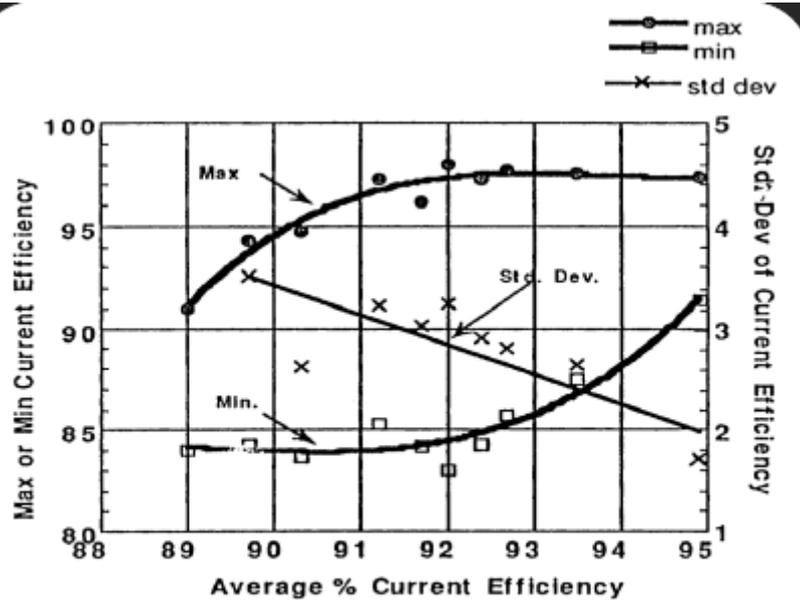
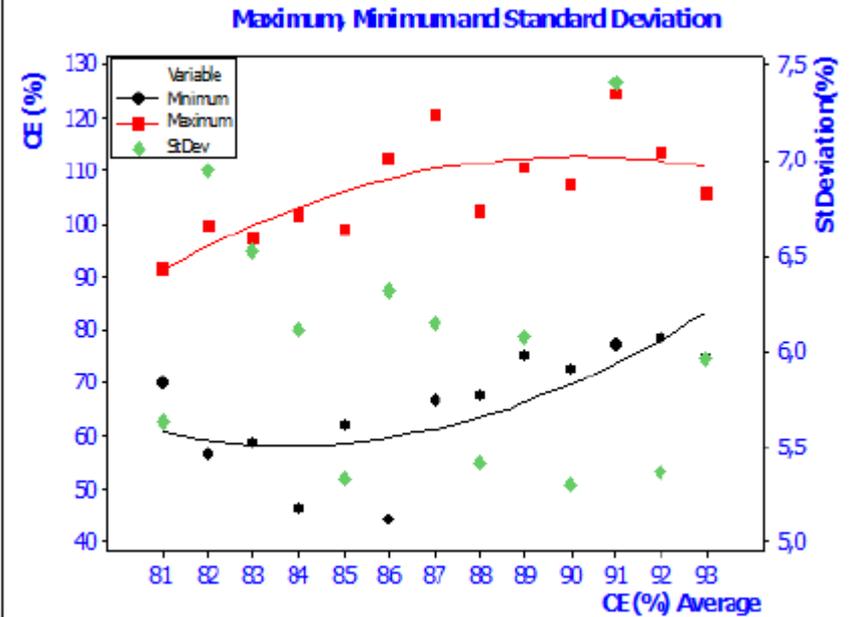


Figure 1: Correlation of Average Current Efficiency with Variation

## EFICIÊNCIA DE CORRENTE



# PROCESSO HALL-HEROULT

## EFICIÊNCIA DE CORRENTE

- Motivos da queda
  - Solubilidade do alumínio no próprio eletrólito (0,1%, aprox.)
  - Reações de reversão
    - $\text{Al} + 3\text{NaF} = 3\text{Na} + \text{AlF}_3$
    - $2\text{Al} + \text{AlF}_3 = 3\text{AlF}$
    - $2\text{Al} + 3\text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}$
    - Reação química entre o alumínio líquido e a superfície do catodo, formando carbeto de alumínio

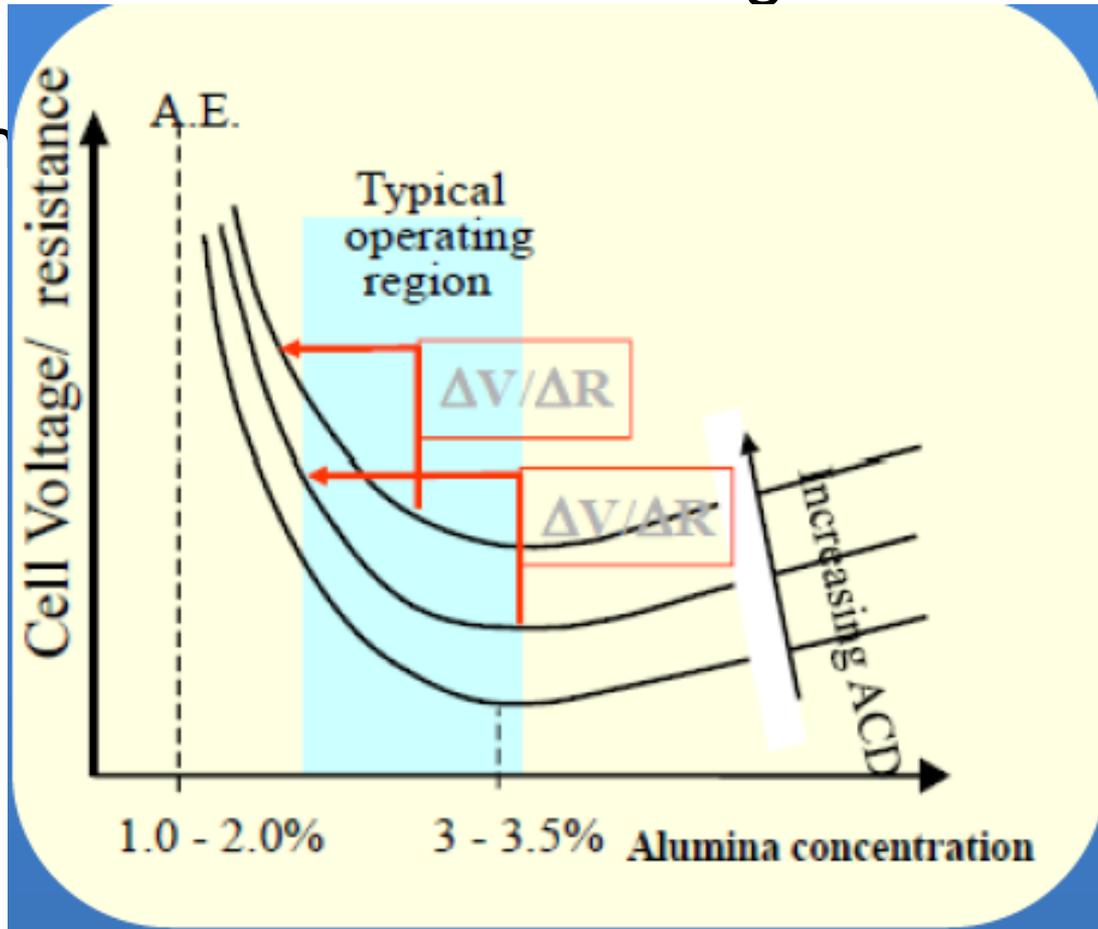
# PROCESSO HALL-HEROULT

## EFEITO ANÓDICO

- Estabilidade da Corrente
- Balanço de Energia
- Eficiência de Corrente
- Aumenta o consumo de Energia Elétrica
  - Aumento de voltagem por um determinado tempo
- Impacta o Meio – Ambiente:
  - Gases do Efeito Estufa
  - Emissões Fugitivas

# PROCESSO HALL-HEROULT

- O Efeito Anódico é um fenômeno que ocorre quando o teor de alumina atinge valores inferiores a 2,0 %
- É um



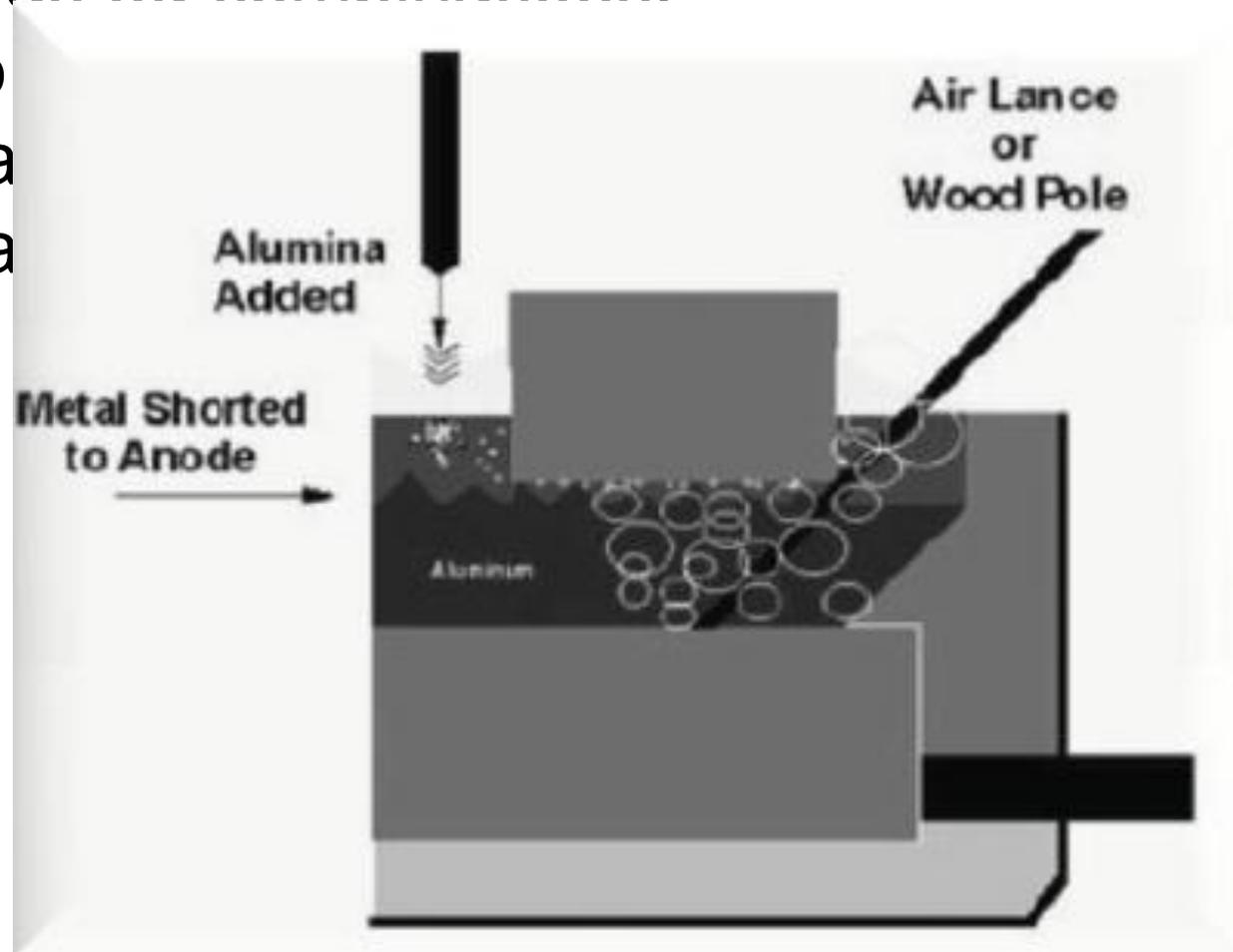
# PROCESSO HALL-HEROULT

- O aumento da voltagem na ausência de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  provoca a eletrólise do  $\text{AlF}_3$  com a formação de PFC's (compostos perfluorcarbonos)
- Gases gerados tem alta resistência elétrica e cobrem parte da superfície do anodo aumentando a voltagem

Reações Eletroquímicas (início)	Potencial (V)
$2 \text{AlF}_3 + 2 \text{C} \Rightarrow 2 \text{Al} + \text{C}_2\text{F}_6$	2.607
$4 \text{AlF}_3 + 3 \text{C} \Rightarrow 4 \text{Al} + 3 \text{CF}_4$	2.389
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{AlF}_3 + 3 \text{C} \Rightarrow 4 \text{Al} + 3 \text{COF}_2$	1.831
$2 \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{C} \Rightarrow 4 \text{Al} + 3 \text{CO}_2$	1.272

# PROCESSO HALL-HEROULT

- A extinção do Efeito Anódico pode ser feita de várias maneiras ou combinações:
  - Introdução
  - Sopros de ar
  - Movimentação



# PROCESSO HALL-HEROULT

❖ O Protocolo de Kyoto cobre 6 tipos de gases:

- ✓  $\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono
- ✓  $\text{CH}_4$  – Metano
- ✓  $\text{N}_2\text{O}$  – Óxido Nitroso
- ✓ HFCs – Hidrofluorcarbonetos
- ✓ PFC's – Perfluorcarbonetos
- ✓  $\text{SF}_6$  – Hexafluoreto de enxofre

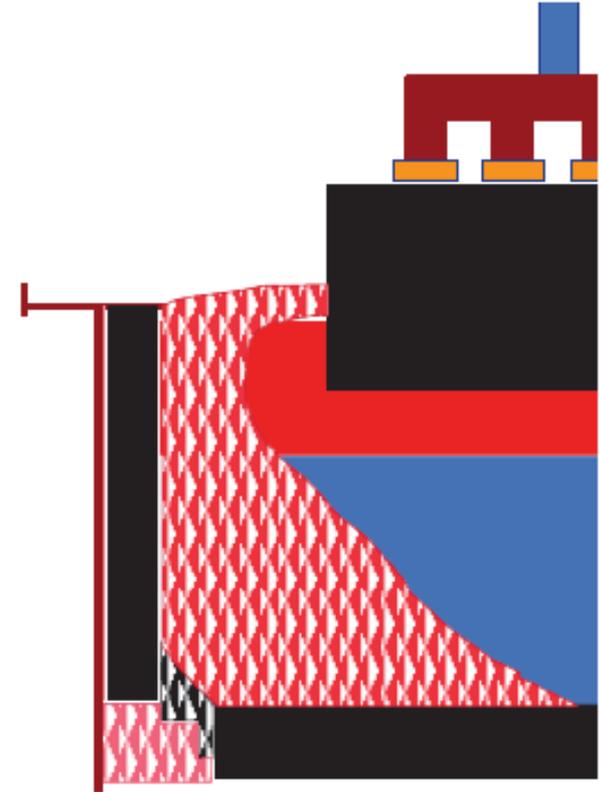
❖ Outros gases :

- ✓ Compostos orgânicos
- ✓  $\text{NO}_x$  – Óxido de nitrogênio
- ✓  $\text{CO}$  – Monóxido de carbono

Gas Warming Potential

Gás	GWP
$\text{CO}_2$	1
$\text{CH}_4$	21
$\text{N}_2\text{O}$	310
$\text{CF}_4$	6500
$\text{C}_2\text{F}_6$	9200

# PROCESSO HALL-HEROULT



Função do Lombo :

- Composição :
  - $\text{AlF}_3$  : 0 a 3 %
  - $\text{CaF}_2$  : 0 a 1 %
  - Criolita : > 96 %
- Proteção lateral da parede interna do forno
- Previne vazamentos pela vedação das juntas
- Evita grandes variações de temperatura

# PROCESSO HALL-HEROULT

## Insumos para a produção de alumínio primário (ano-base 2003)

Alumina	1919 kg/t Al
Energia elétrica	15,0 MWhcc/t Al
Criolita	8,0 kg/t
Fluoreto de alumínio	19,7 kg/t
Coque de petróleo	0,384 kg/kg Al
Piche	0,117 kg/kg Al
Óleo combustível	44,2 kg/t

<https://www.youtube.com/watch?v=eGdXxFjqFsg>

<https://www.youtube.com/watch?v=NW1k4wNEq14>