



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 SiO_2 da argila.

- **Minério de ferro** :

Usado para corrigir o teor de óxido de ferro Fe_2O_3 da argila.

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

	Calcário <i>$\approx 90\%$ da mistura em peso</i> CaCO_3	Argila <i>$\approx 10\%$ da mistura em peso</i>	Areia <i>para corrigir o teor de SiO_2 da argila</i>	Minério de ferro <i>para corrigir o teor de Fe_2O_3 da argila</i>
Ca O	51,29 %	0,70 %	0,63 %	2,09 %
Si O ₂	4,16 %	64,40 %	88,23 %	7,56 %
Al ₂ O ₃	1,50 %	15,75 %	5,02 %	0,40 %
Fe ₂ O ₃	0,90 %	8,92 %	1,30 %	83,13 %
Mg O	0,36 %	0,80 %	0,11 %	0,43 %
K ₂ O	---	2,79 %	2,66 %	0,08 %
Na ₂ O	---	0,06 %	0,37 %	0,06 %
Perda ao fogo	41,00 % ↑ gás CO ₂	6,14 %	1,00 %	4,92 %

$\text{CaO} / \text{CaCO}_3 = 56\%$ (em peso) ; $\text{CO}_2 / \text{CaCO}_3 = 44\%$ (em peso)



Jazida de CaCO_3

Calcário britado : CaCO_3
 $\approx 90\%$ peso

Argila : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3
 $\approx 10\%$ peso

Balanças dosadoras.

Correções :
 SiO_2 : Areia
 Fe_2O_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°C

Pré-aquecedor do forno
Calcinação

Temperatura na entrada 950°C

Zona de queima : Fusão a 1450°C

Forno rotativo
Formação do clínquer

Fusão a 1450°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*)



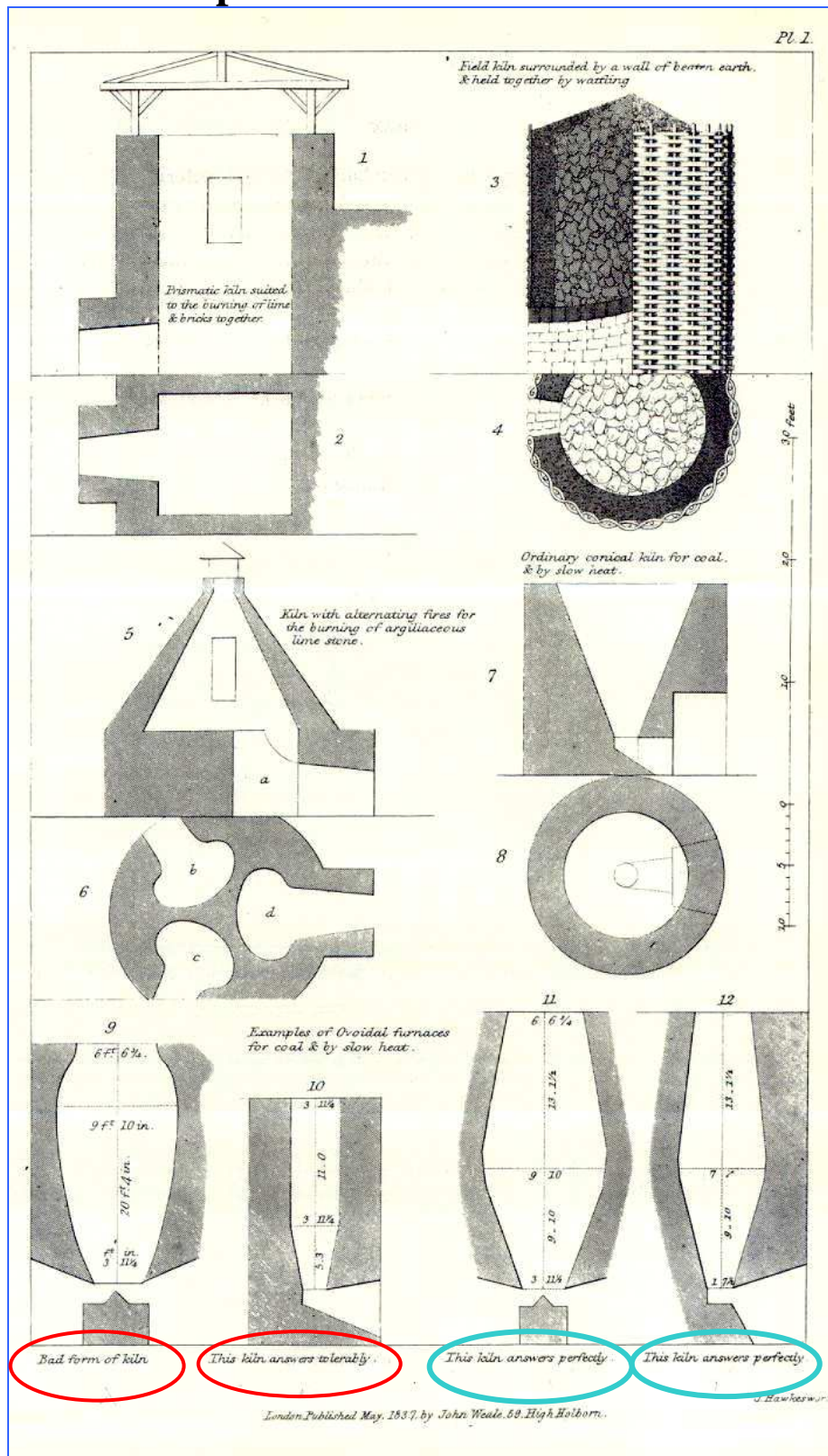


Um pouco de História – 1818

- **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 m³ 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

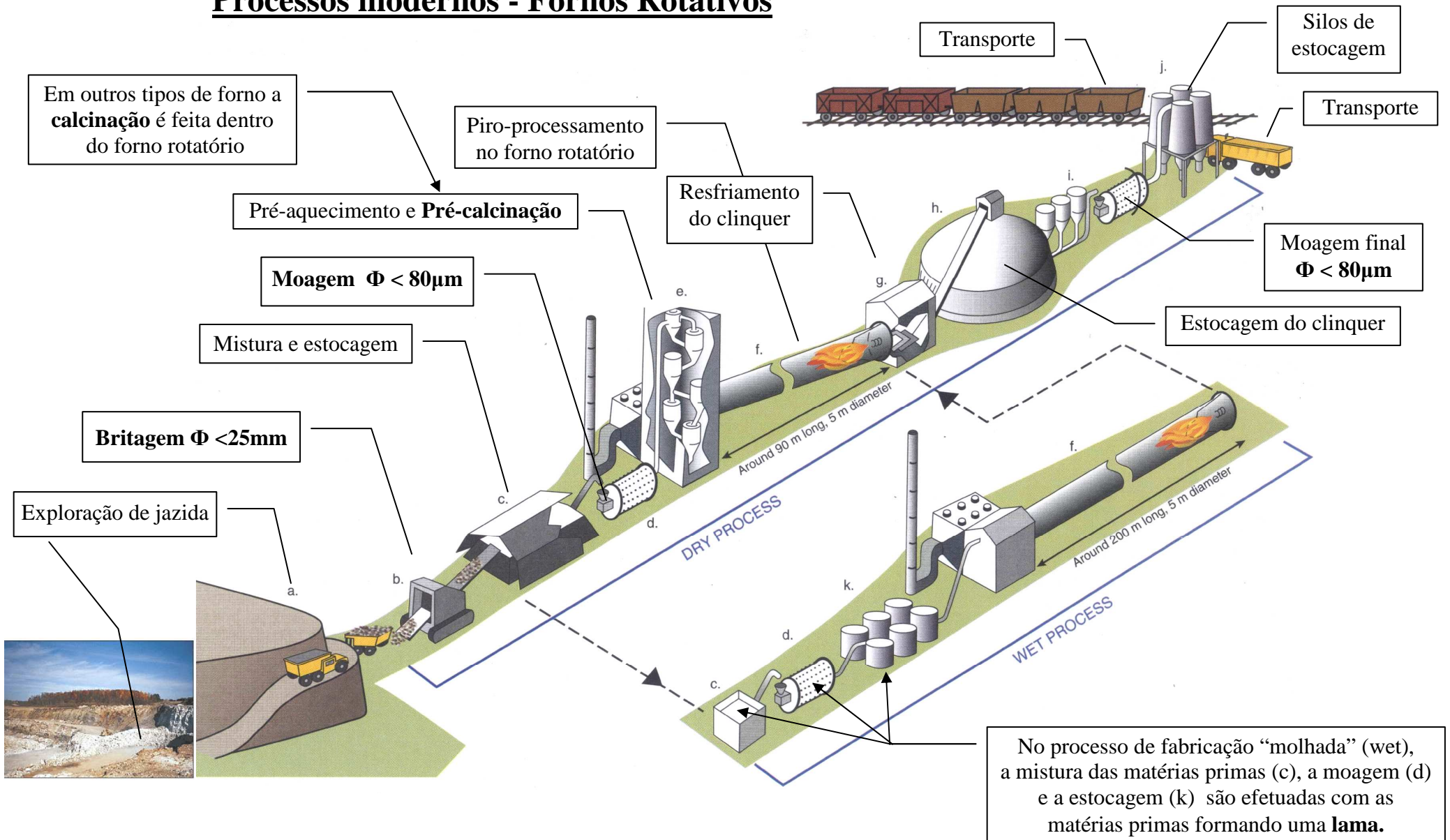


Fornos utilizados nos primeiros cimentos – 1818

[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 $D_{máx.} \leq 80 \mu m$ 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.

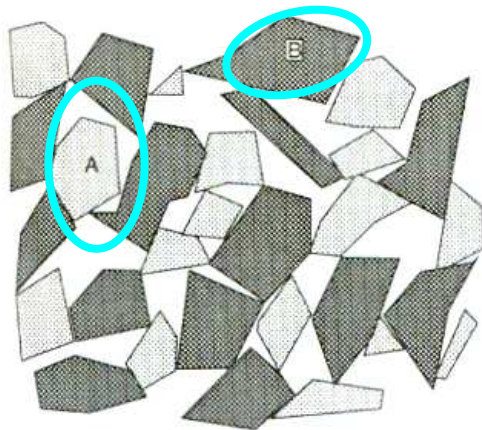


Figura a

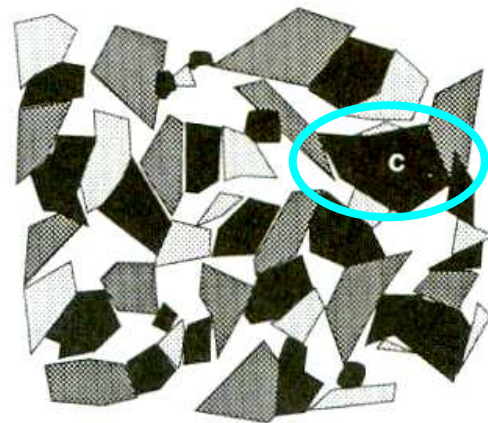
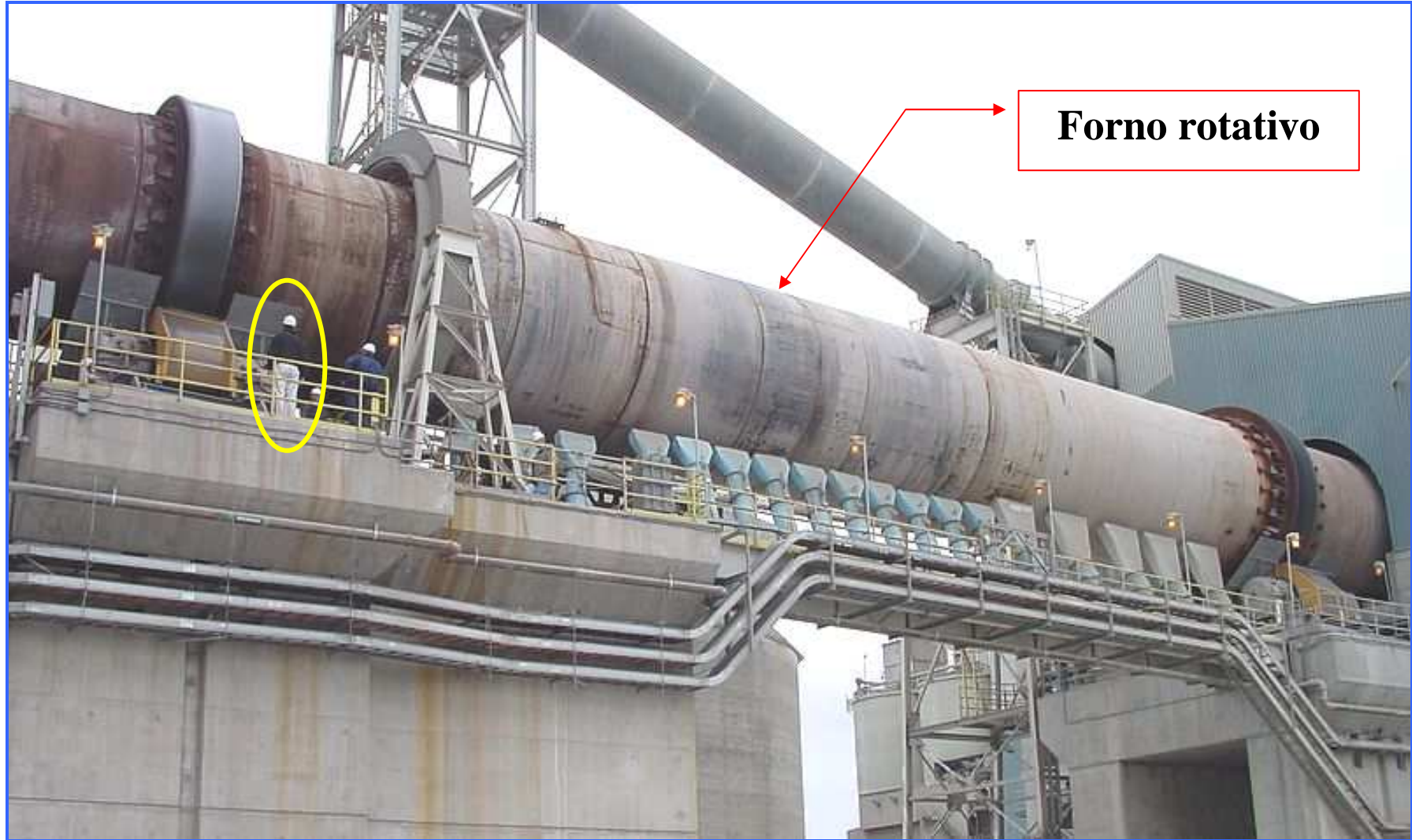


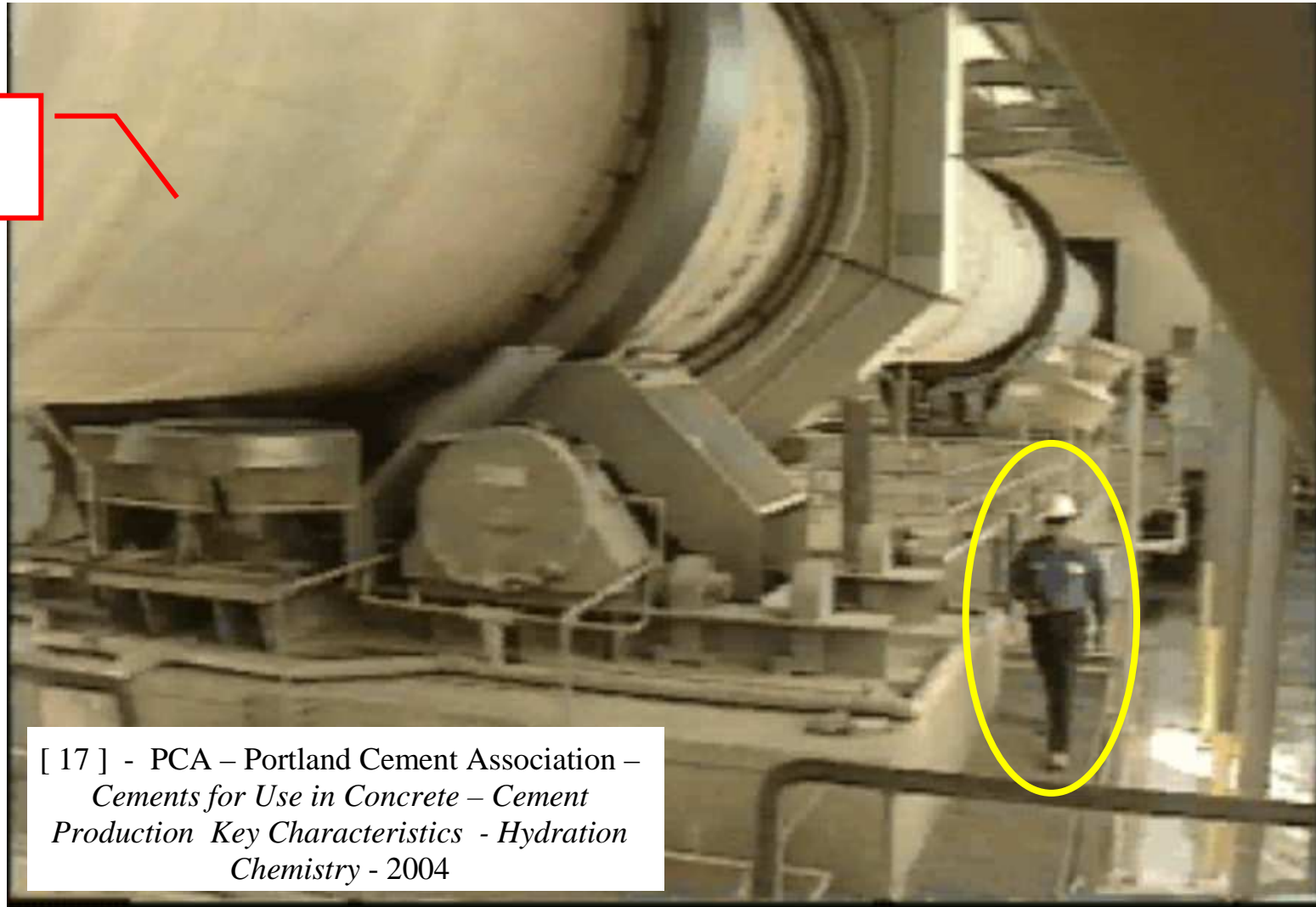
Figura b

- Para facilitar esse processo, os componentes básicos da mistura devem ser introduzidos no forno já finamente moídos ($\phi < 80 \mu m$).
- 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, CaO , SiO_2 , Al_2O_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.

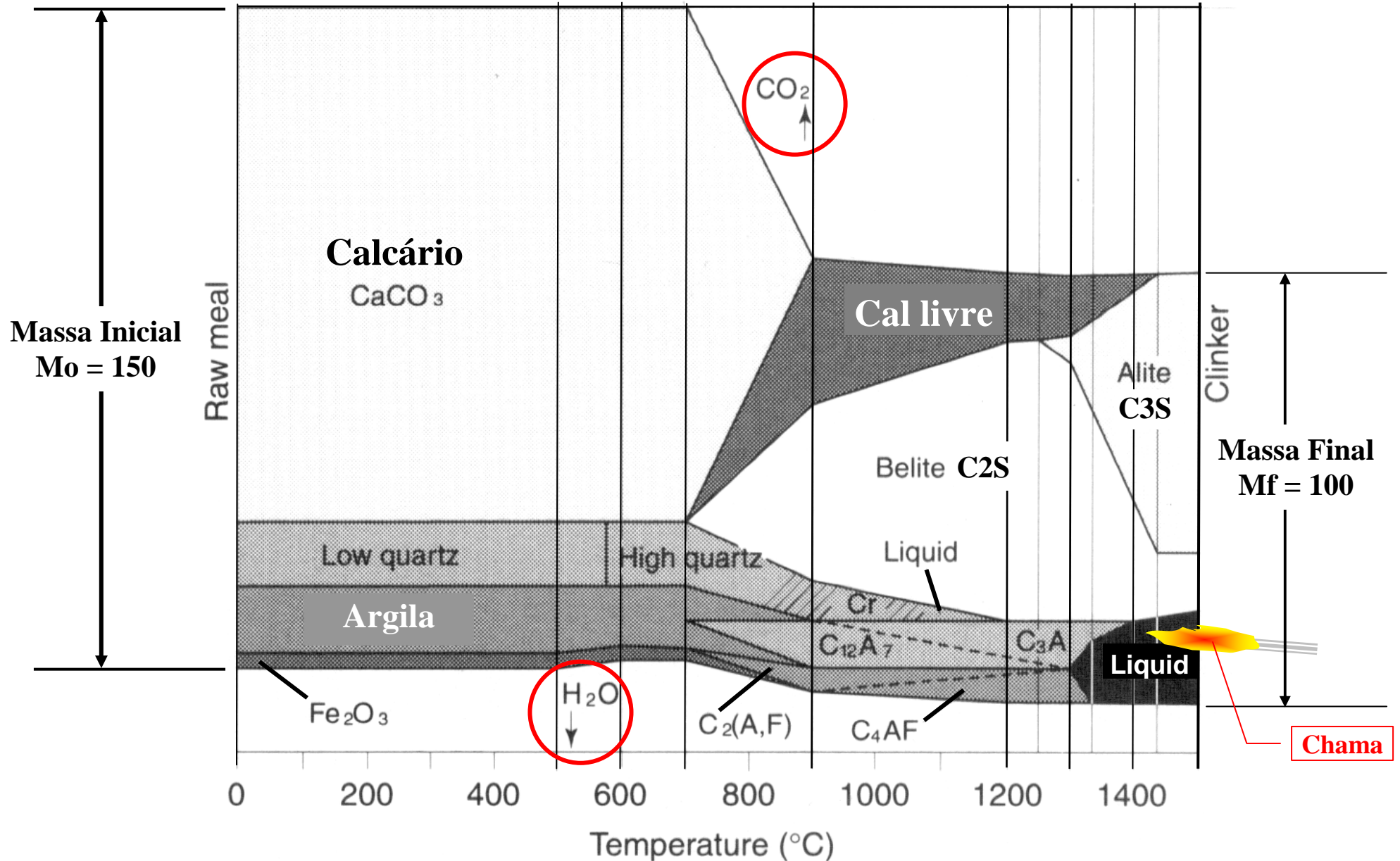




**Forno
rotativo**



[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 SiO₂ 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 β e Fe₂O₃.

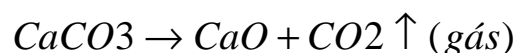
No eixo horizontal X está marcada a temperatura e no eixo vertical Y está marcada a quantidade (massa) de cada material.

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 CO₂ do calcário CaCO₃ e da H₂O 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 β (low quartz) em quartzo α (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 Al₂O₃ para produzir C₁₂A₇.
- 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 Fe³⁺ e com Al³⁺ para formar C₂(A.F)
- Na temperatura de **700 °C** começa a se formar a belita C₂S.

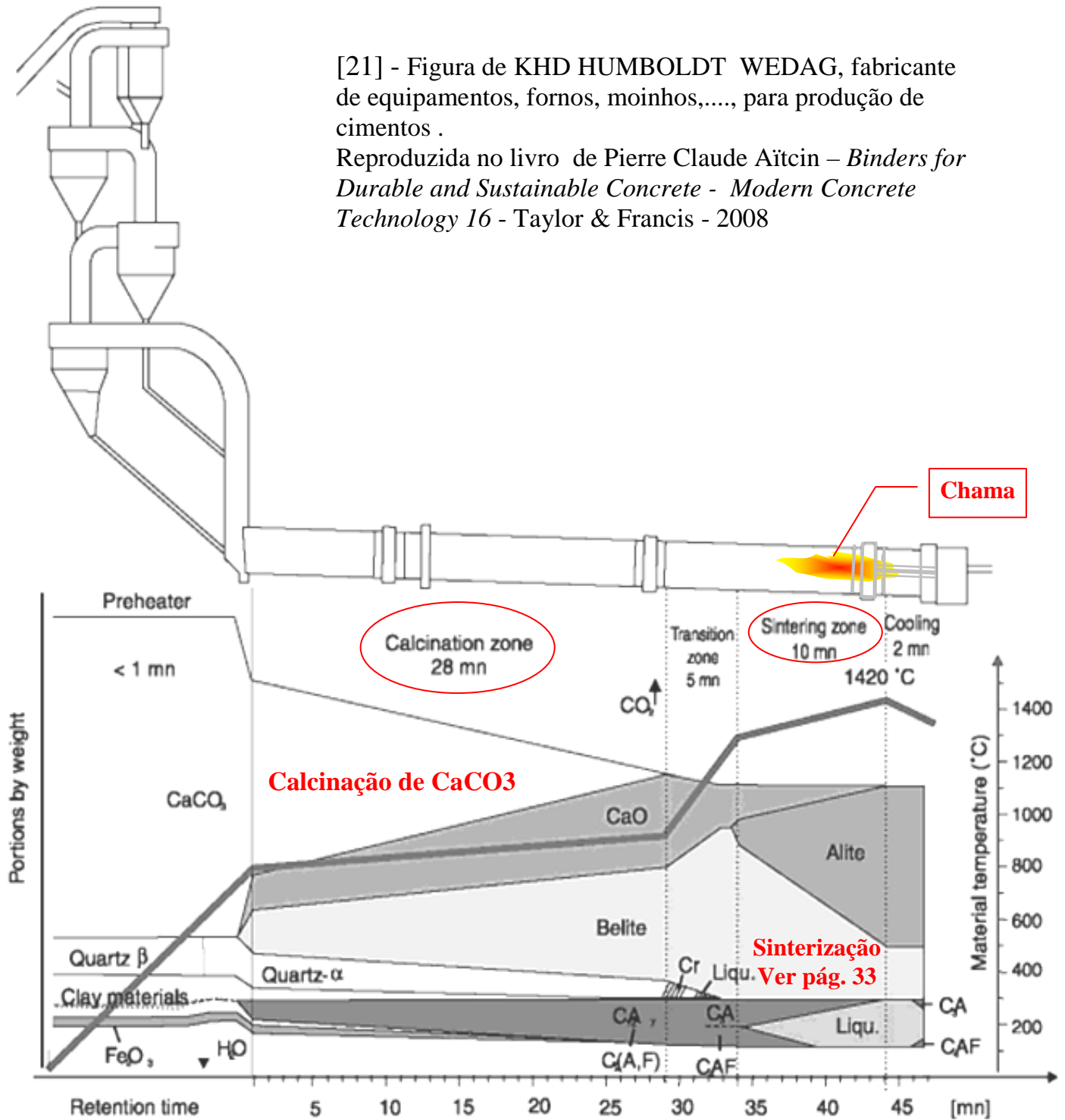


- Na temperatura de 900°C :
 - todo o calcário CaCO_3 já está descarbonatado $\text{CO}_2 \uparrow$;
 - alguma alumina $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$ já reagiu com a cal $\text{C} = \text{CaO}$ para formar C_{12}A_7 ;
 - alguma cal CaO já reagiu com Al^{3+} e Fe^{3+} para formar $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$;
 - alguma cal CaO já reagiu com a sílica e formou a belita C_2S .
- Na temperatura de 900°C existe ainda muita cal CaO não combinada e alguma sílica SiO_2 na forma de quartzo.
- Acima de 900°C , aparecem os primeiros cristais de C_3A e C_4AF .
- Acima de 900°C , o quartzo α se transforma em cristobalita (uma variedade mineral da sílica SiO_2 , estável à alta temperatura).
- A 1100°C a cristobalita funde e isso acelera sua combinação com a cal CaO .
- A 1200°C não existe mais nenhuma sílica livre.
- A 1250°C começam a se formar os primeiros cristais de C_3S (alita). Esses cristais se formam através da reação do excesso de cal livre CaO com os cristais de Belita já formados.
- A 1300°C a mistura de C_3A e C_4AF começa a fundir .
- A 1325°C C_4AF desaparece.
- A 1400°C C_3A 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 Ca^{2+} nos cristais de Belita C_2S .
- Acima de 1425°C , praticamente, não existe mais cal em excesso.
- No clínquer formado temos, na figura, 64% de Alita C_3S , 14% de Belita C_2S e 21 % de fase intersticial.
- Após a formação do clínquer é necessário resfriar rapidamente esse clínquer para “congelar” o C_3S e o C_2S 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 : $T=1450\text{ }^{\circ}\text{C}$



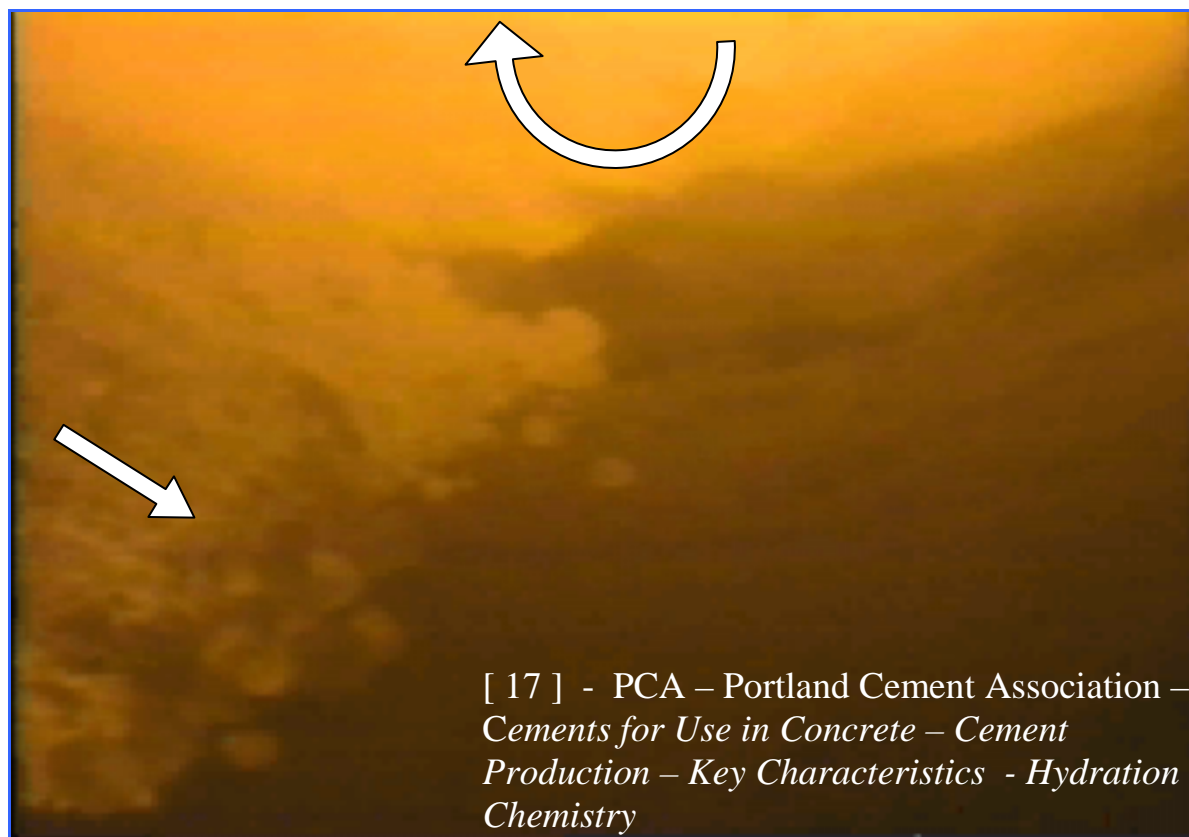
<http://www.khd.com/burning-technology.html>

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



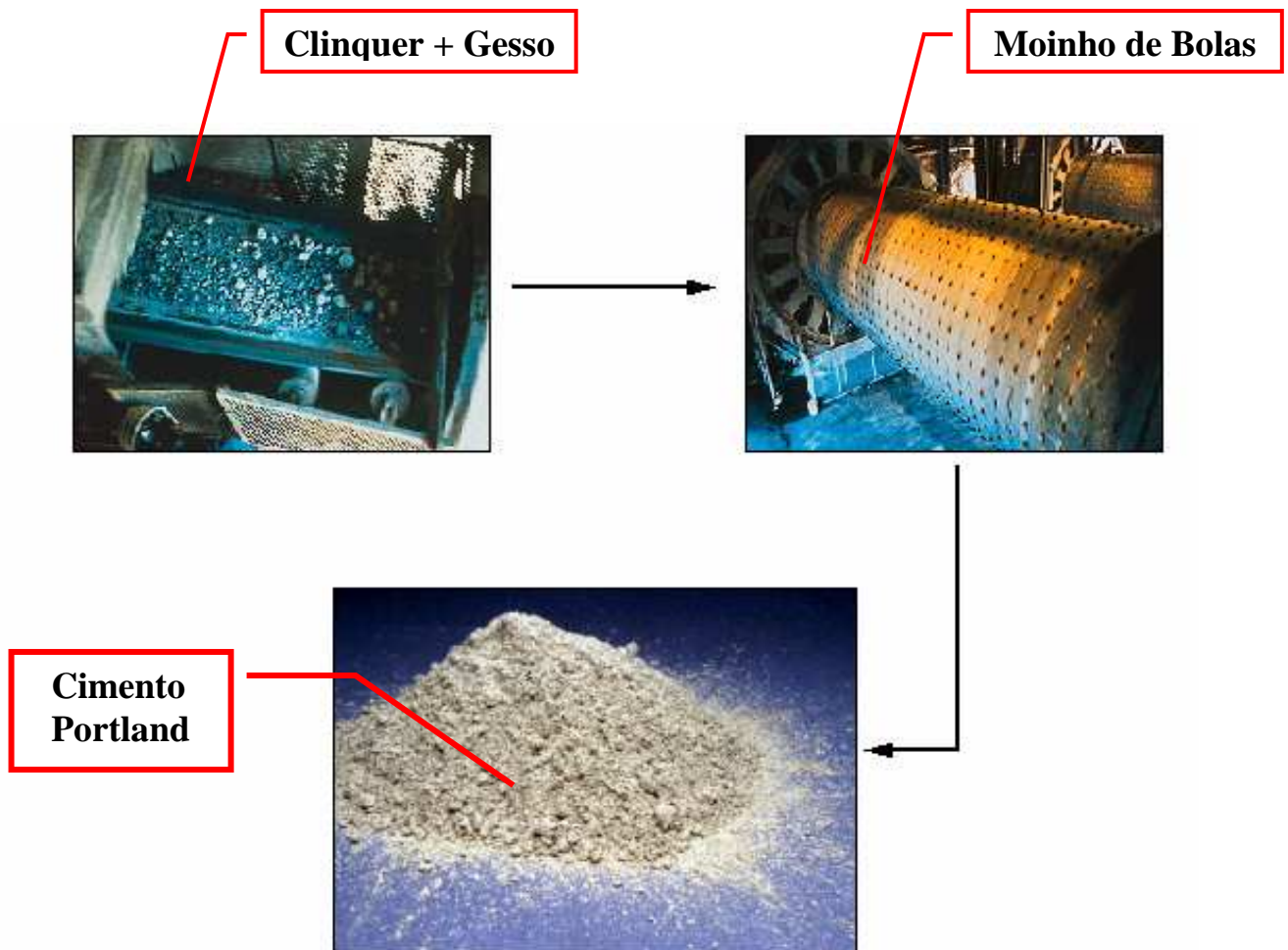
Testando a mistura de dentro do forno.



[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 ₂	S	16 a 26	20,9	23,0	18,3	36,8
Alumina	Al ₂ O ₃	A	4 a 8	4,8	10,8	11,0	11,2
Ferro	Fe ₂ O ₃	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 ₂ O	K	0 a 1,5	0,6			
Sódio	Na ₂ O	N	0 a 1,5	0,6			
Enxofre	SO ₃	\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):

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

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

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

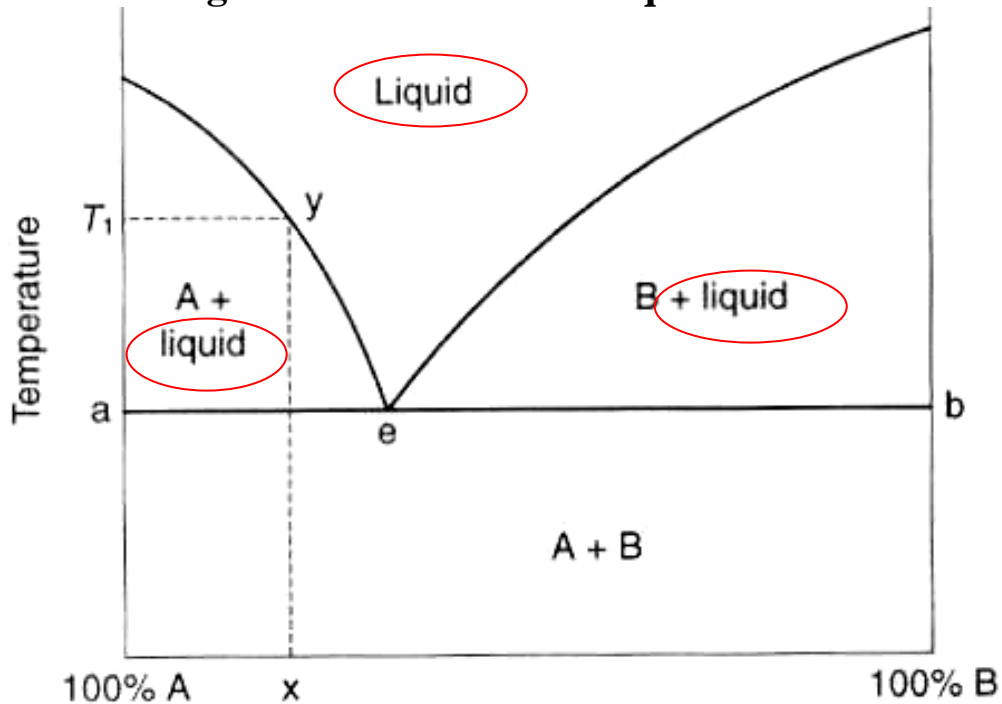
$$C_4AF = 3,043 \cdot Fe_2O_3$$

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

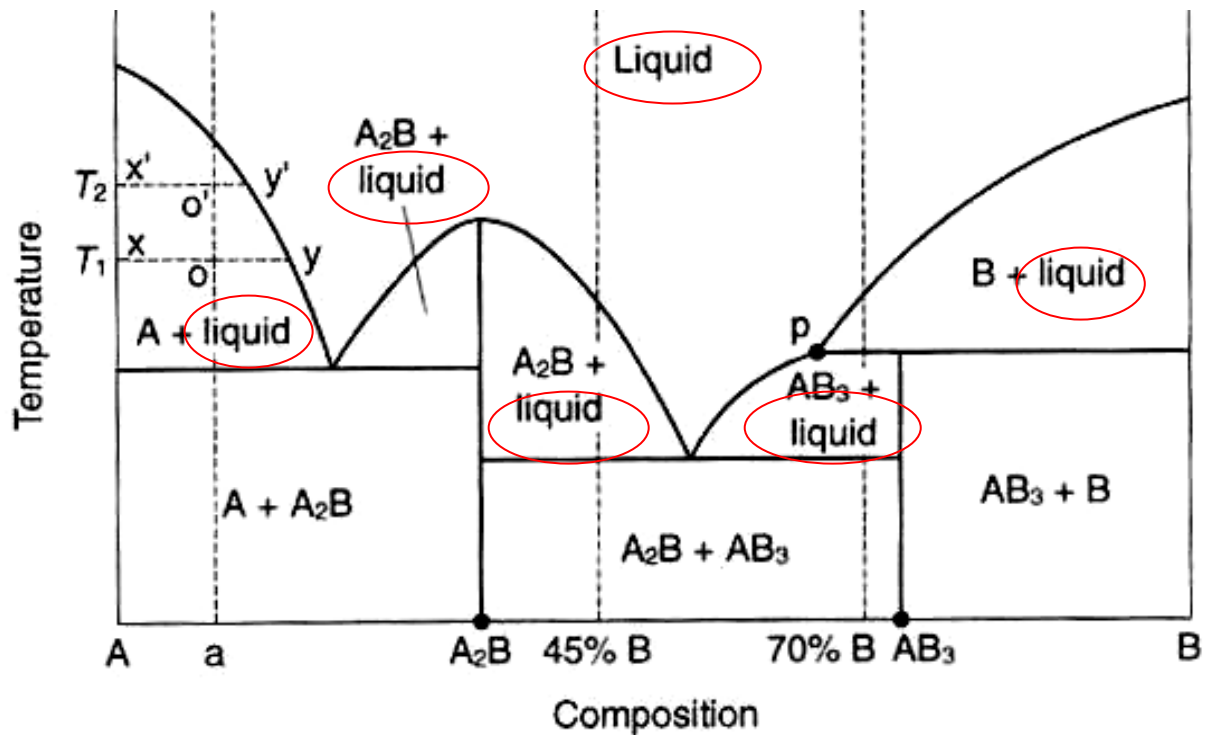
$$C = CaO , A = Al_2O_3 , S = SiO_2 , H = H_2O , F = Fe_2O_3 , \bar{S} = SO_3$$



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.

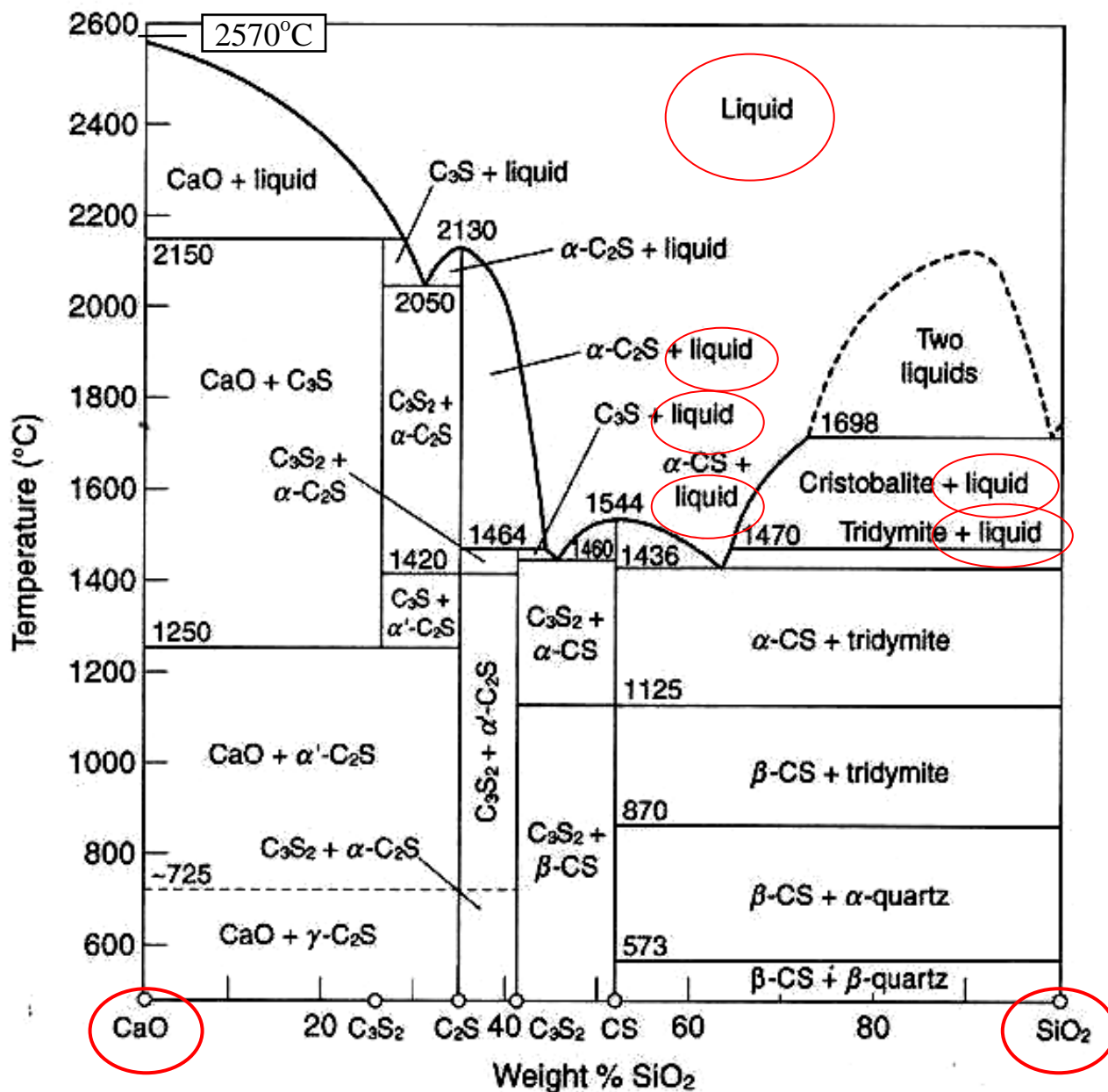


Caso Geral - Sistema Binário A-B contendo 2 fases binárias A_2B e AB_3



Diagrama de Fases no Clinquer do cimento Portland

Eixo CaO – SiO₂

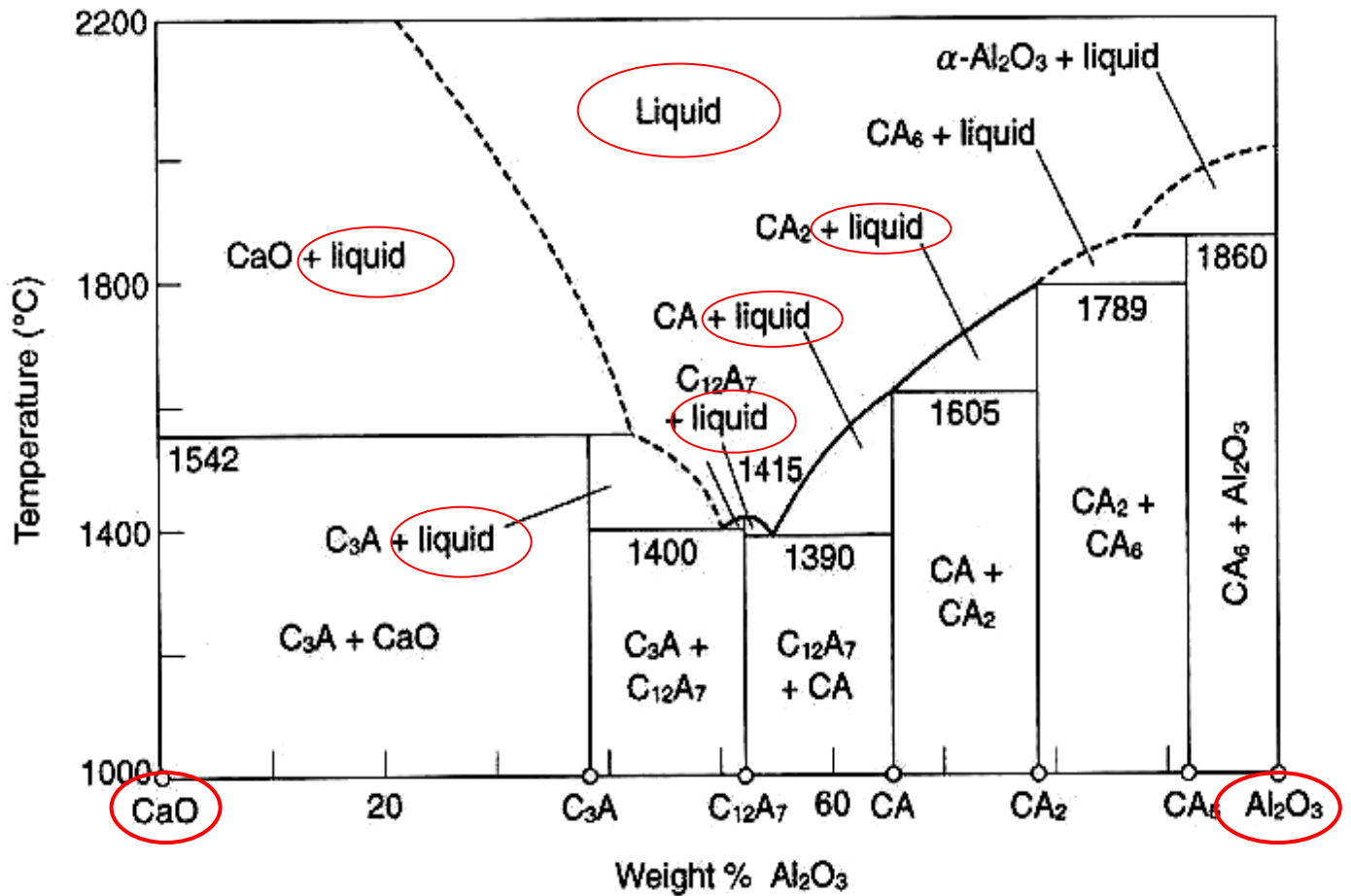


Ver [1] – Lea's Chemistry of Cement



Diagrama de Fases no Clinquer do Cimento Portland

Eixo CaO – Al₂O₃

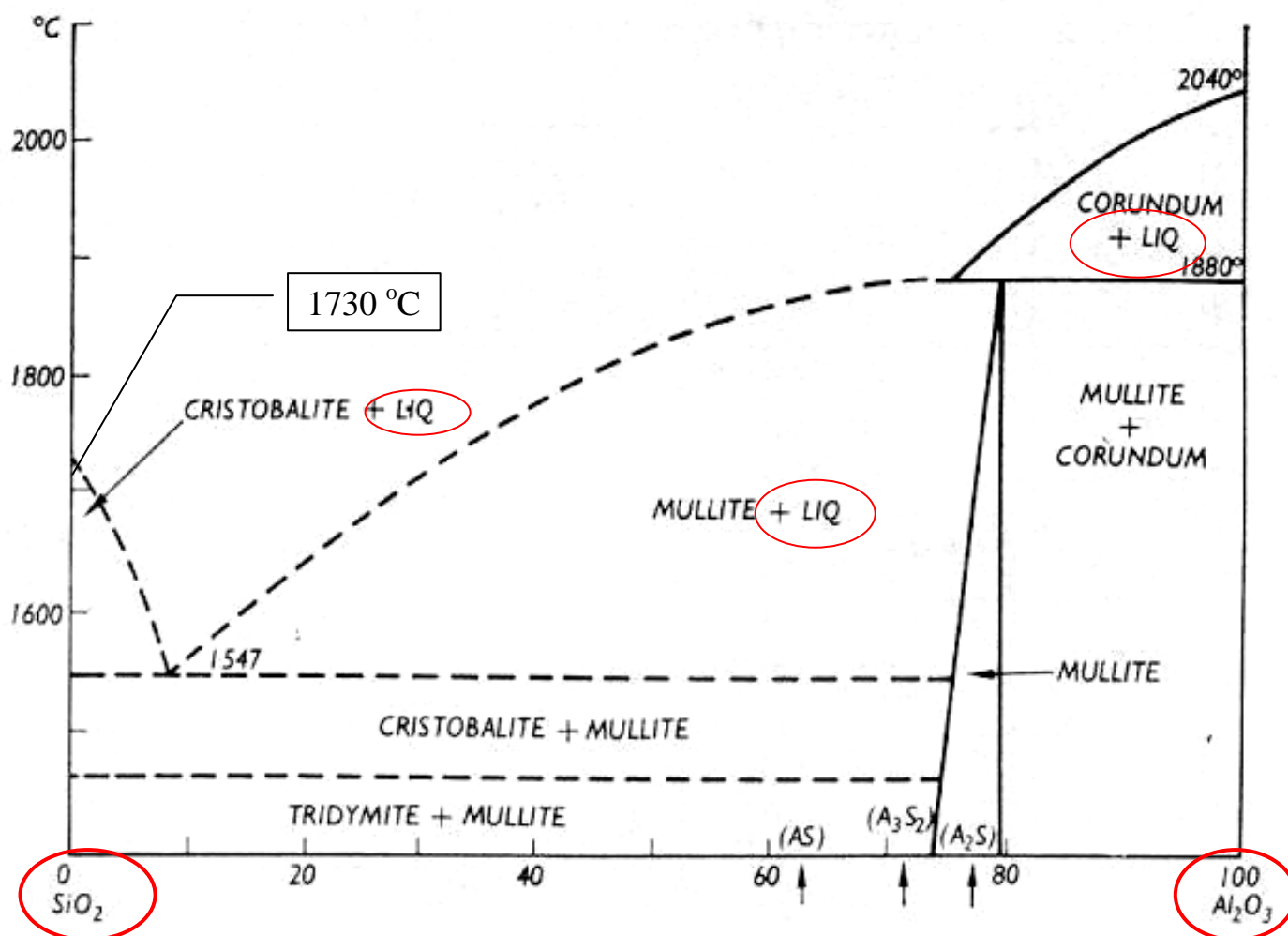


Ver [1] – Lea's Chemistry of Cement



Diagrama de Fases no Clinquer do Cimento Portland

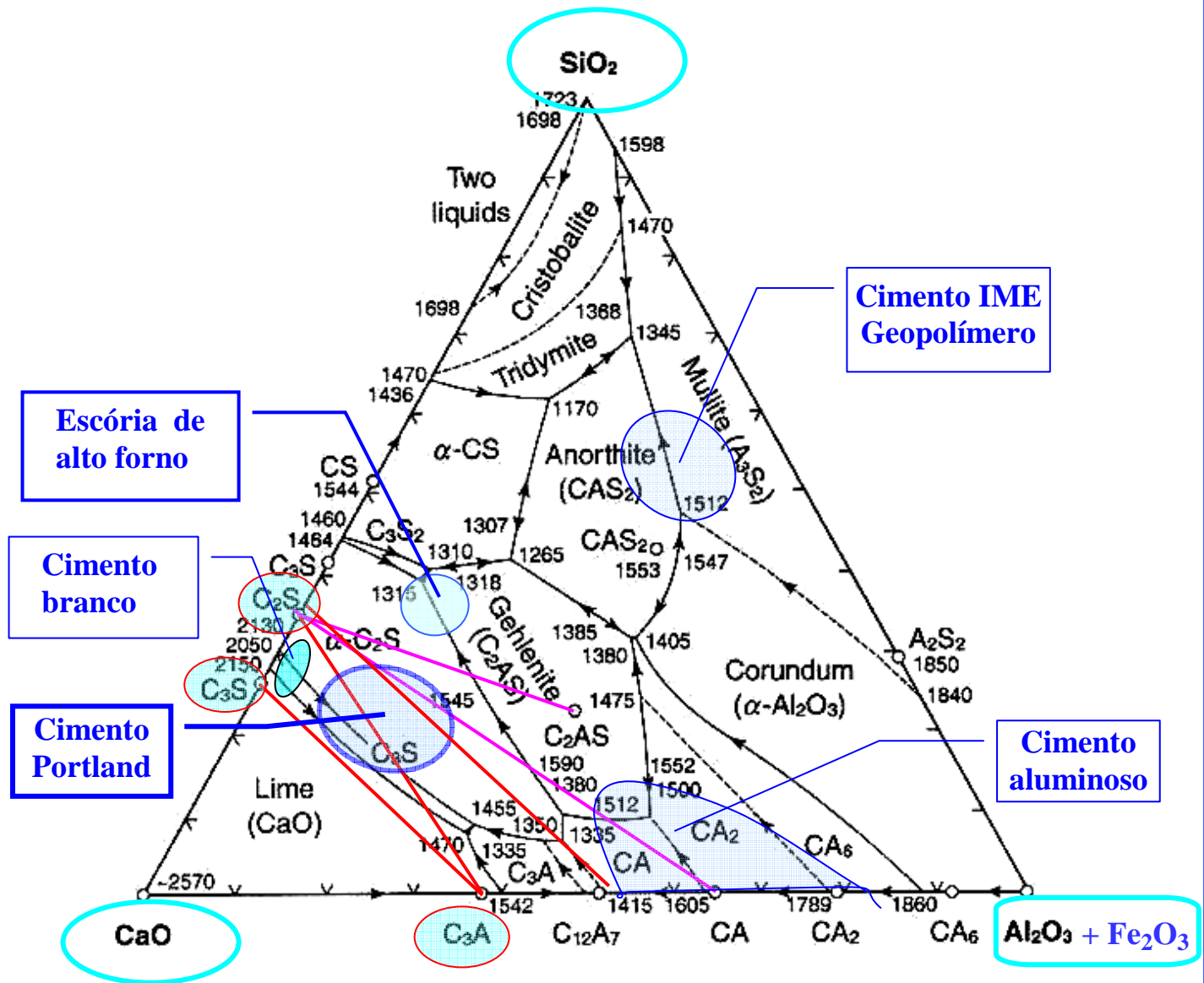
Eixo $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$



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)

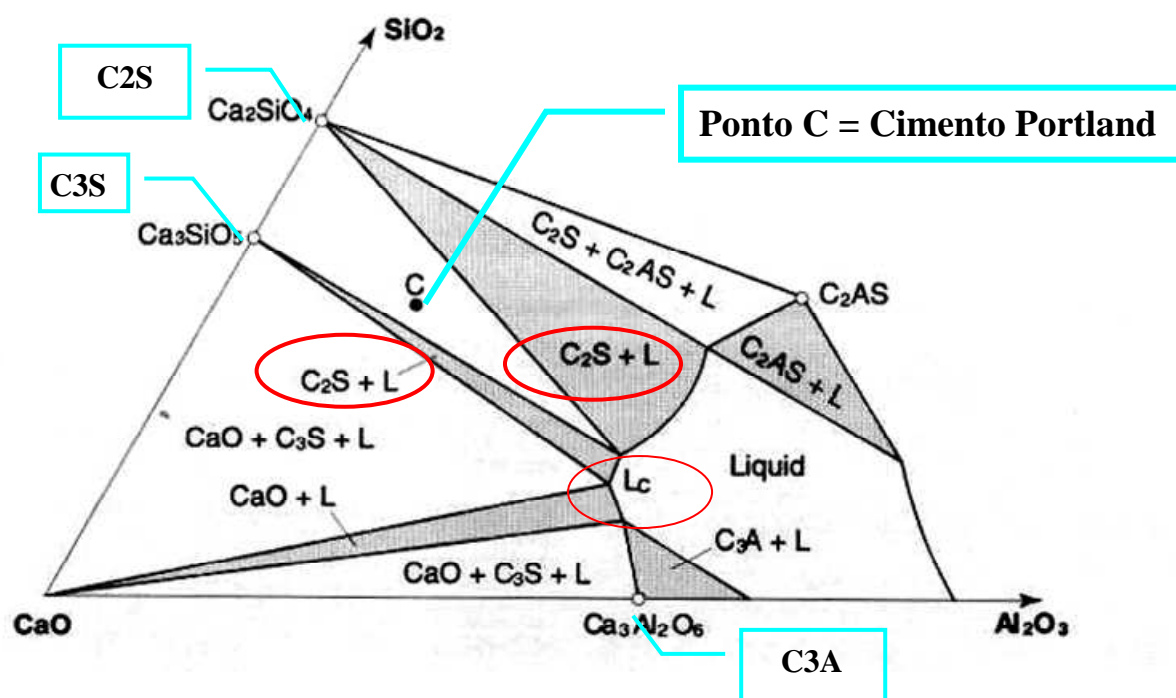


Sistema $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

- 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 Al_2O_3 e de Fe_2O_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]

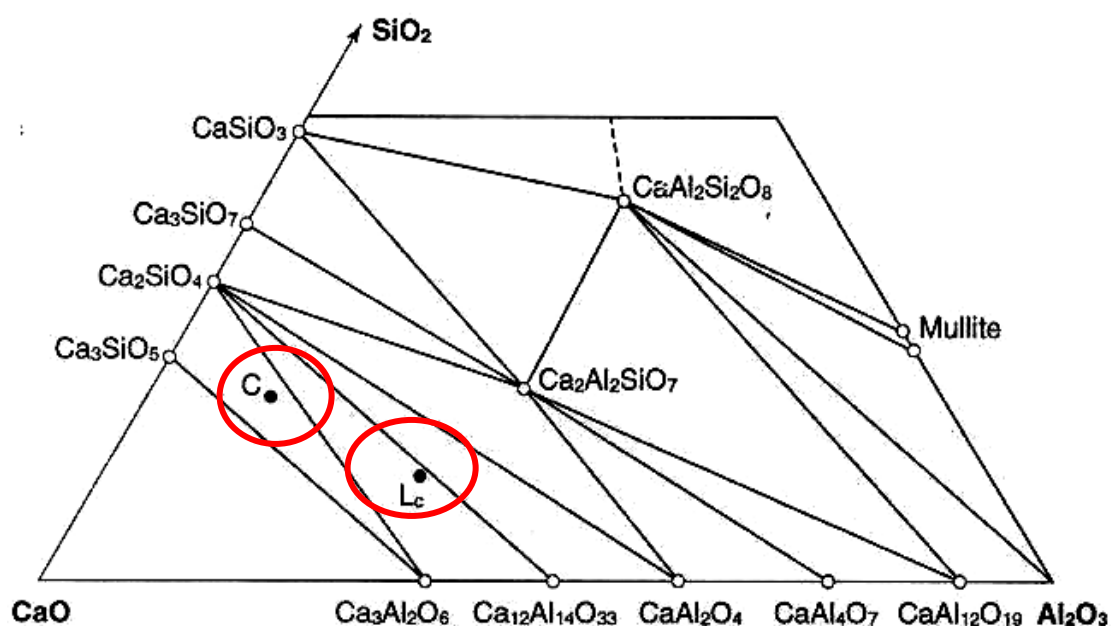
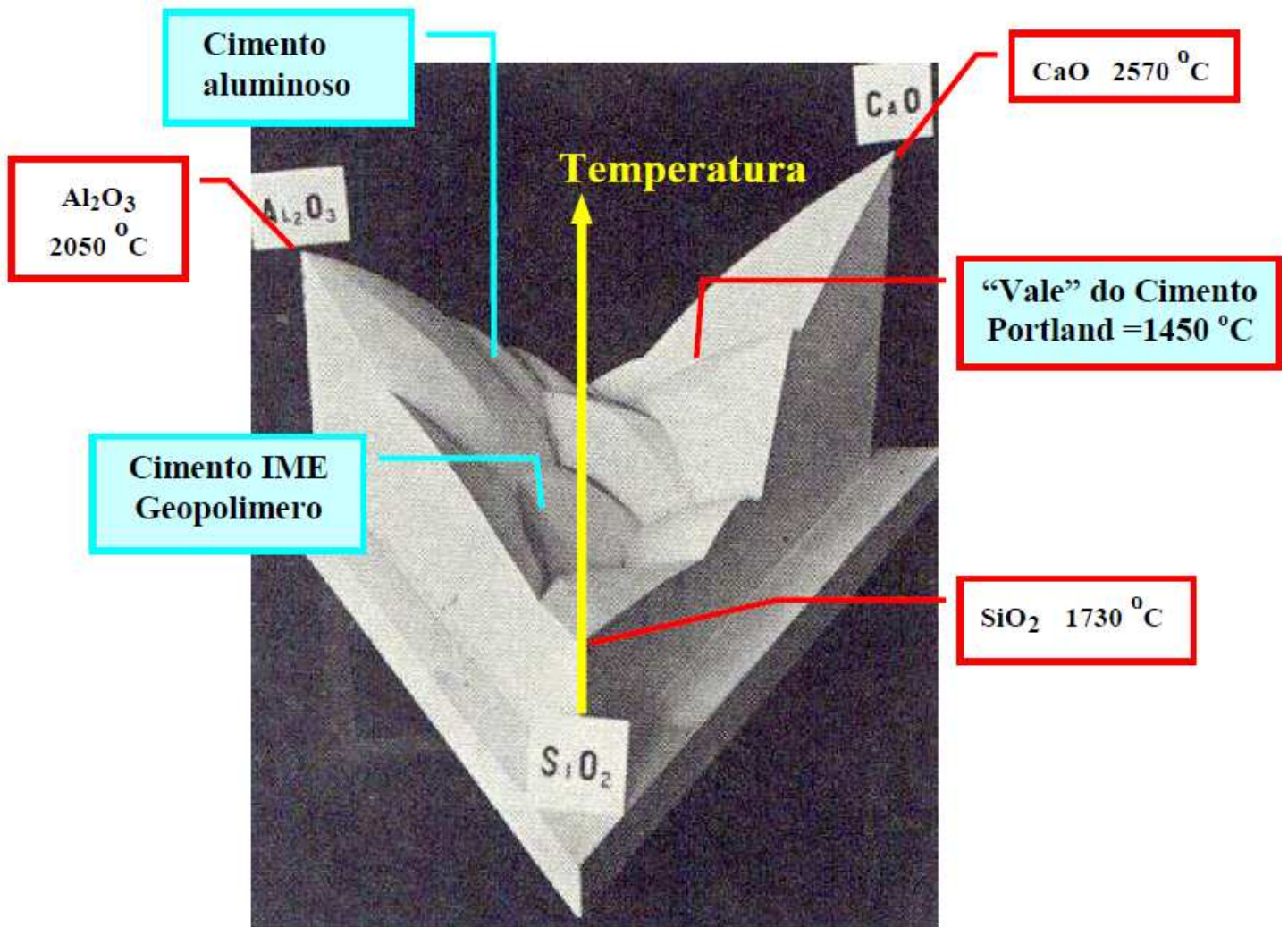


Diagrama Sub-Sólidos da parte do sistema $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, mostrado na figura anterior. Ver Lea's Cement Chemistry [1]



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 ₂	18,4	21,02	24,5	(23,1)	44,9
Al ₂ O ₃	3,1	5,04	7,56	(10,8)	22,5
Fe ₂ O ₃	0,16	2,85	5,78	(1,9)	0,6
MgO	0,02	1,67	7,10	---	0,3
SO ₃	0	2,58	5,35	---	0,5
Na ₂ O	0	0,24	0,78	---	8,2
K ₂ O	0,04	0,70	1,66	---	10,2



Temperatura de fusão dos componentes do cimento Portland.

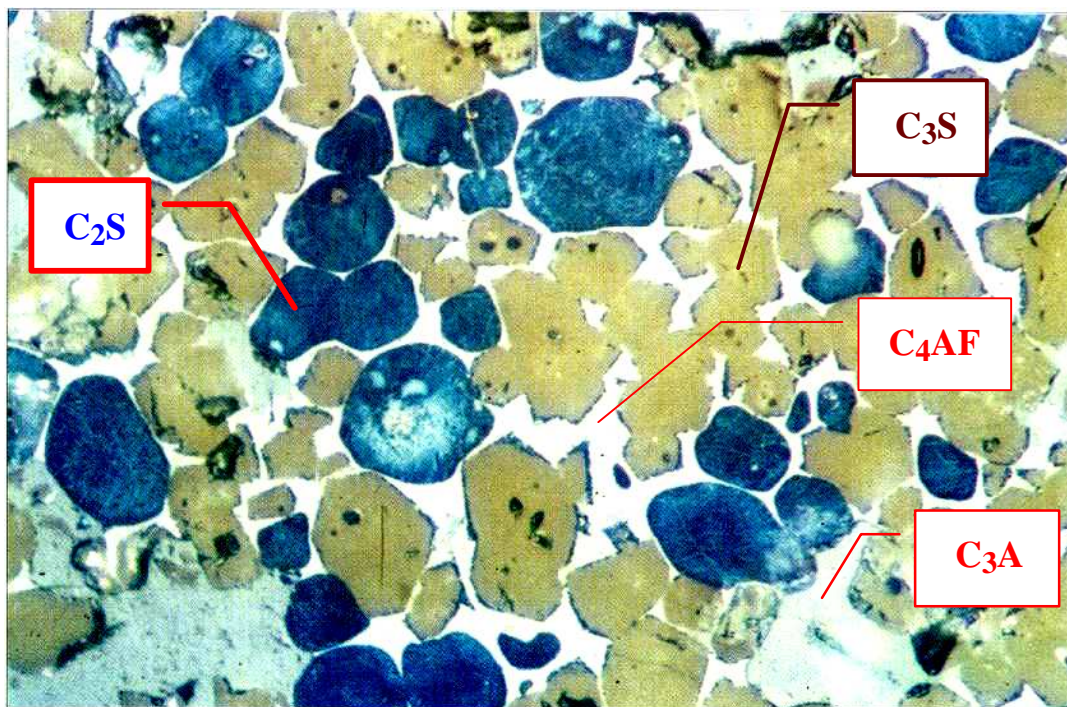
Fases	Reação	Composição (%)			Temperatura de fusão (°C)
		CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
CaO	Fusão	100			2570
Al ₂ O ₃	Fusão		100		2050
SiO ₂	Fusão			100	1713
C ₃ S	Dissociação	73,68		26,32	1900
C ₂ S	Fusão	65,11		34,89	2130
C ₂ S	$\alpha - \alpha'$				1425
C ₂ S	$\alpha' - \beta$				670
C ₂ S	$\beta - \gamma$				525
C ₃ S ₂	Dissociação	58,33		41,67	1475
CS	Fusão	48,27		51,73	1544
C ₃ A	Dissociação	62,26	37,74		1535
C ₁₂ A ₇	Fusão	48,53	51,47		1455
CA	Fusão	35,48	64,52		1600
CA ₂	Dissociação	21,57	78,43		1720
CaO-C ₂ S	Eutético	67,5		32,5	2065
C ₂ S-C ₃ S ₂	Reação	55,32		44,68	1464
CaO-C ₃ A	Reação	57	43		1535
C ₃ A-C ₁₂ A ₇	Eutético	50	50		1395
CaO-C ₃ S-C ₂ S	Reação	68,4	9,2	22,4	1900
CaO-C ₃ S-C ₃ A	Reação	59,7	32,8	7,5	1470
C ₃ S-C ₂ S-C ₃ A	Reação	58,3	33,0	8,7	1455
C ₂ S-C ₃ A-C ₁₂ A ₇	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-calcio Aluminato
 - Branco \equiv C_4AF \equiv Ferrita \equiv Cálcio Alumino-Ferrita

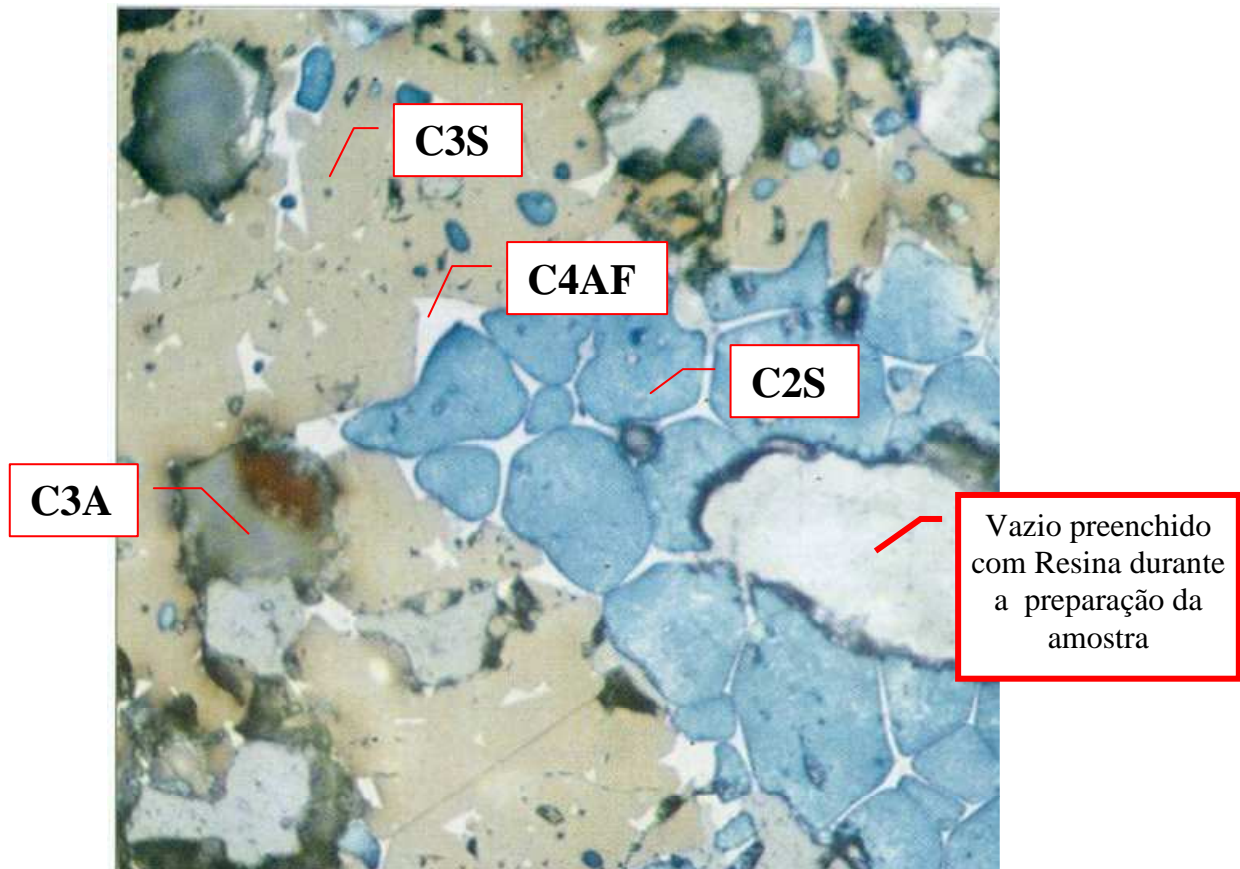
Terminologia :





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** = Al₂O₃ ; **S** = SiO₂ ; **H** = H₂O ; **F** = Fe₂O₃ ; \bar{S} = SO₃

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

Composição em peso :

C₃S = 4,071 · CaO – 7,600 · SiO₂ – 6,718 · Al₂O₃ – 1,430 · Fe₂O₃ – 2,852 · SO₃

C₂S = 2,867 · SiO₂ – 0,7544 · C₃S

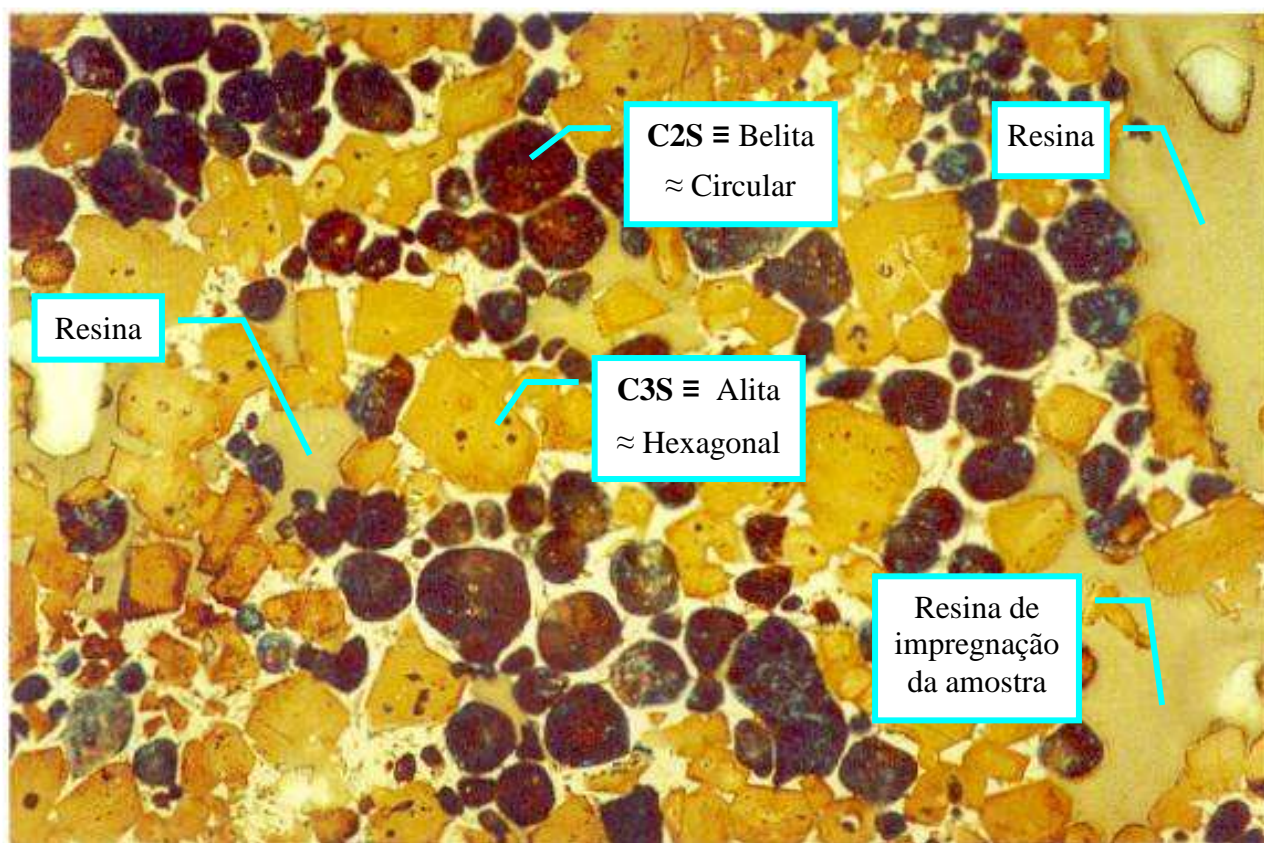
C₃A = 2,650 · Al₂O₃ – 1,692 · Fe₂O₃

C₄AF = 3,043 · Fe₂O₃



Textura do clínquer do cimento Portland

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



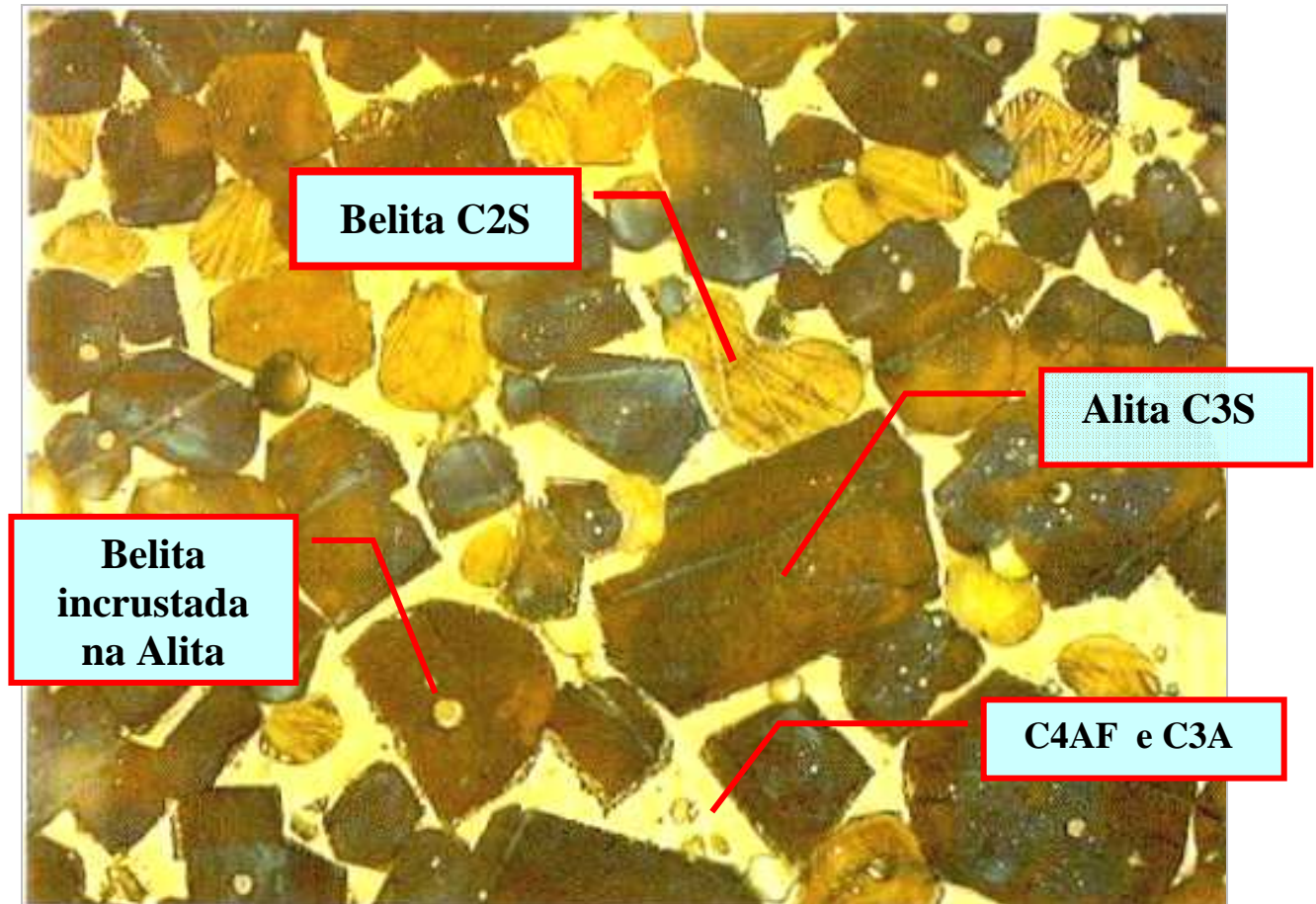
Micrografia ótica, luz refletida, do clínquer do cimento Portland não hidratado.

- Largura do campo : 0,19 mm = 190 μm (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*.



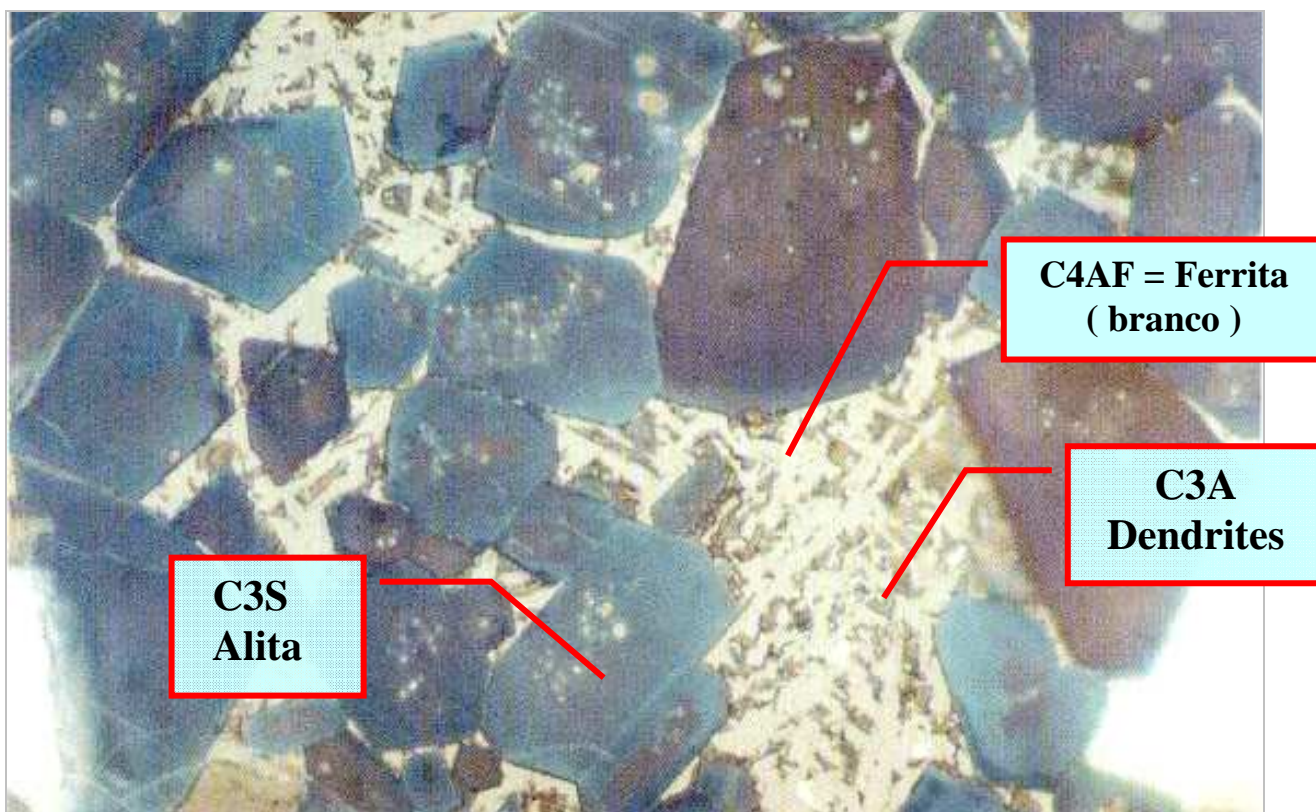
Micrografia ótica, com luz refletida, do clínquer do cimento Portland não hidratado.

- Largura do campo : 0,17 mm = 170 μ 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 μm (\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 μm (\approx espessura de uma folha de papel).
- A belita (C₂S) 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 (C₃S) . Essa diferença aparece como diferença no sombreamento.



ANEXO 1 - SINTERIZAÇÃO

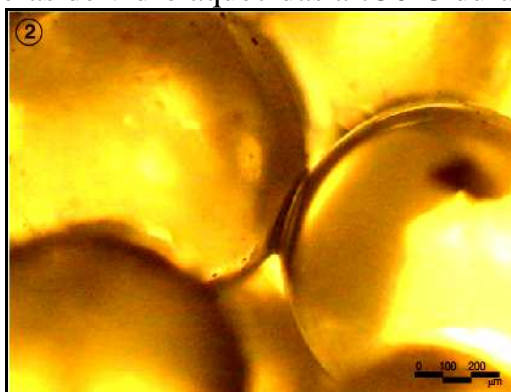
www.cienciadosmateriais.org Laboratório LMDM - CETEC-MG

Exemplo : Sinterização de microesferas de vidro.

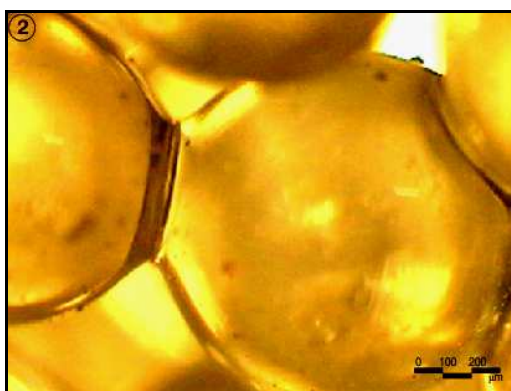


Microesferas de vidro com 1mm de diâmetro, à temperatura ambiente.

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

