



## Fabricação do Cimento Portland

Matérias primas usadas :

- **Calcário** :  $\approx 90\%$  da mistura

Componente básico do cimento fornecendo o Óxido de Cálcio.

- **Argila** :  $\approx 10\%$  da mistura

Componente usada para fornecer Silicatos de Alumínio e Ferro.

- **Areia** :

Usada para corrigir o teor de sílica  $\text{SiO}_2$  da argila.

- **Minério de ferro** :

Usado para corrigir o teor de óxido de ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  da argila.

Exemplo de uma Composição Química das Matérias Primas  
usadas para fabricar um Cimento Portland atual ( % em peso )

	<b>Calcário</b> <i><math>\approx 90\%</math> da mistura em peso</i> $\text{CaCO}_3$	<b>Argila</b> <i><math>\approx 10\%</math> da mistura em peso</i>	<b>Areia</b> <i>para corrigir o teor de <math>\text{SiO}_2</math> da argila</i>	<b>Minério de ferro</b> <i>para corrigir o teor de <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> da argila</i>
Ca O	51,29 %	0,70 %	0,63 %	2,09 %
Si O <sub>2</sub>	4,16 %	64,40 %	88,23 %	7,56 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50 %	15,75 %	5,02 %	0,40 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,90 %	8,92 %	1,30 %	83,13 %
Mg O	0,36 %	0,80 %	0,11 %	0,43 %
K <sub>2</sub> O	---	2,79 %	2,66 %	0,08 %
Na <sub>2</sub> O	---	0,06 %	0,37 %	0,06 %
Perda ao fogo	41,00 % ↑ gás CO <sub>2</sub>	6,14 %	1,00 %	4,92 %

CaO / CaCO<sub>3</sub> = 56% ( em peso ) ; CO<sub>2</sub>/ CaCO<sub>3</sub> = 44 % ( em peso )



Jazida de  $\text{CaCO}_3$

Calcário britado :  $\text{CaCO}_3$   
 $\approx 90\%$  peso

Argila :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   
 $\approx 10\%$  peso

Balanças dosadoras.

Correções :  
 $\text{SiO}_2$  : Areia  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  : Minério de ferro

Temperatura ambiente  
Grãos com  $\phi \leq 25\text{mm}$

Gás quente

Moagem  
Grãos com  $\phi \leq 80 \mu\text{m}$

Por que moer os grãos com  $\phi \leq 80 \mu\text{m}$ ?  
Ver adiante

Temperatura na Entrada  $350^\circ\text{C}$

Pré-aquecedor do forno  
**Calcinação**

Temperatura na entrada  $950^\circ\text{C}$

Zona de queima : Fusão a  $1450^\circ\text{C}$

Forno rotativo  
**Formação do clínquer**

Fusão a  $1450^\circ\text{C}$  ?  
 $\text{CaO} = 2570^\circ\text{C}$   
 $\text{SiO}_2 = 1713^\circ\text{C}$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2050^\circ\text{C}$

**Resfriamento do clínquer**

Temperatura  $\approx 150^\circ\text{C}$

**Britagem**

Grãos  $\leq 40\text{mm}$

Gesso:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( 3 a 8% )

**Moagem**

Grãos  $\leq 80\mu\text{m}$

Adições, se houver :  
• escória de alto forno  
• pozzolana  
• sílica ativa ( *microsílica* )  
• filer calcário  
• cinza volante ( *fly ash* )



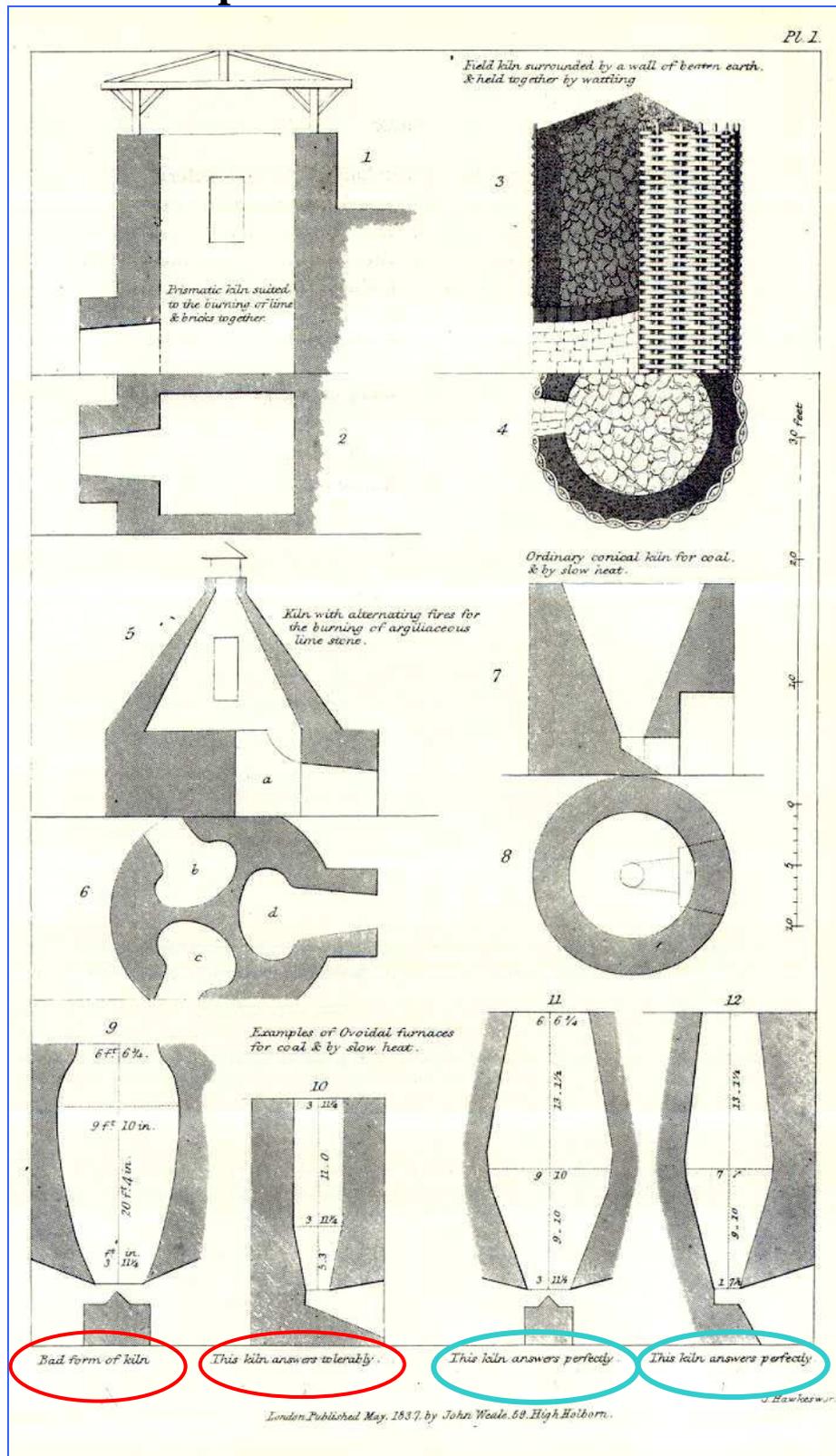


## Um pouco de História – 1818

- **Louis J. Vicat** [15] sugeria para uma *Cal Hidráulica Artificial* ( Cimento):
  - “ Misturar (em peso) : 15 partes de argila + 140 partes de calcário”
- Isso correspondia a misturar em peso ( % ):
  - “ 9,7 % argila + 90,3% calcário = 100% mistura”
- *Observação:* Hoje em dia ( 2011) a mistura básica é idêntica. Ver [5] :
  - 10 % argila + 90% calcário = 100% mistura .
- A fábrica de cal hidráulica artificial ( **cimento** ) , em Paris, usava, no ano de **1818**, a seguinte mistura , em peso :
  - 20 partes de argila + 140 partes de calcário + água + moagem ≡
  - ( 12,5 % argila + 87,5 % de calcário ) + água + moagem → lama
  - a moagem era feita em moinho semelhante aos moinhos onde se moia o trigo para fazer farinha.
- A lama era colocada a decantar e evaporar em grandes bacias escavadas no terreno, até adquirir uma consistência de pasta, que permitisse o seu manuseio.
- Eram preenchidos moldes com a pasta.
- Cada operário moldava 5000 moldes prismáticos, por dia, num total de 1,5 m<sup>3</sup> de mistura.  
Cada prisma tinha 0,3 litros ≈ 7cm x 7cm x 7cm
- Os prismas eram colocados a secar ao ar livre, em prateleiras, e, depois de bem secos, eram colocados no forno para a calcinação.
- Para a calcinação, em Paris ( 1818 ), era usada uma mistura de carvão vegetal com coque de carvão mineral.
- Os fornos eram primitivos. Ver as figuras adiante.
- Não se tem informação sobre a temperatura alcançada nesses fornos



## Um pouco de História - 1818

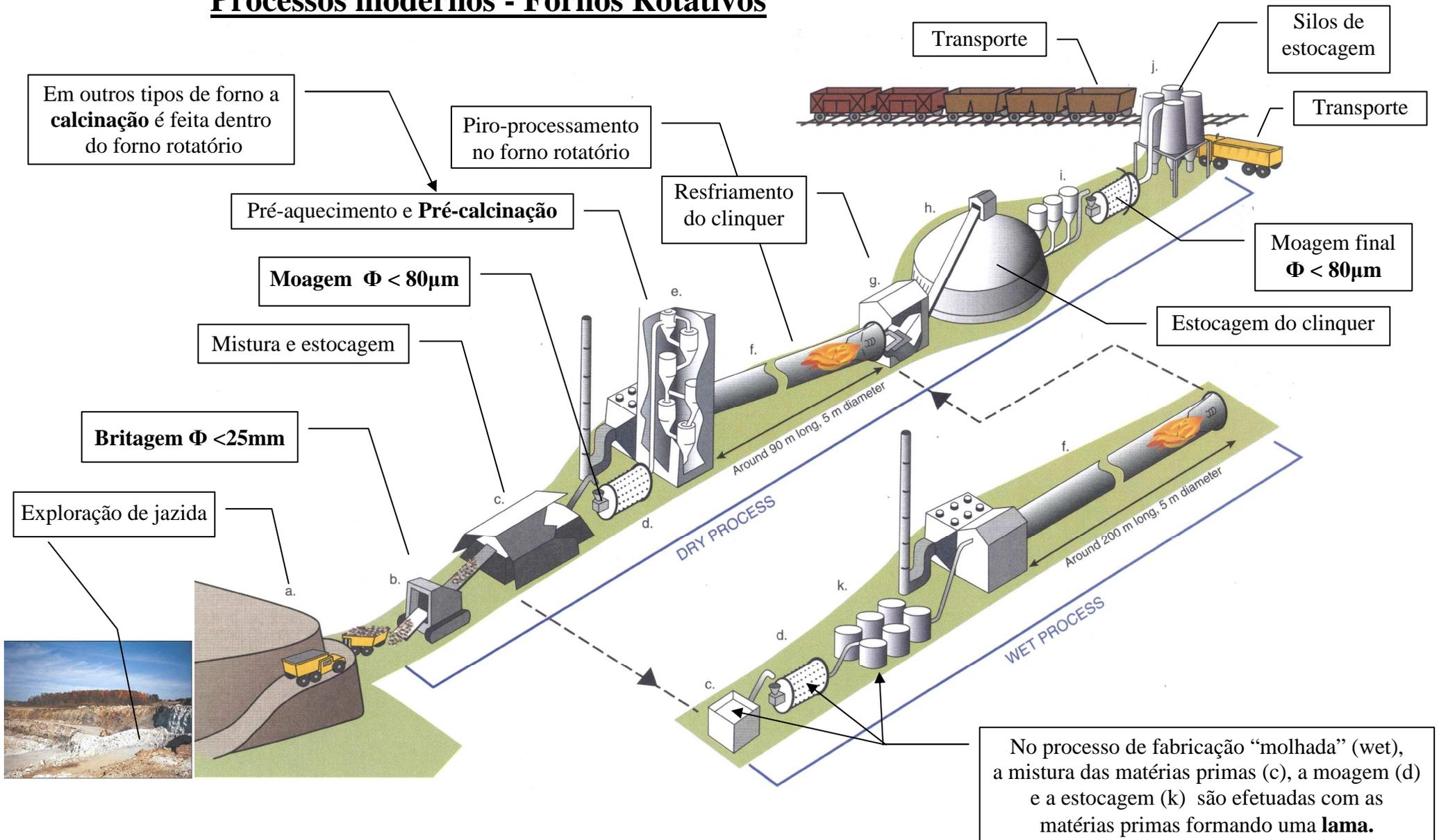


### Fornos utilizados nos primeiros cimentos – 1818

[15] Louis J Vicat (trans JT Smith), *A Practical and Scientific Treatise on Calcareous Mortars and Cements*, London Published, May 1837 by John Weale, 59, High Holborn



## Processos modernos - Fornos Rotativos





### Moagem antes de entrar no Forno.

Por que moer os grãos até que o  $D_{\text{máx.}} \leq 80 \mu\text{m}$  antes da mistura entrar no forno !

Antes de tudo deve ser lembrado que não se deve imaginar a formação dos componentes do cimento por um processo de fusão. Deve ser usado um processo de **difusão** entre as partes sólidas.

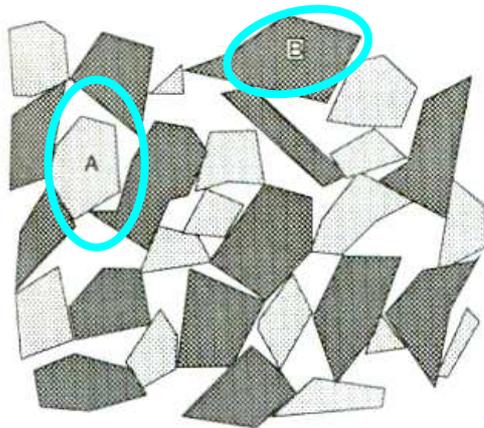


Figura a

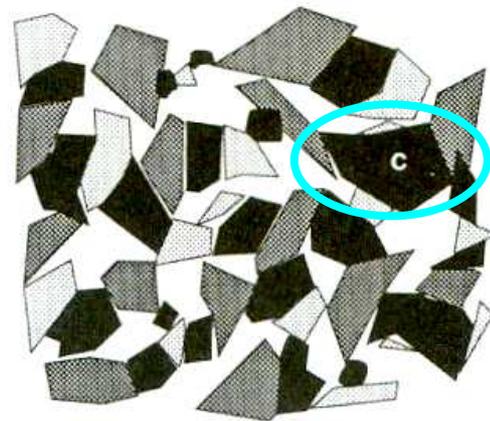
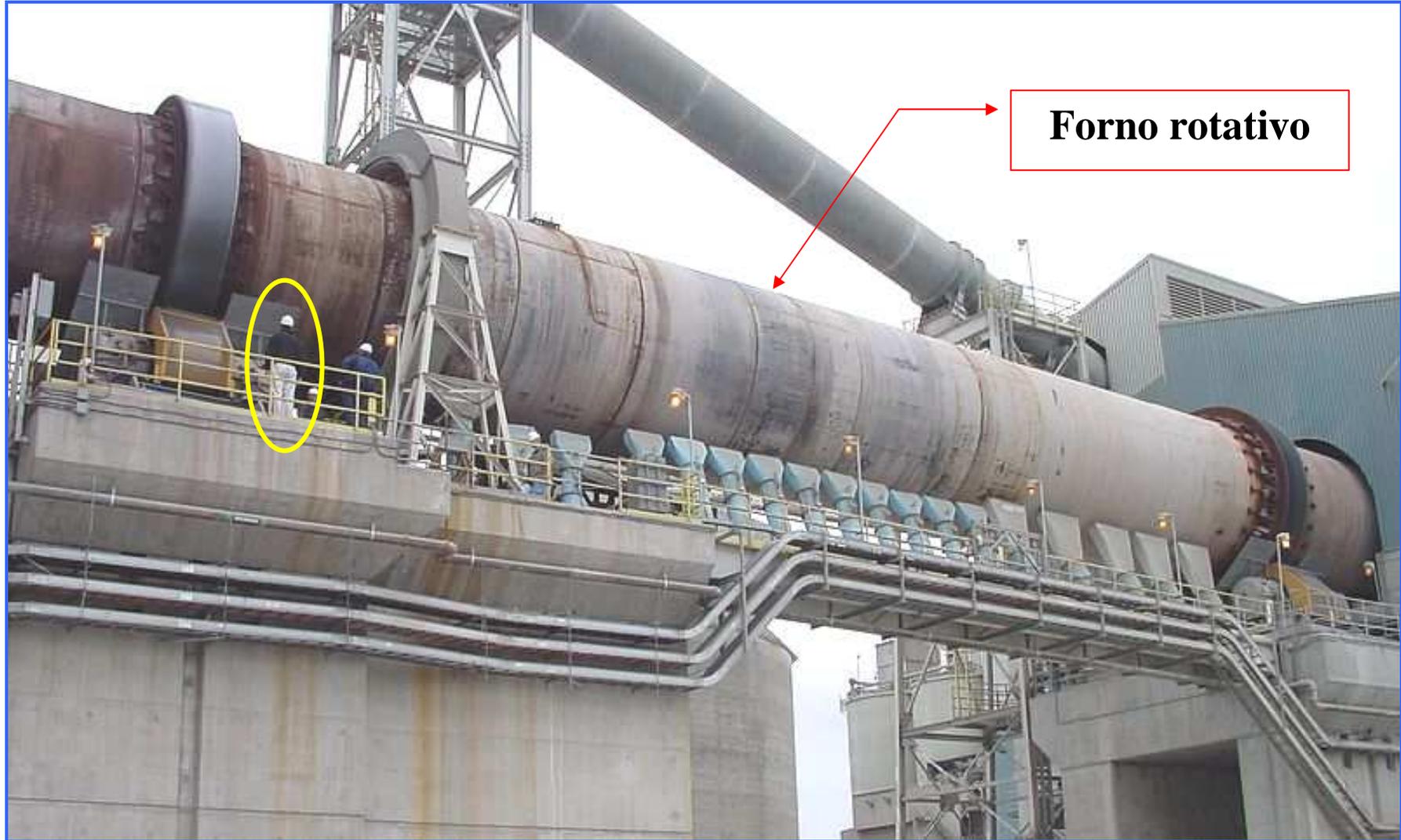


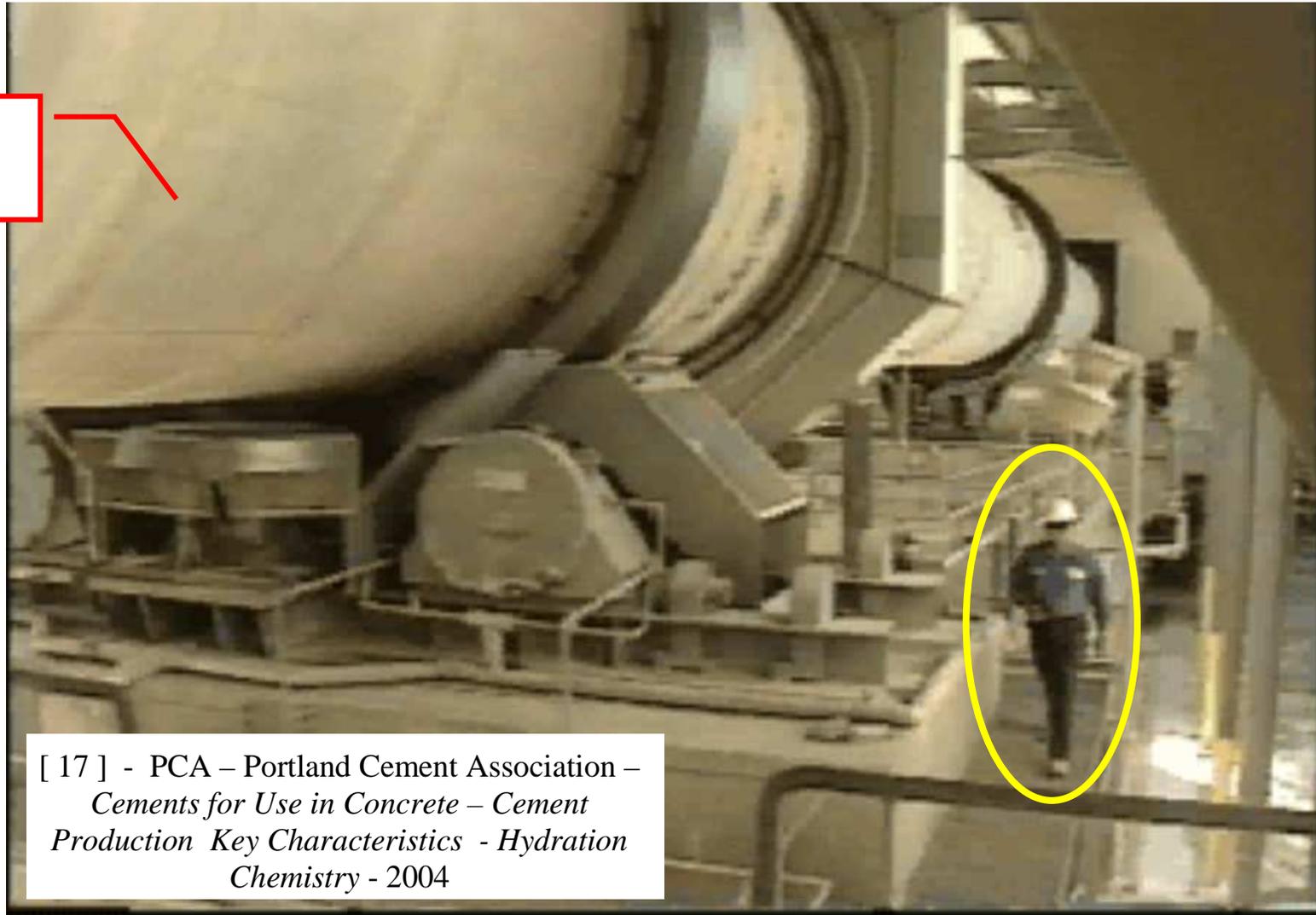
Figura b

- Para facilitar esse processo, os componentes básicos da mistura devem ser introduzidos no forno já finamente moídos ( $\phi < 80 \mu\text{m}$ ).
- Isso permite um maior contato entre as partículas das matérias primas.
- A mistura das matérias primas, como mostrado na figura acima, aumentada muitas vezes, consiste de partículas **A** e de partículas **B** dos diversos óxidos em contato,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc...
- Existem muitos vazios, mas existem também muitos contatos entre os vértices, as arestas e as faces dos grãos. Ver figura “a” acima . Ver [14].
- A reação entre esses óxidos binários ocorre pela migração dos íons entre os óxidos puros através dessas interfaces.
- Formam-se novas estruturas de novos óxidos. Ver partículas **C** na figura “b” acima.
- Nas reações entre os óxidos, os íons mais móveis são os cátions, porque eles são menores que os íons ânions.
- As reações no estado sólido envolvem a completa destruição da estrutura cristalina dos óxidos. Quanto mais alta a temperatura maior a mobilidade dos íons e mais rápida a reação entre os diversos óxidos.
- Esse processo é chamado de **sinterização**. Ver o detalhe no ANEXO 1 na página 33.

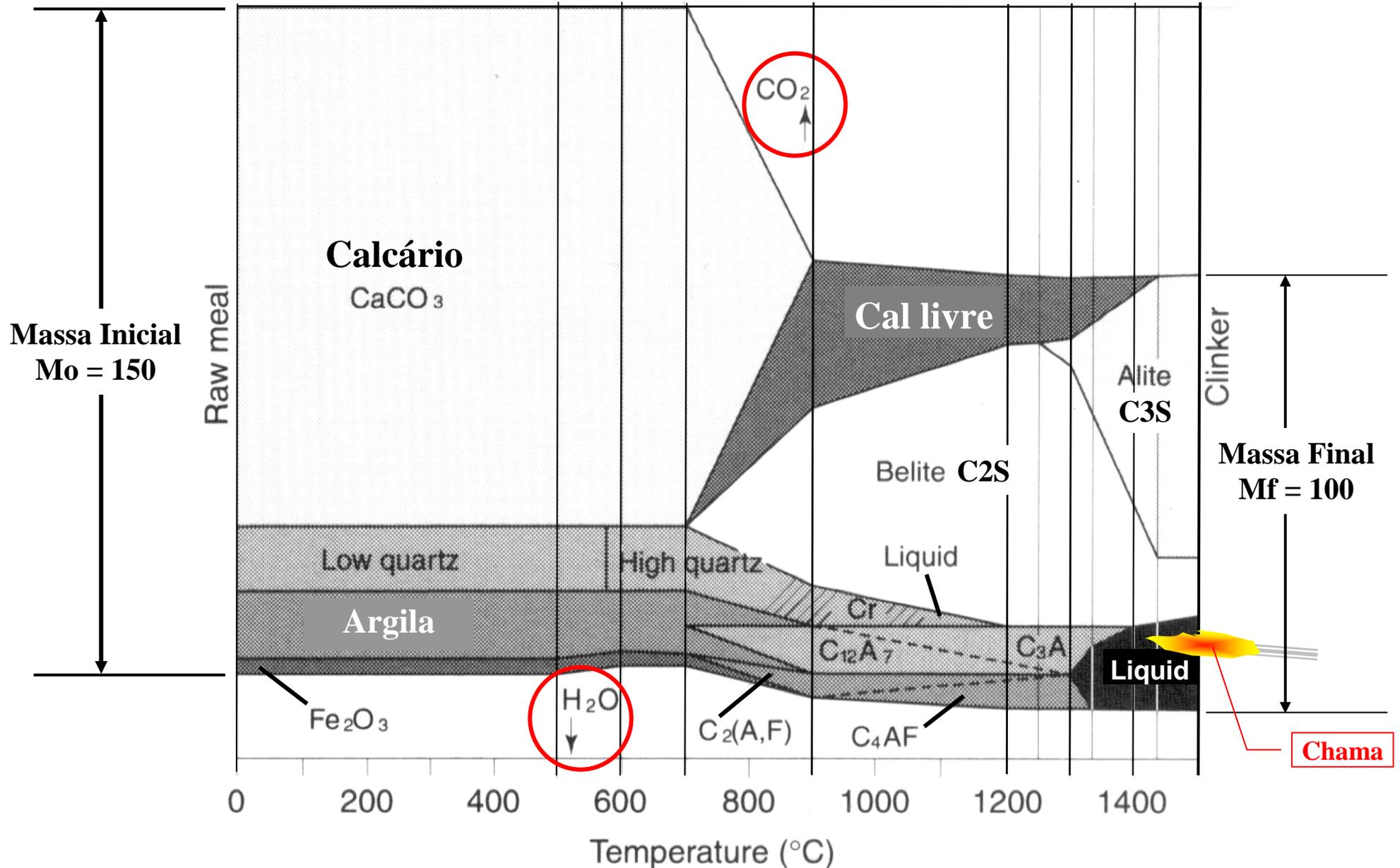




**Forno  
rotativo**



[ 17 ] - PCA – Portland Cement Association –  
*Cements for Use in Concrete – Cement  
Production Key Characteristics - Hydration  
Chemistry - 2004*





## Fabricação do clínquer do Cimento Portland

Antes de tudo deve ser lembrado que não se deve imaginar a formação dos componentes C2S e C3S por um processo de fusão. Deve ser usado um processo de difusão entre as partes sólidas.

Para facilitar esse processo, os componentes básicos da mistura devem ser introduzidos no forno já finamente moídos ( $\phi < 80 \mu\text{m}$ ).

À medida que os componentes da mistura avançam dentro do forno, a temperatura é maior e começam a ocorrer transformações químicas e mineralógicas.

Finalmente quando toda a cal CaO e toda a sílica SiO<sub>2</sub> tiverem sido transformadas em C2S e C3S, na zona de clínquerização, é necessário resfriar rapidamente o clínquer para manter o C2S e o C3S em suas formas altamente reativas.

É necessário “congelar” o estado de alta energia do C2S e do C3S. Se for feito um resfriamento lento o C3S se transforma “de volta” em C2S e esse C2S se estabiliza em um estado de baixa energia, tornando-se pouco reativo.

Pode-se observar, na figura acima, como essas reações ocorrem ao longo do forno. Essa figura foi desenvolvida pela firma KHD Humboldt Wedag, fabricante de fornos de cimento.

Os componentes básicos da mistura são o calcário, a argila, quartzo  $\beta$  e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

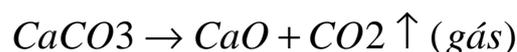
No eixo horizontal X está marcada a temperatura e no eixo vertical Y está marcada a quantidade ( massa) de cada material.

Inicialmente deve-se lembrar que a “clínquerização” ocorre com uma perda acentuada de massa dos componentes da mistura inicial. Essa perda de massa é devida à perda de CO<sub>2</sub> do calcário CaCO<sub>3</sub> e da H<sub>2</sub>O da argila.

Pode-se observar que para produzir 1,00 tonelada de clínquer deve-se introduzir no forno 1,50 toneladas de mistura inicial.

Segundo Aitcin [19], as reações e transformações que ocorrem dentro do forno são:

- A primeira transformação ocorre entre **500 °C e 600 °C**. É a perda de água da argila.
- A segunda transformação ocorre a **565 °C**, e tem poucas conseqüências, e corresponde à transformação do quartzo  $\beta$  (low quartz) em quartzo  $\alpha$  (high quartz).
- A transformação seguinte começa a **700 °C** e termina a **900 °C**, é a descarbonatação do calcário.



- Na temperatura de **700 °C** e seguintes, os primeiros grupos CaO liberados são muito ativos e começam a se combinar com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para produzir C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>.
- Na temperatura de **700 °C** e seguintes, os primeiros grupos CaO liberados são muito ativos e começam a se combinar também com alguns dos íons Fe<sup>3+</sup> e com Al<sup>3+</sup> para formar C<sub>2</sub>(A.F)
- Na temperatura de **700 °C** começa a se formar a belita C<sub>2</sub>S.

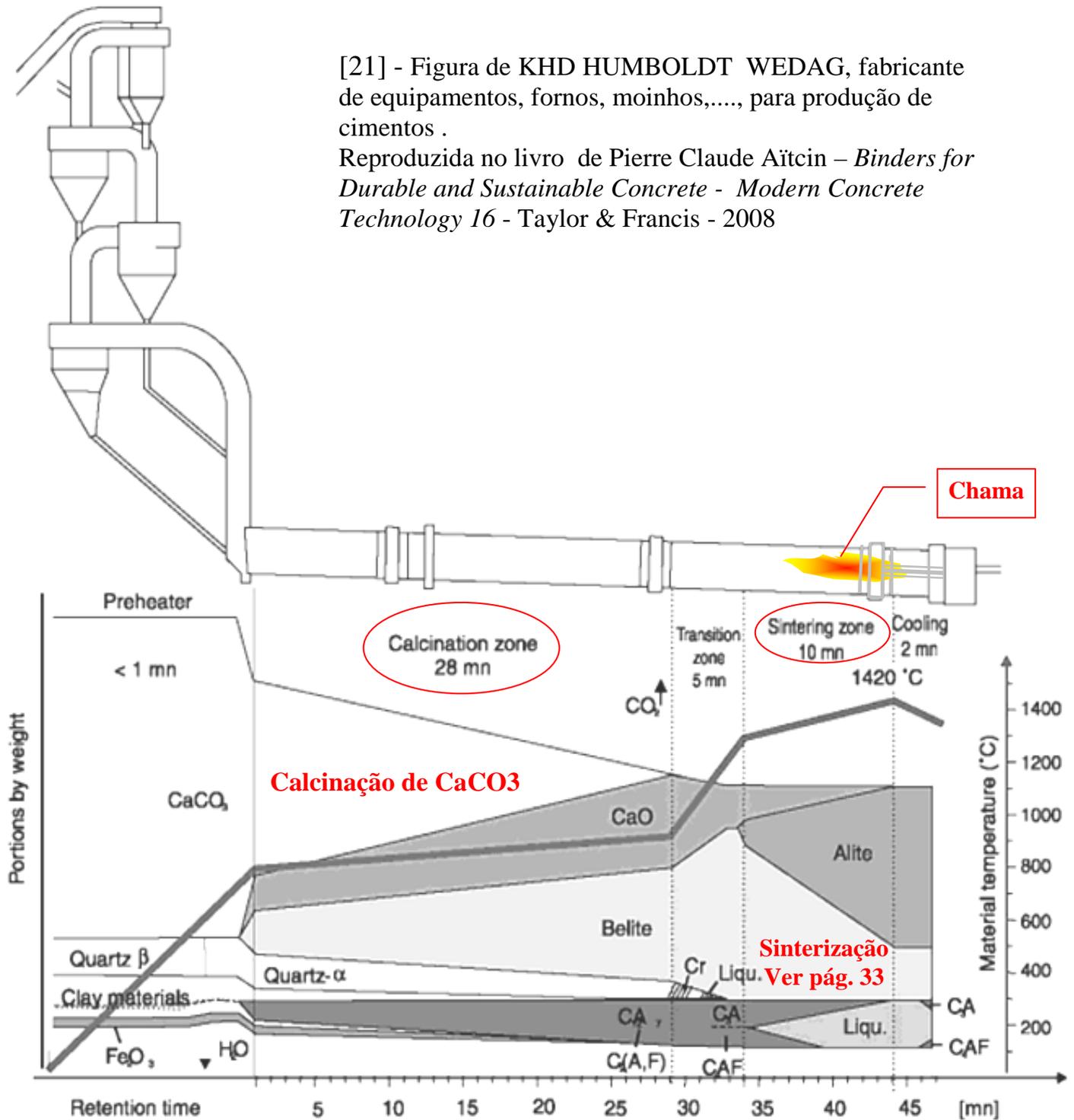


- Na temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$  :
  - todo o calcário  $\text{CaCO}_3$  já está descarbonatado  $\text{CO}_2 \uparrow$  ;
  - alguma alumina  $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$  já reagiu com a cal  $\text{C} = \text{CaO}$  para formar  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  ;
  - alguma cal  $\text{CaO}$  já reagiu com  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  para formar  $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$  ;
  - alguma cal  $\text{CaO}$  já reagiu com a sílica e formou a belita  $\text{C}_2\text{S}$ .
- Na temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$  existe ainda muita cal  $\text{CaO}$  não combinada e alguma sílica  $\text{SiO}_2$  na forma de quartzo.
- Acima de  $900^{\circ}\text{C}$ , aparecem os primeiros cristais de  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ .
- Acima de  $900^{\circ}\text{C}$ , o quartzo  $\alpha$  se transforma em cristobalita ( uma variedade mineral da sílica  $\text{SiO}_2$ , estável à alta temperatura ).
- A  $1100^{\circ}\text{C}$  a cristobalita funde e isso acelera sua combinação com a cal  $\text{CaO}$ .
- A  $1200^{\circ}\text{C}$  não existe mais nenhuma sílica livre.
- A  $1250^{\circ}\text{C}$  começam a se formar os primeiros cristais de  $\text{C}_3\text{S}$  (alita). Esses cristais se formam através da reação do excesso de cal livre  $\text{CaO}$  com os cristais de Belita já formados.
- A  $1300^{\circ}\text{C}$  a mistura de  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$  começa a fundir .
- A  $1325^{\circ}\text{C}$   $\text{C}_4\text{AF}$  desaparece.
- A  $1400^{\circ}\text{C}$   $\text{C}_3\text{A}$  desaparece.
- Durante esse período o material da fusão “Cálcio Ferro Alumínio” age como um catalisador da transformação da Belita em Alita pela facilitação da difusão dos íons de  $\text{Ca}^{2+}$  nos cristais de Belita  $\text{C}_2\text{S}$ .
- Acima de  $1425^{\circ}\text{C}$ , praticamente, não existe mais cal em excesso.
- No clínquer formado temos, na figura, 64% de Alita  $\text{C}_3\text{S}$ , 14% de Belita  $\text{C}_2\text{S}$  e 21 % de fase intersticial.
- Após a formação do clínquer é necessário resfriar rapidamente esse clínquer para “congelar” o  $\text{C}_3\text{S}$  e o  $\text{C}_2\text{S}$  no seu estado de grande reatividade. Dependendo da velocidade do resfriamento do clínquer, a fase intersticial terá tempo ou não para cristalizar. A observação ao microscópio das fases intersticiais do cimento dá uma informação sobre a velocidade de resfriamento do clínquer do cimento.
- Cada uma dessas reações se dá em um local do forno, como se pode observar na figura abaixo, preparada pela firma **KHD HUMBOLDT WEDAG [ 21]**, fabricante de fornos para produção de cimentos.



[21] - Figura de KHD HUMBOLDT WEDAG, fabricante de equipamentos, fornos, moinhos,....., para produção de cimentos .

Reproduzida no livro de Pierre Claude Aïtcin – *Binders for Durable and Sustainable Concrete - Modern Concrete Technology 16* - Taylor & Francis - 2008





## Queima do combustível no interior do forno.

Parte mais quente do forno :  $T=1450\text{ }^{\circ}\text{C}$



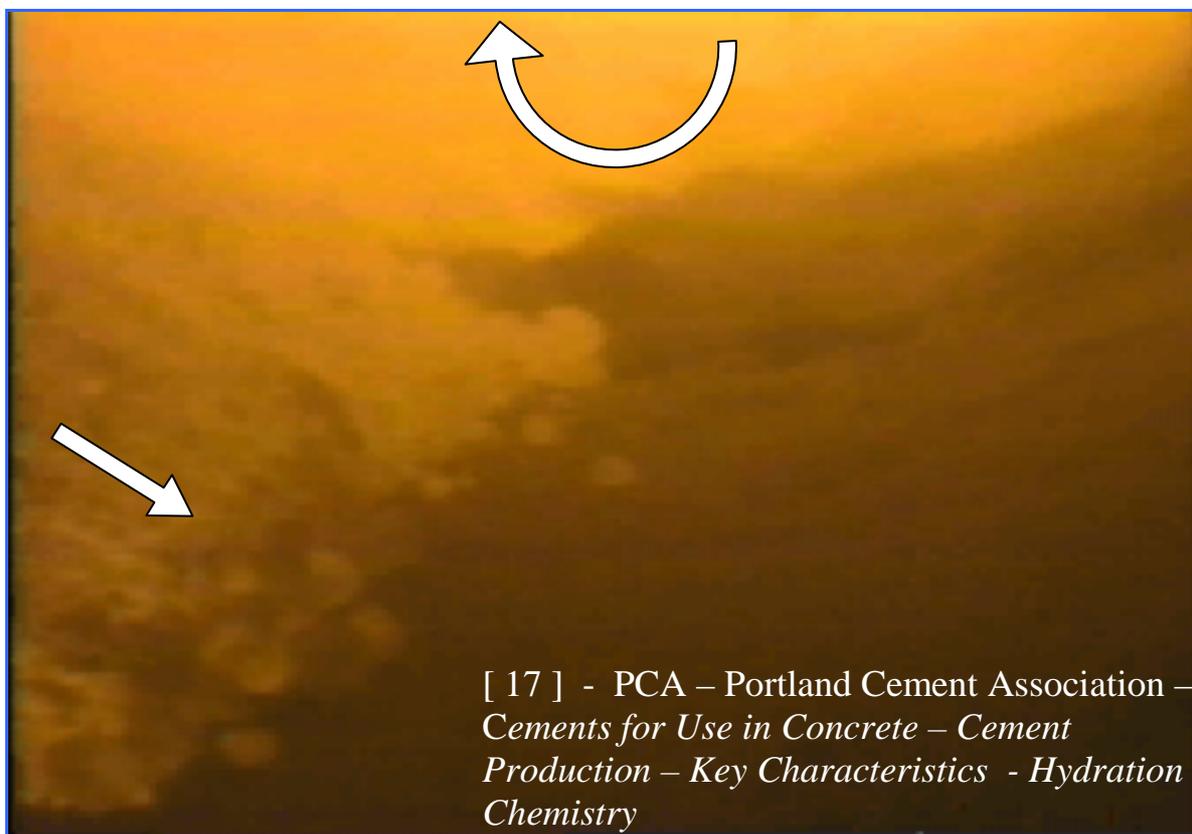
<http://www.khd.com/burning-technology.html>

### É a Zona de Sinterização

- Foto da firma **KHD HUMBOLDT WEDAG** [21], fabricante de fornos para fabricação de cimentos.
- <http://www.khd.com/burning-technology.html>
- <http://www.khd.com/grinding-technology.html>
- <http://www.khd.com/firing-systems.html>



Interior do forno rotativo



Interior do forno rotativo



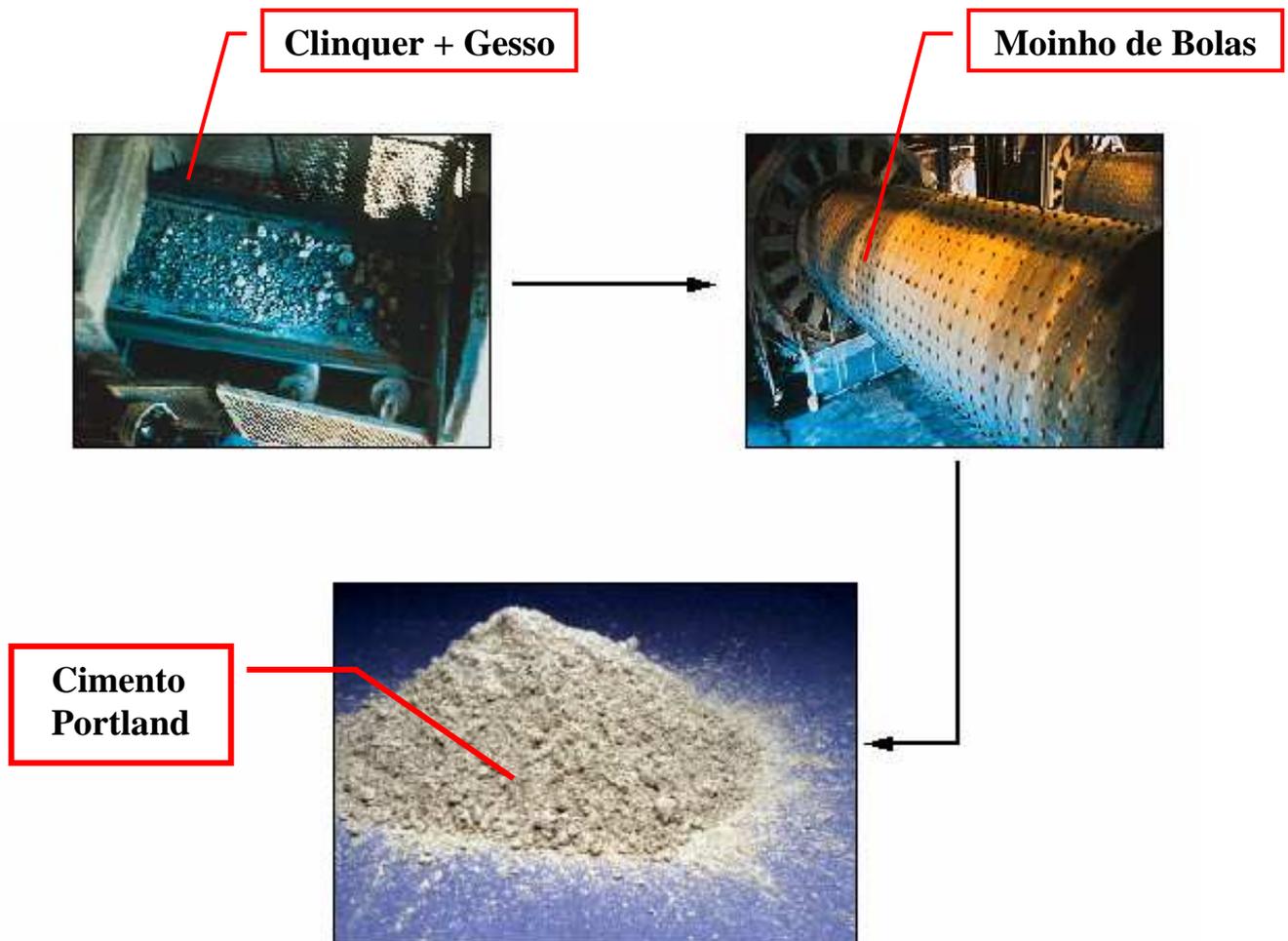
### **Testando a mistura de dentro do forno.**



[ 17 ] - PCA– Portland Cement Association –Training Program on Cement and  
Concrete Technology - 2004



### Moagem final : Clinquer com Gesso



[17] - **PCA – Portland Cement Association** – CD of Training Program on Cement and Concrete Technology - *Cements for Use in Concrete – Cement Production – Key Characteristics - Hydration Chemistry* – ASTM C 150 - ASTM C 595 - ASTM C 1157 – 2004



## Composição e Diagramas de Fase do Clínquer.

Composição do Clínquer dos Cimentos Portland

	Óxido	Abrevia- tura	Faixa de composição do Clínquer dos cimentos Portland atuais (%)	Exemplo de um cimento Portland atual (%)	Cais hidráulicas naturais de Vicat [15] Anos : 1812 a 1818		
					Teor médio (%)	Cal com maior resis- tência	Cal com pega mais rápida
Cal	Ca O	C	59 a 67	65,7	64,0	68,7	50,9
Sílica	Si O <sub>2</sub>	S	16 a 26	20,9	23,0	18,3	36,8
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	4 a 8	4,8	10,8	11,0	11,2
Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	2 a 5	3,0	1,9	2,0	1,1
Magnésio	Mg O	M	0,8 a 6,5	1,9	0,4		
Potássio	K <sub>2</sub> O	K	0 a 1,5	0,6			
Sódio	Na <sub>2</sub> O	N	0 a 1,5	0,6			
Enxofre	SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$	0,5 a 1,2	2,5			

Segundo **Bogue, Robert Herman** ( 1929 ) – [3] , os componentes do clínquer podem ser estimados pelas fórmulas.

**Componentes do Clínquer** ( composição em % de peso ):

$$C_3S = 4,071 \cdot CaO - 7,600 \cdot SiO_2 - 6,718 \cdot Al_2O_3 - 1,430 \cdot Fe_2O_3 - 2,852 \cdot SO_3$$

$$C_2S = 2,867 \cdot SiO_2 - 0,7544 \cdot C_3S$$

$$C_3A = 2,650 \cdot Al_2O_3 - 1,692 \cdot Fe_2O_3$$

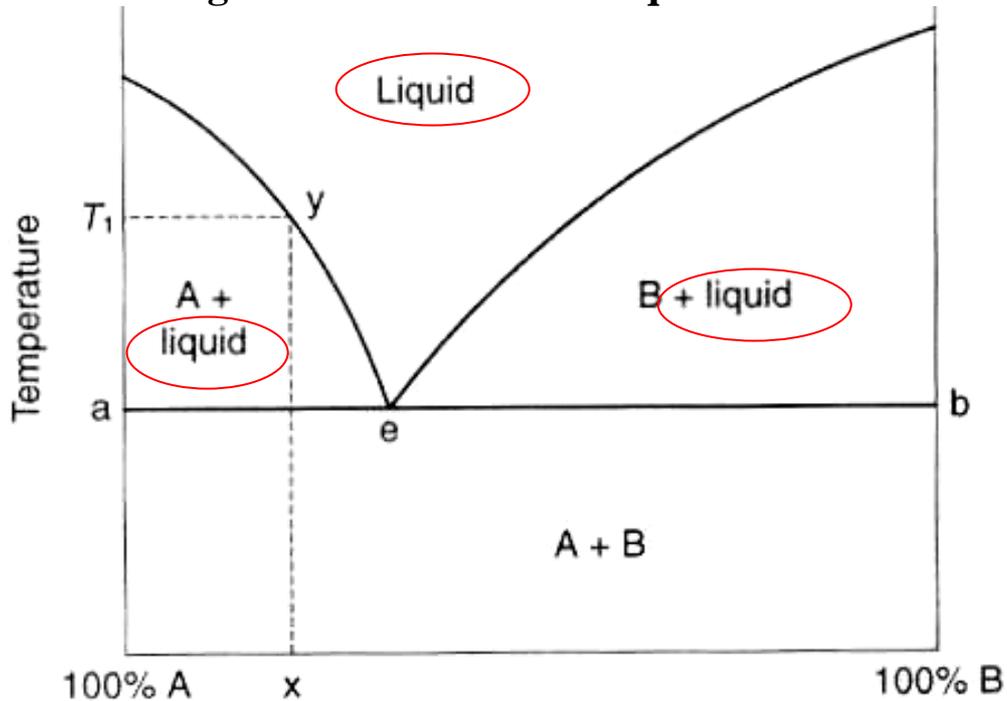
$$C_4AF = 3,043 \cdot Fe_2O_3$$

Essas fórmulas ainda são adotadas pela Norma ASTM C 150-1994.

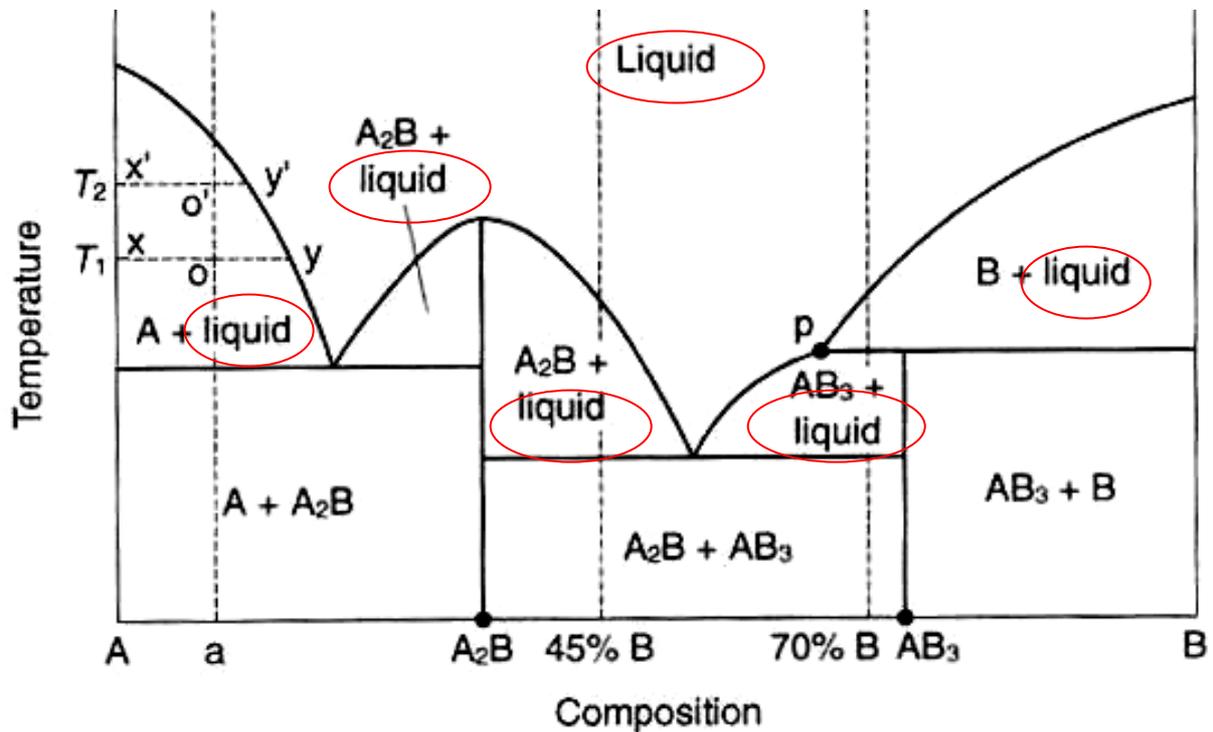
$$C = CaO , A = Al_2O_3 , S = SiO_2 , H = H_2O , F = Fe_2O_3 , \bar{S} = SO_3$$



### Caso Geral - Diagrama de Fases no Clinquer do Cimento Portland



Sistema Binário A-B sem composição intermediária AB  
A mistura de dois elementos diminui o ponto de fusão.

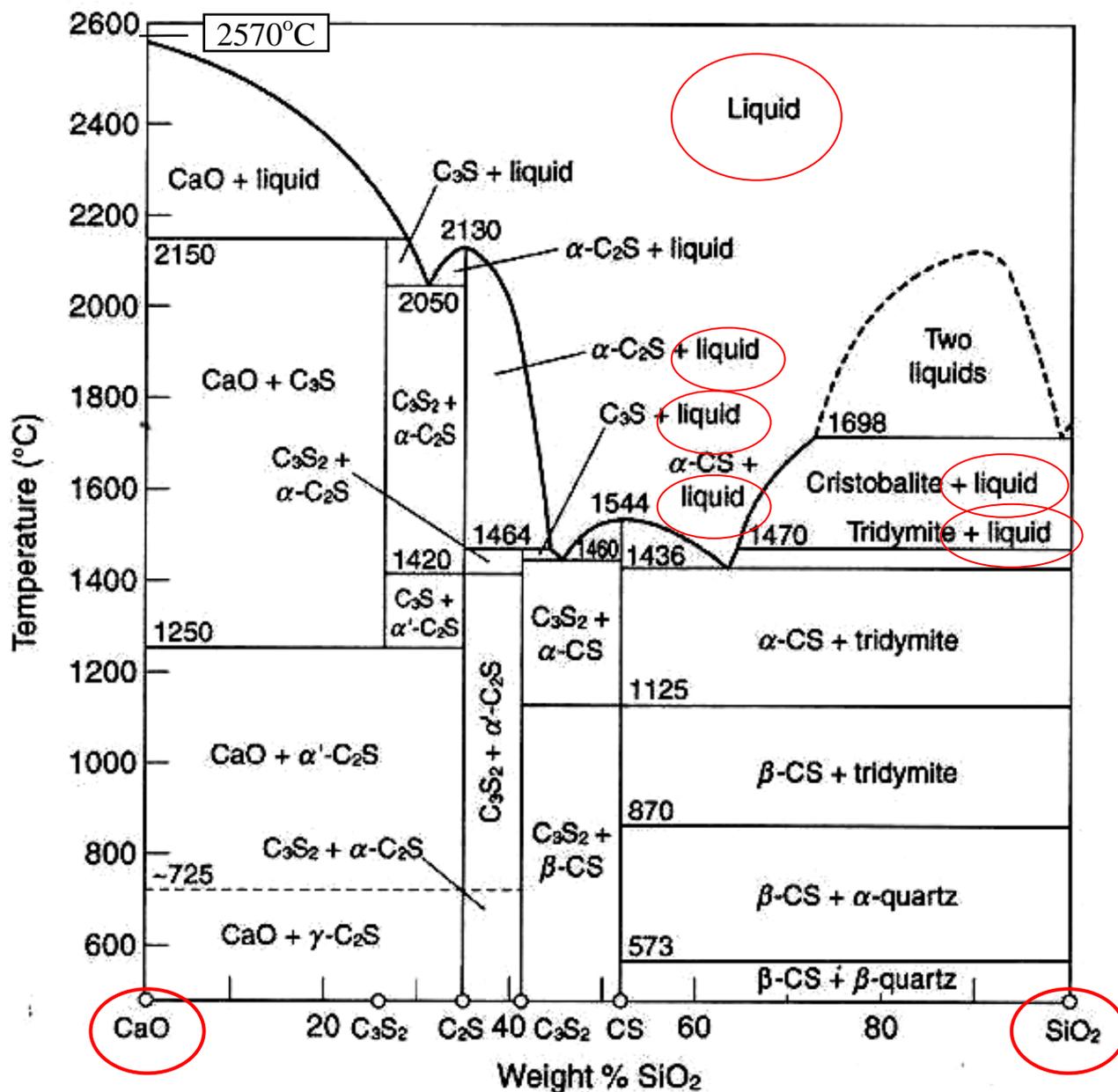


Caso Geral - Sistema Binário A-B contendo 2 fases binárias  $A_2B$  e  $AB_3$



## Diagrama de Fases no Clinquer do cimento Portland

Eixo CaO – SiO<sub>2</sub>

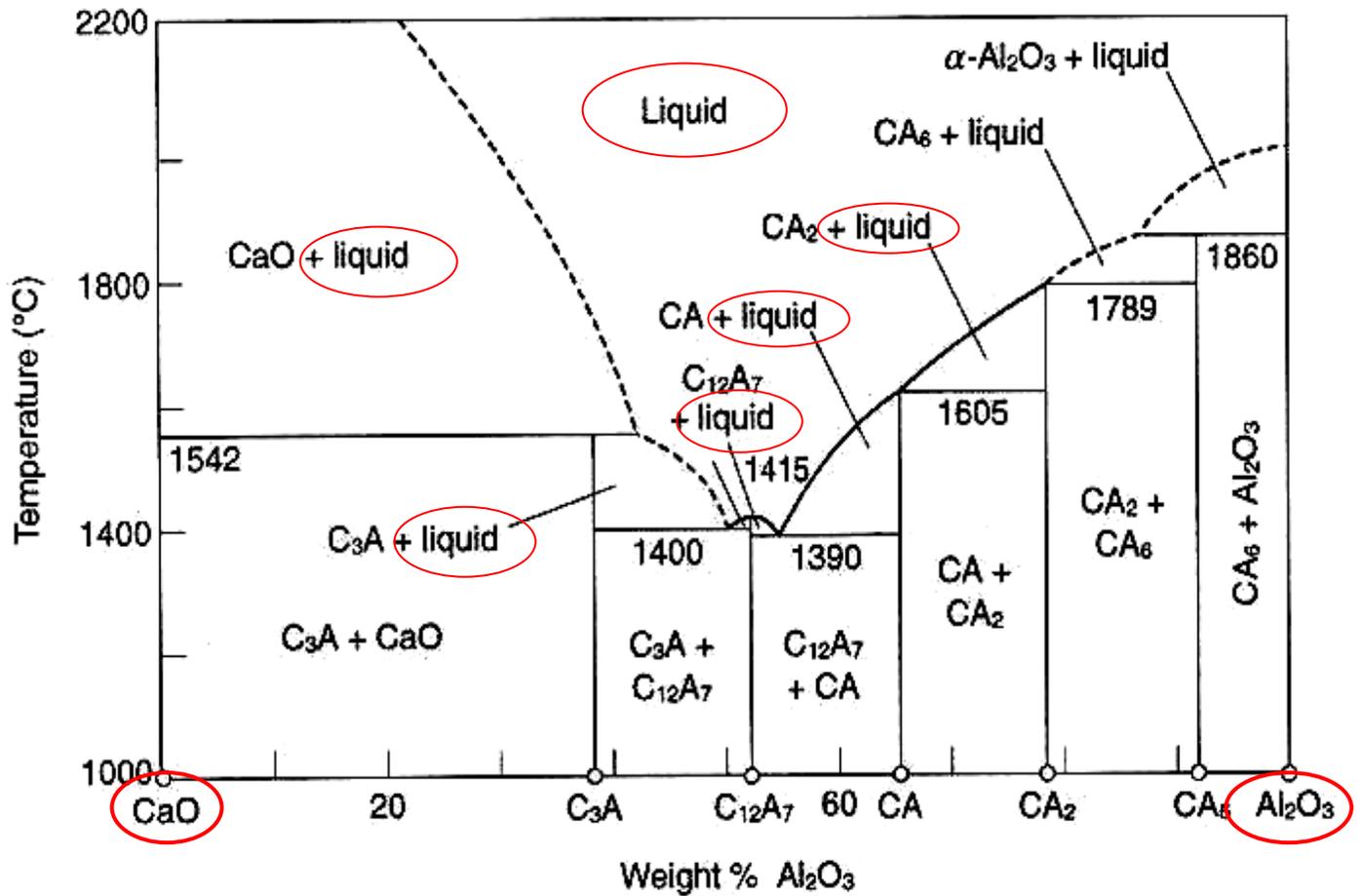


Ver [1] – Lea's Chemistry of Cement



## Diagrama de Fases no Clinquer do Cimento Portland

Eixo CaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

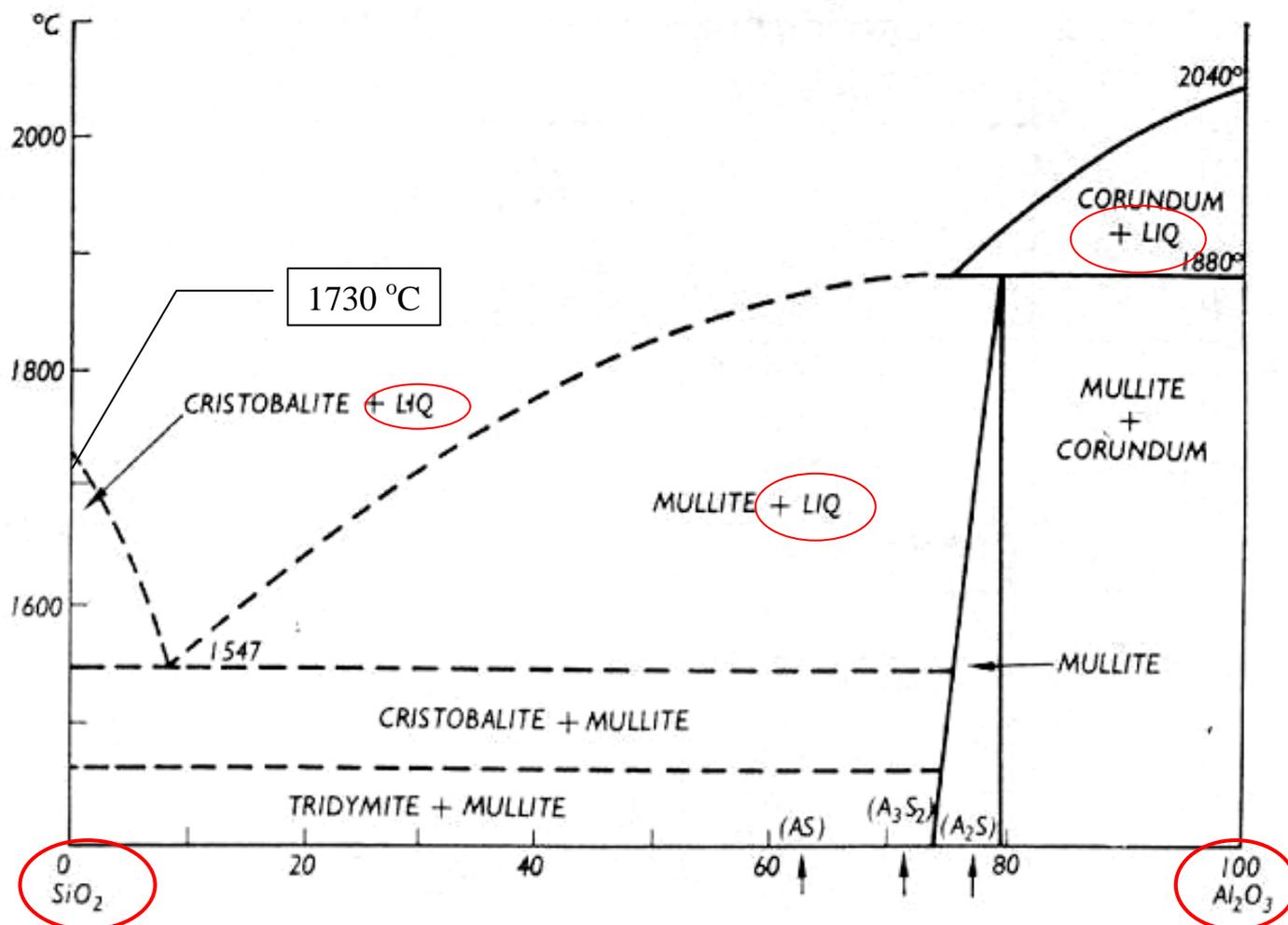


Ver [1] – Lea's Chemistry of Cement



### Diagrama de Fases no Clinquer do Cimento Portland

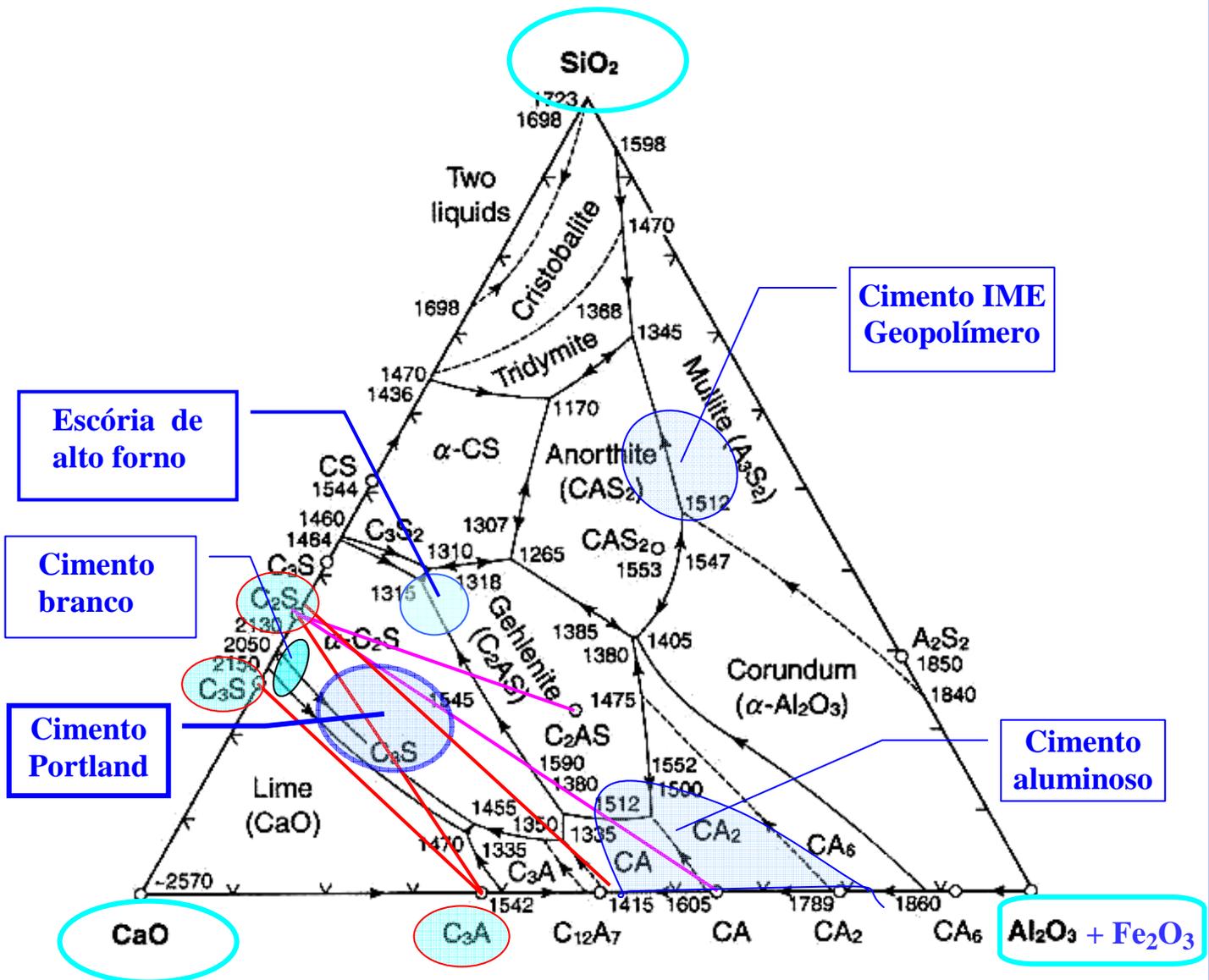
Eixo  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$



Ver [1] – Lea's Chemistry of Cement



Diagrama 2D de Fases do Clinquer do Cimento Portland, antes de misturar com o gesso. ( Composição x Temperatura )

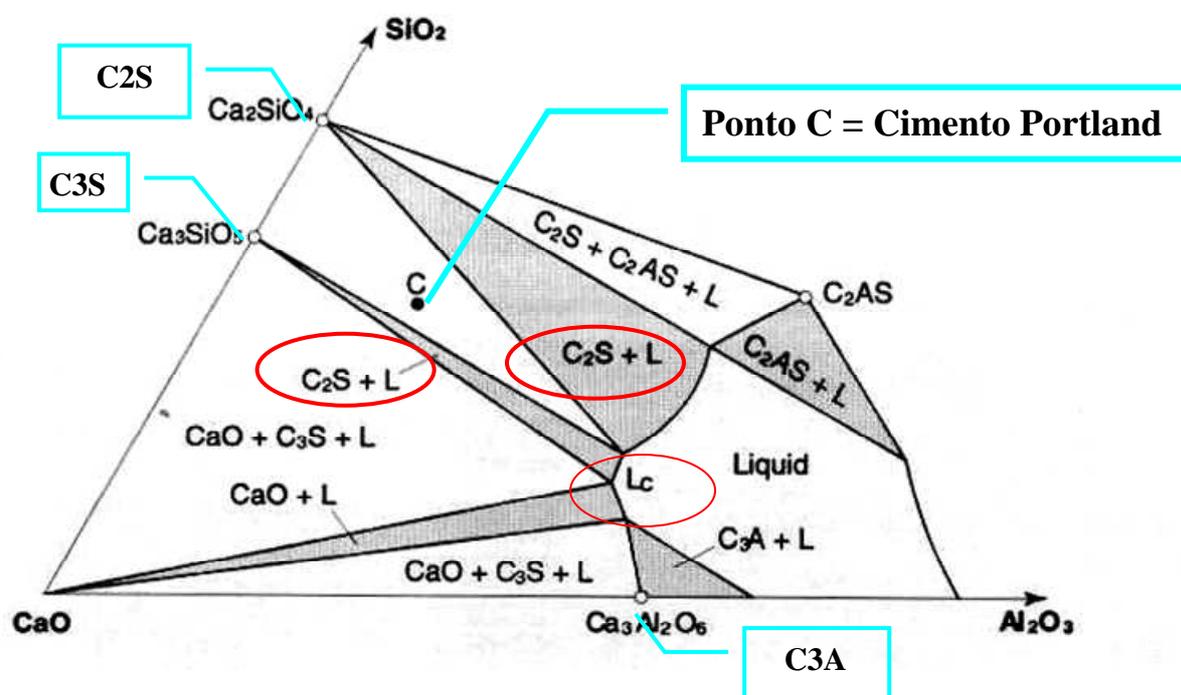


Sistema  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

- O sistema  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  foi estudado e pesquisado pelo *Geophysical Laboratory - Carnegie Institute* de Washington, de 1906 a 1915. Foram pesquisados 300 sistemas de minerais formadores de rochas.
- Pesquisa divulgada por Rankin, G.A. and Wright, F.E. , *American Journal of Science* 39,1 (1915) . Ver [3], Bogue, R.H.-1955
- Para locar o cimento Portland no sistema ternário acima, somam-se os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Segundo Lea [2] essa aproximação é aceitável.



Diagrama 2D de Fases do Clinquer do Cimento Portland, antes de misturar com o gesso. ( Composição com Temperatura = 1500°C )



Isoterma de 1500 °C da parte do sistema  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , importante para a fabricação do cimento Portland. Ver Lea's Cement Chemistry [1]

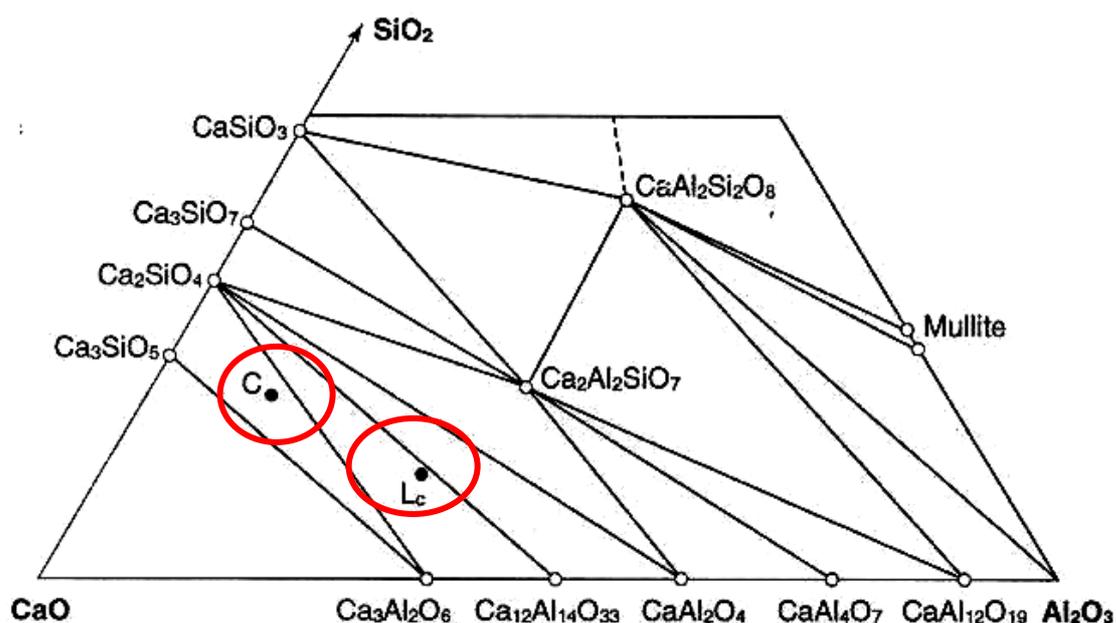
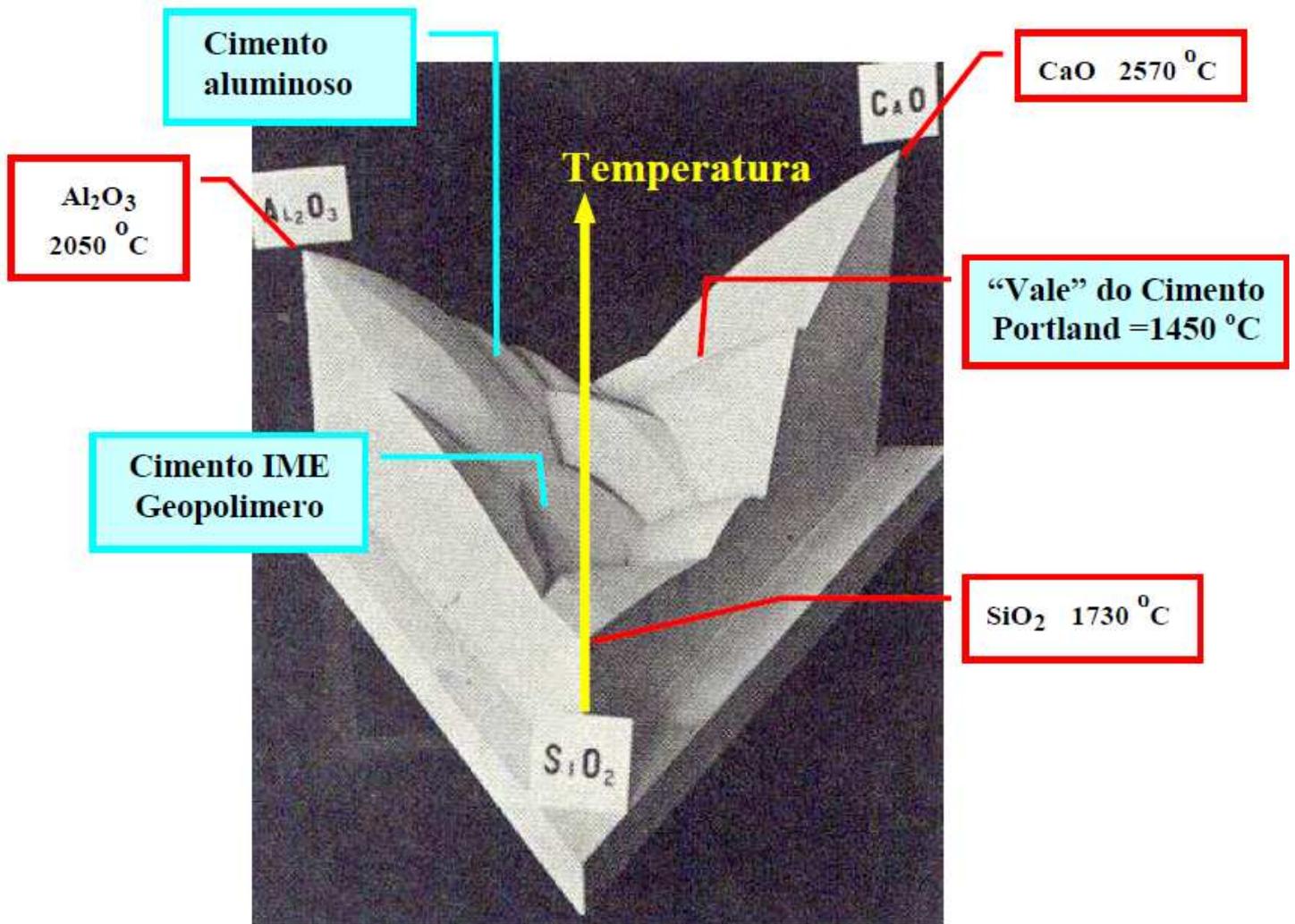


Diagrama Sub-Sólidos da parte do sistema  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , mostrado na figura anterior. Ver Lea's Cement Chemistry [1]



Diagrama 3D de Fases do clínquer do Cimento Portland, antes da mistura com o gesso. ( Composição X Temperatura )



Perspectiva do modelo 3D

Sistema  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  - Ver [2] Lea - 1971



Componentes do Cimento Portland, Ver [1].

Componente	Cimento Portland atual			Vicat [15] Cais naturais Anos 1812 a 1818	Cimento IME Geopolímero [25]
	Teor mínimo	Teor médio	Teor máximo	Teor médio	Teor médio
CaO	58,10	64,18	68,00	(64,2)	12,4
CaO = Cal livre	0,03	1,243	3,68	---	---
SiO <sub>2</sub>	18,4	21,02	24,5	(23,1)	44,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1	5,04	7,56	(10,8)	22,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	2,85	5,78	(1,9)	0,6
MgO	0,02	1,67	7,10	---	0,3
SO <sub>3</sub>	0	2,58	5,35	---	0,5
Na <sub>2</sub> O	0	0,24	0,78	---	8,2
K <sub>2</sub> O	0,04	0,70	1,66	---	10,2



Temperatura de fusão dos componentes do cimento Portland.

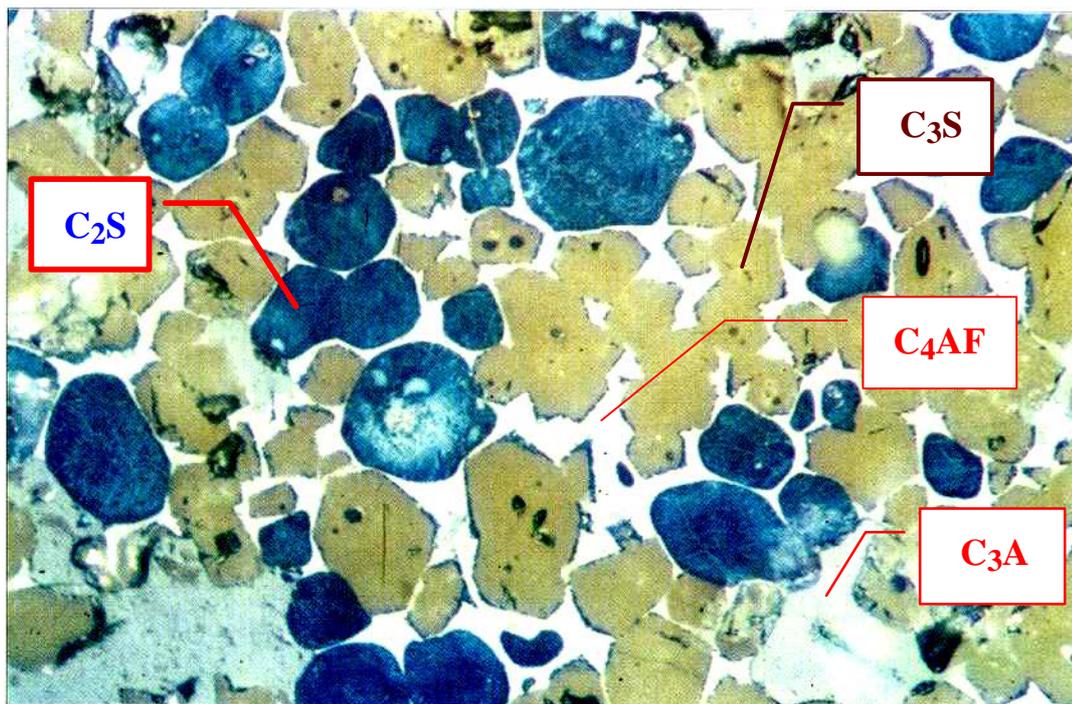
Fases	Reação	Composição (%)			Temperatura de fusão (°C)
		CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
CaO	Fusão	100			2570
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fusão		100		2050
SiO <sub>2</sub>	Fusão			100	1713
C3S	Dissociação	73,68		26,32	1900
C2S	Fusão	65,11		34,89	2130
C2S	$\alpha - \alpha'$				1425
C2S	$\alpha' - \beta$				670
C2S	$\beta - \gamma$				525
C3S <sub>2</sub>	Dissociação	58,33		41,67	1475
CS	Fusão	48,27		51,73	1544
C3A	Dissociação	62,26	37,74		1535
C12A7	Fusão	48,53	51,47		1455
CA	Fusão	35,48	64,52		1600
CA <sub>2</sub>	Dissociação	21,57	78,43		1720
CaO-C2S	Eutético	67,5		32,5	2065
C2S-C3S <sub>2</sub>	Reação	55,32		44,68	1464
CaO-C3A	Reação	57	43		1535
C3A-C12A7	Eutético	50	50		1395
CaO-C3S-C2S	Reação	68,4	9,2	22,4	1900
CaO-C3S-C3A	Reação	59,7	32,8	7,5	1470
C3S-C2S-C3A	Reação	58,3	33,0	8,7	1455
C2S-C3A-C12A7	Eutético	52,0	41,2	6,8	1335



## Micrografias da microestrutura do clínquer do cimento.

Petrografia do Clínquer do Cimento Portland.

Ver [13] - *Donald. A. St John* - 1998



- *Micrografia ótica do clínquer do cimento Portland (não hidratado).*
- Largura do campo = 0.60 mm
- Castanho  $\equiv$   $C_3S$   $\equiv$  Alita
- Azul  $\equiv$   $C_2S$   $\equiv$  Belita
- A matriz é composta de:
  - Cinza Claro  $\equiv$   $C_3A$   $\equiv$  Tri-cálcio Aluminato
  - Branco  $\equiv$   $C_4AF$   $\equiv$  Ferrita  $\equiv$  Cálcio Alumino-Ferrita

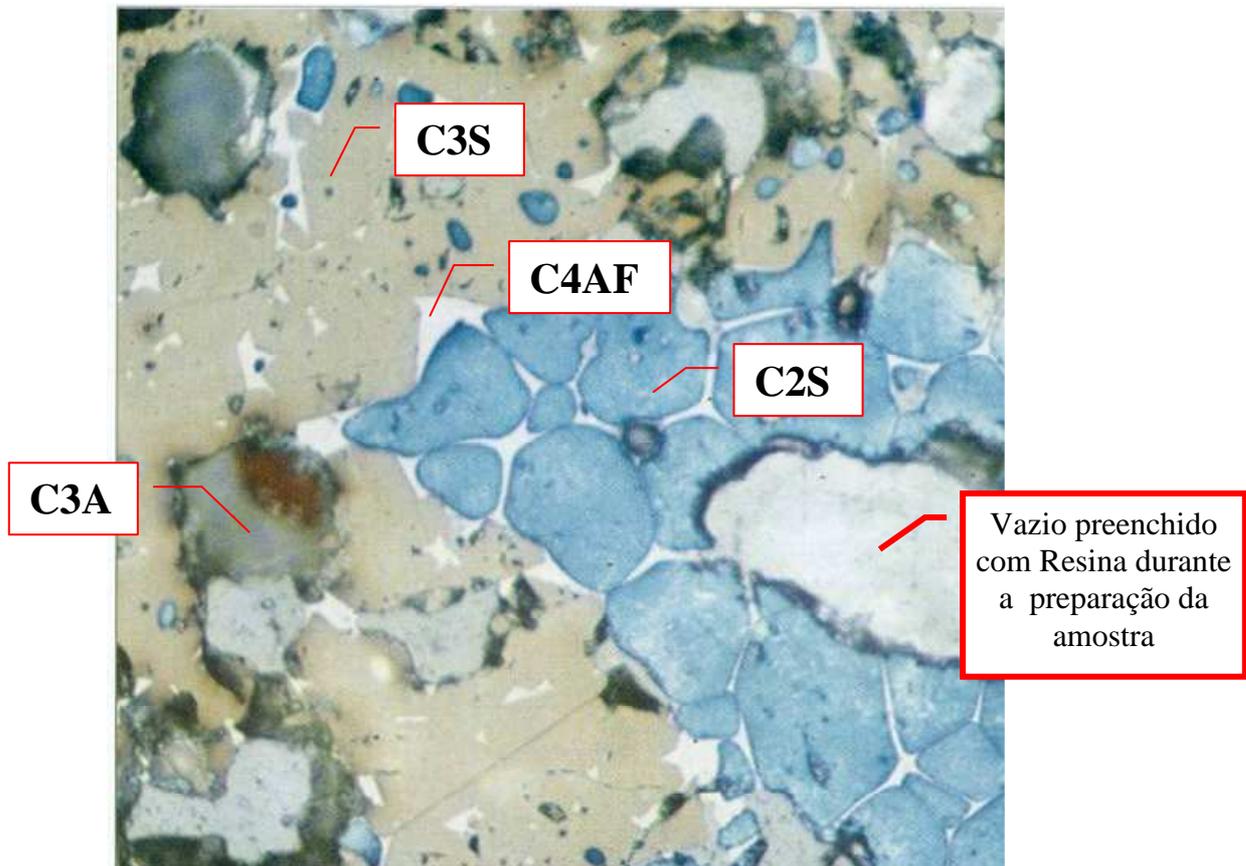
Terminologia :





## Petrografia do Clínquer do Cimento Portland.

Ver [13] - *Donald. A. St John* - 1998



- *Micrografia ótica ( luz refletida ) do clínquer do cimento Portland não hidratado.*  
Largura do campo = 0.68 mm

**C** = CaO ; **A** = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; **S** = SiO<sub>2</sub> ; **H** = H<sub>2</sub>O ; **F** = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ;  $\bar{S}$  = SO<sub>3</sub>

Segundo as fórmulas de [Bogue, Robert Herman](#) ( 1929 ), adotadas pela Norma ASTM C 150-1994. Ver [3].

**Composição em peso :**

**C<sub>3</sub>S** = 4,071 · CaO – 7,600 · SiO<sub>2</sub> – 6,718 · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1,430 · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,852 · SO<sub>3</sub>

**C<sub>2</sub>S** = 2,867 · SiO<sub>2</sub> – 0,7544 · C<sub>3</sub>S

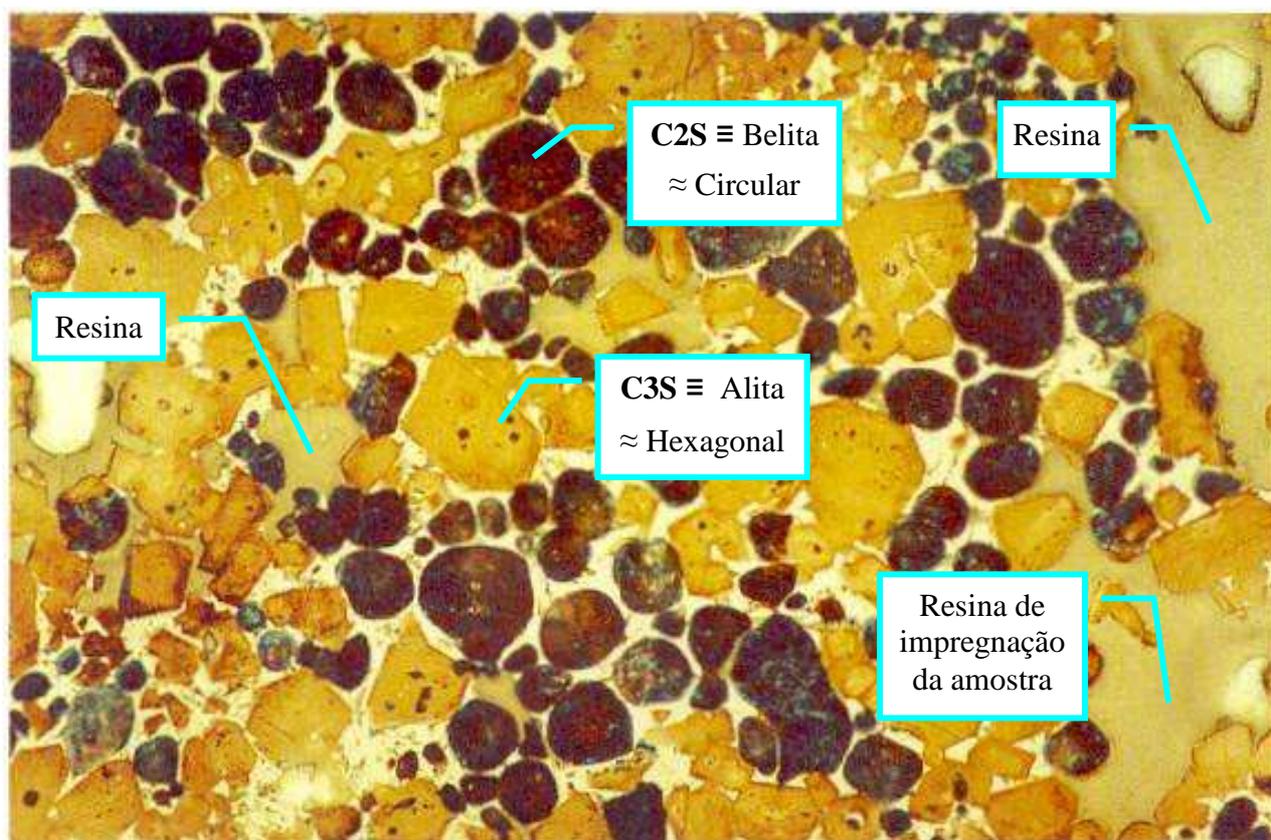
**C<sub>3</sub>A** = 2,650 · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1,692 · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**C<sub>4</sub>AF** = 3,043 · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



## Textura do clínquer do cimento Portland

Ver [1] - *Lea's Chemistry of Cement*.



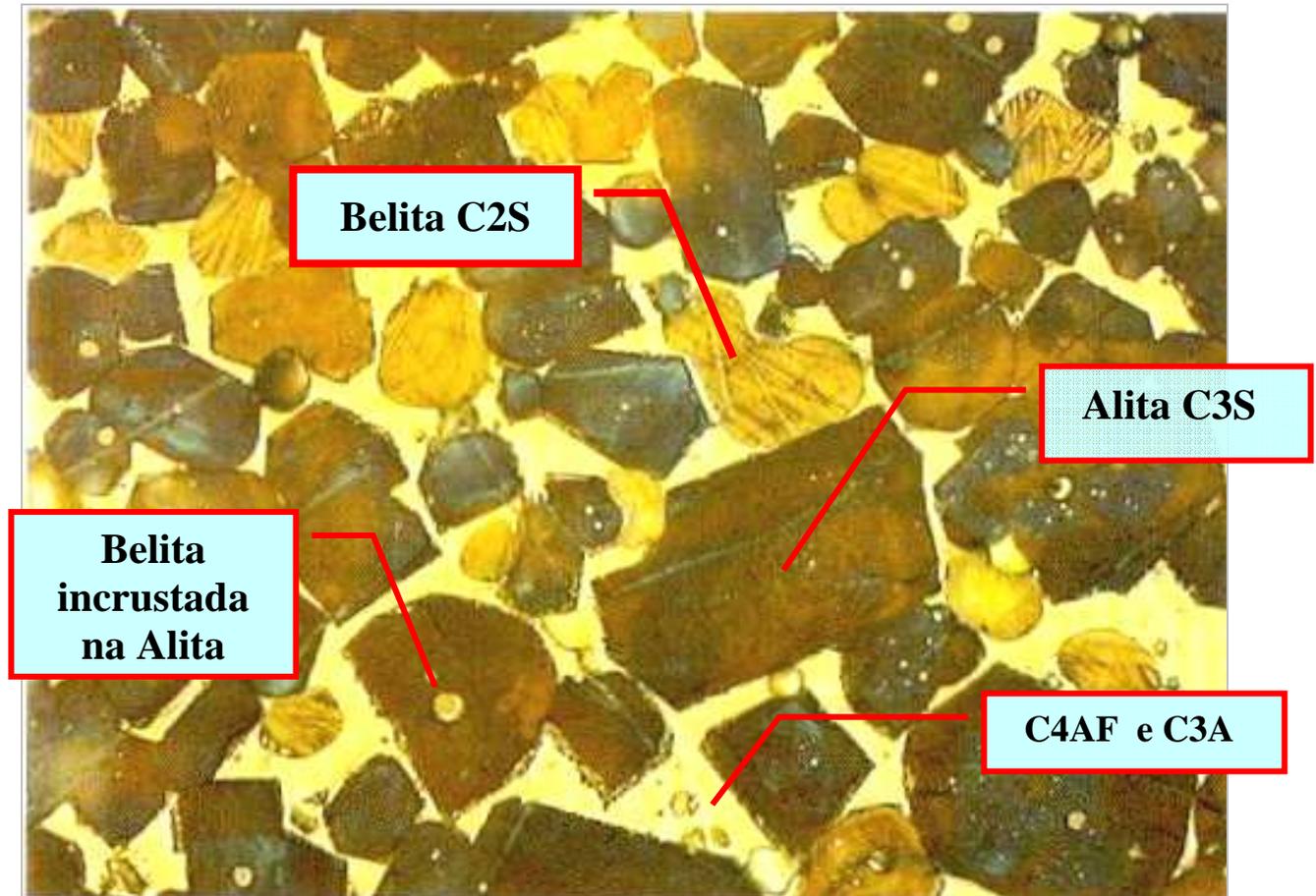
*Micrografia ótica, luz refletida, do clínquer do cimento Portland não hidratado.*

- Largura do campo : 0,19 mm = 190  $\mu\text{m}$  ( espessura de 2 folhas de papel )
- Os cristais cor de bronze mostrando forma hexagonal são C3S ( Alita ).
- Os cristais escuros e arredondados são C2S ( Belita ).
- A massa entre os grãos de C3S e C2S é composta de ferrita C4AF e de C3A
- As bolhas são de resina epóxi usada na preparação da amostra.



## Textura do clínquer do cimento Portland

Ver [1] - *Lea's Chemistry of Cement*.



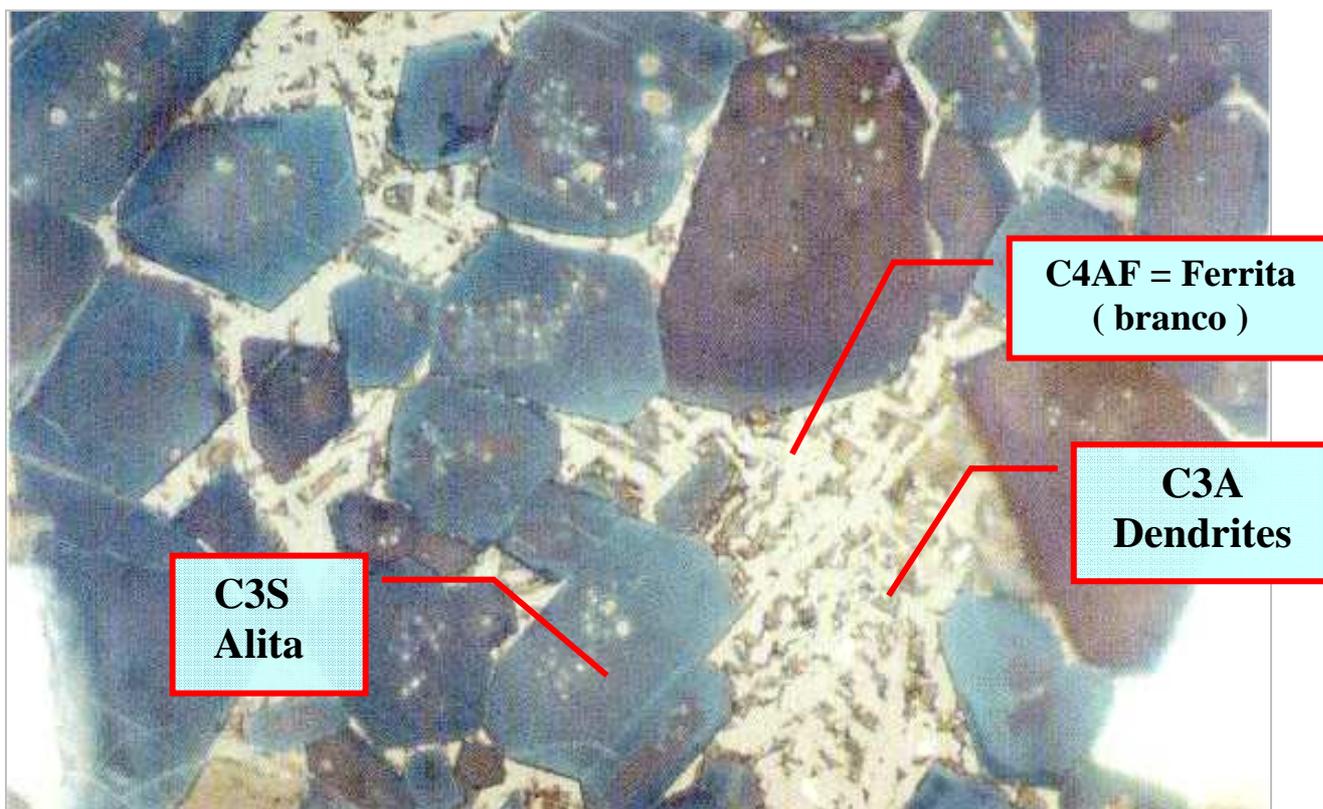
*Micrografia ótica, com luz refletida, do clínquer do cimento Portland não hidratado.*

- Largura do campo : 0,17 mm = 170  $\mu\text{m}$  (  $\approx$  espessura de duas folhas de papel ).
- Os cristais com forma prismática, são C3S ( Alita ).
- Os cristais arredondados são C2S ( Belita ).
- A massa entre os grãos de C3S e C2S é composta de ferrita ( C4AF ) e de C3A.



## Textura do clínquer do cimento Portland

Ver [1] - *Lea's Chemistry of Cement*.



*Micrografia ótica, com luz refletida, do clínquer do cimento Portland não hidratado.*

- Cristalização da fase intersticial. Nessa micrografia a textura é dendrítica.
- Largura do campo : 97  $\mu\text{m}$  (  $\approx$  espessura de uma folha de papel ).
- Os cristais com forma prismática, são C3S ( Alita ).
- Os cristais escuros e arredondados são C2S ( Belita ).
- Fase intersticial em forma dendrítica (forma de uma árvore com seus galhos )
- As dendrites (em forma de galhos) são C3A, ou mistura de C3A com C2S.
- A massa clara é ferrita ( C4AF)



## Textura do clínquer do cimento Portland

Ver [1] - *Lea's Chemistry of Cement.*



*Micrografia ótica, luz refletida, do clínquer do cimento Portland não hidratado.*

- Largura do campo: 97  $\mu\text{m}$  (  $\approx$  espessura de uma folha de papel ).
- A belita ( C<sub>2</sub>S ) aparece em ninhos. Esses ninhos provavelmente se formaram a partir de grandes cristais de quartzo que reagiram com a cal e com a argila, formando belita e uma grande quantidade de material intersticial fundido.
- Os cristais de alita são fortemente agrupados em zonas.
- O ataque químico, feito na amostra, mostra diferenças de composição na alita (C<sub>3</sub>S) . Essa diferença aparece como diferença no sombreamento.



## ANEXO 1 - SINTERIZAÇÃO

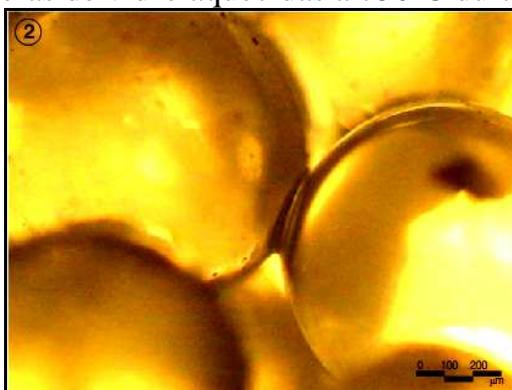
[www.cienciadosmateriais.org](http://www.cienciadosmateriais.org) Laboratório LMDM - CETEC-MG

Exemplo : Sinterização de microesferas de vidro.



Microesferas de vidro com 1mm de diâmetro, à temperatura ambiente.

Microesferas de vidro aquecidas a 750°C durante uma hora.



As microesferas, com 1mm de diâmetro, **coalecem** e pode-se notar a formação dos “pescoços” nos pontos de contato das esferas



As microesferas, com 1mm de diâmetro, **sinterizam** e apresentam os “pescoços” característicos do processo de sinterização.



### Referências :

1. Lea's *Chemistry of Cement and Concrete* Fourth Edition  
Editor: Peter C. Hewlett Editora Arnold – 1998
2. F.M.Lea – *The Chemistry of Cement and Concrete* – First Edition 1935  
Chemical Publishing Co., Inc. - Third edition - 1971
3. Bogue, Robert Herman – *The Chemistry of Portland Cement*  
Reinhold Publissing Corporation – 1955
4. J. Bensted and P. Barnes - *Structure and Performance of Cements* – second edition –  
2002 Edited by J. Bensted and P. Barnes – SPON PRESS
5. Holdercim – José Eduardo Kattar – Nilton Jorge Almeida - *Cimento Portland* .- 1997
6. Dale P. Bentz - Building and Fire Research Laboratory- NIST -National Institute of  
Standards and Technology – J. Am. Ceram. Soc. 80 [1] 3-21 (1997)
7. V.S. Ramachandran & James J. Beaudoin “*TEM Studies of Cement Hydration* ”  
Noyes Publications – 2001
8. G.W.Groves - *Microstructural Development During Hydration of Cement* –  
Oxford University - *Materials Research Society* - Volume 85 -1987
9. Dale P. Bentz - *Three- Dimensional Computer Simulation of Portland Cement  
Hydration and Microstructure Development.-* Building and Fire Research Laboratory  
NIST – National Institute of Standards and Technology - J. Am. Ceram. Soc. 80 [1] 3-  
21 (1997 )



10. Ivan Odler - *Special Inorganic Cements* Modern Concrete Technology Series Library Binding - (June 2000)
11. H. F. W. Taylor *Cement Chemistry* (2nd Edition) Thomas Telford Publishing—1998
12. Shondeep L. Sarkar - *Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis of Concretes* - Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology Principles, Techniques and Applications - V.S. Ramachandran & James J. Beaudoin Noyes Publications – 2001
13. Donald. A. St John, Alan W. Poole & Ian Sims - *Concrete Petrography* – A handbook of investigative techniques - John Wiley – 1998
14. Mark T. Weller – *Inorganic Materials Chemistry* – Oxford Chemistry Primers-1996
15. Vicat, Louis Joseph - *Mortiers et Ciments Calcaires* – 1ª edição - 1818 - 2ª edição (tradução para o inglês) 1837 – (translation JT Smith), *A Practical and Scientific Treatise on Calcareous Mortars and Cements*, John Weale, London, 1837 - reeditada em 1997
16. Vagn C. Johansen , Peter C. Taylor, Paul D. Tennis – *Effect of Cement Characteristics on Concrete Properties* – P.C.A. Concrete Thinking - 2006
17. PCA – Portland Cement Association – CD of Training Program on Cement and Concrete Technology - *Cements for Use in Concrete – Cement Production – Key Characteristics - Hydration Chemistry* – ASTM C 150 - ASTM C 595 - ASTM C 1157 – 2004
18. Richard K. Meade - *The Chemical and Physical Examination of Portland Cement* - THE CHEMICAL PUBLISHING COMPANY – EASTON, PA. – USA -1901
19. Pierre Claude Aïtcin – *Binders for Durable and Sustainable Concrete* - Modern Concrete Technology 16 - Taylor & Francis – 2008
20. Pierre Claude Aïtcin – *High-performance concrete* – E&FN Spon - 1999
21. **KHD HUMBOLDT WEDAG**, fabricante de fornos, moinhos, ..., para produção de cimentos  
<http://www.khd.com/burning-technology.html>  
<http://www.khd.com/grinding-technology.html>  
<http://www.khd.com/firing-systems.html>



22. Portland Cement Association – PCA - Cement Research Library DVD 025 :  
*Cement Chemistry – Properties – Manufacture – Environment – Energy – Safety*  
2008 edition
23. Kurt E. Peray – *The Rotary Cement Kiln* - 1986 – Chemical Publishing Co., Inc.
24. Richard K. Meade – *Portland Cement – Its composition , Raw Materials, Manufacture, Testing and Analysis* - THE CHEMICAL PUBLISHING CO. – EASTON, PA. – USA -1911
25. Eduardo Thomaz – *Cimento geopolimérico* – Dissertação – IME -2000

