



# Materiais constituintes do Concreto

**Prof. M.Sc. Ricardo Ferreira**



# Adições



**PUC** GOIÁS

**Prof. M.Sc. Ricardo Ferreira**

Fonte: Egydio Herve Neto

Dario Dafico

Silvia Selmo

Rubens Curti,

# Adições

- **Adições minerais** são produtos comumente adicionados ao concreto em quantidades significativas (**teor > 5%**).
  - **Cimentantes**
  - **Pozolânicas**
  - **Inertes**



Binary Mixture:

Portland cement + 1 SCM

Ternary Mixture:

Portland cement + 2 SCMs

Quaternary Mixture:

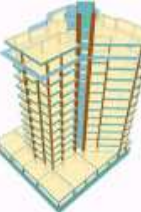
Portland cement + 3 SCMs



Water

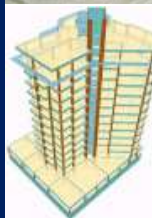
Aggregates

Admixtures





# Classificação



Classificação	Tipo de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio (> 10% de CaO)
Superpozolanas	Sílica ativa Metacaulim Cinzas de casca de arroz (queima controlada)
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio (<10%) Argilas calcinadas Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente Escória de caldeira CCA sem controle de queima (residual)
Inertes (fíler)	Fíler calcário, Agregado pulverizado, Alguns resíduos calcinados etc.

# Origem

## ■ Natural

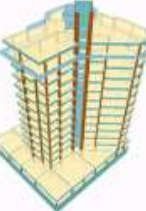
- materiais que possuem atividade pozolânica no estado natural ou podem ser facilmente convertidos em pozolanas por britagem, moagem e ativação térmica.
  - Argilas e folhetos calcinados
  - Tufos vulcânicos etc.



Império Romano: Coliseu de Roma 82 d.C.

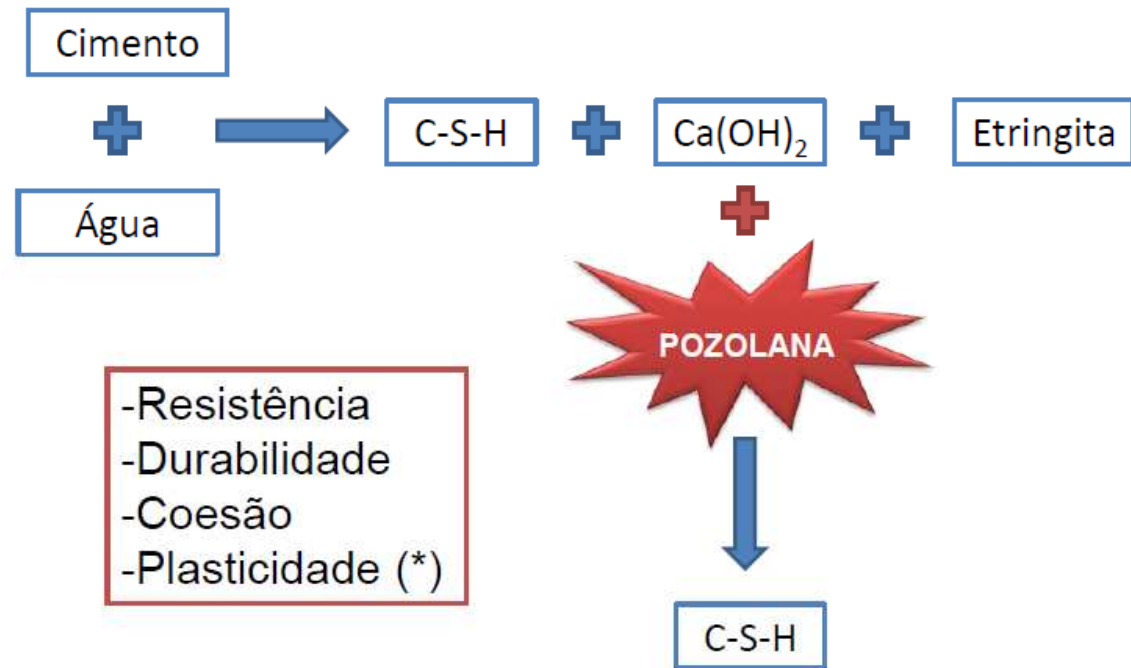
## ■ Artificial

- subprodutos industriais de transformação e beneficiamento, que requerem ou não o processamento (secagem e pulverização) antes do emprego como adição mineral.
  - Cinza volante
  - Escória de alto-forno
  - Sílica ativa etc.

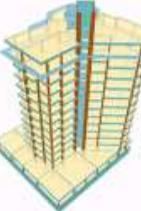


# Efeitos das adições

- Efeito Químico: **Reação Pozolânica**
  - Substituição do **hidróxido de cálcio por C-S-H**
  - **Redução do pH** da solução do poro (não significativo)



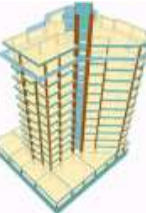
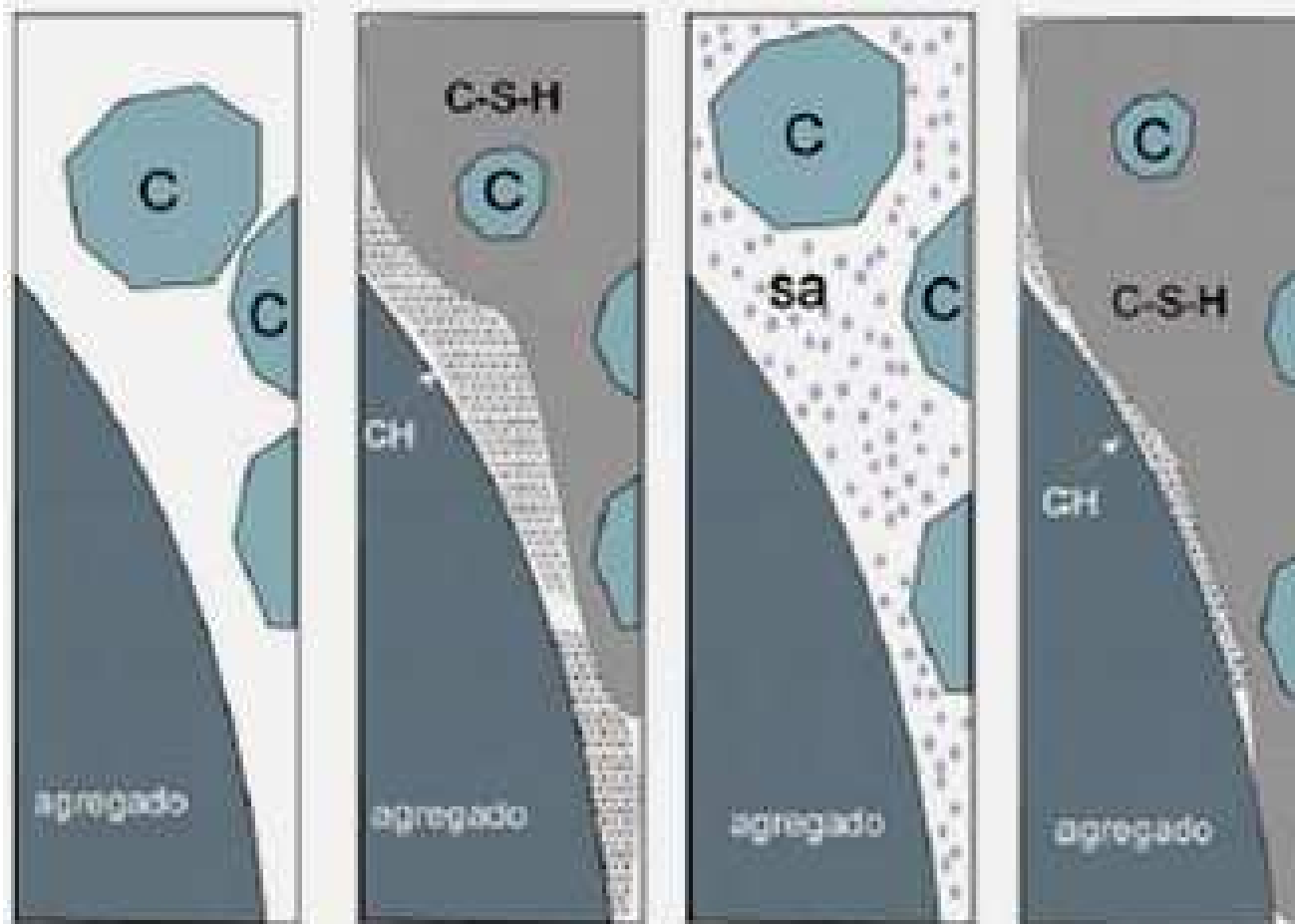
- Efeito Físico: **Efeito Fíler**
  - Alterações na Microestrutura
  - **Refinamento do sistema de poros**
  - Maior tortuosidade e **Desconexão do sistema de poros**





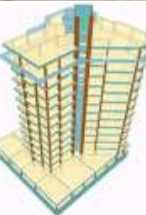
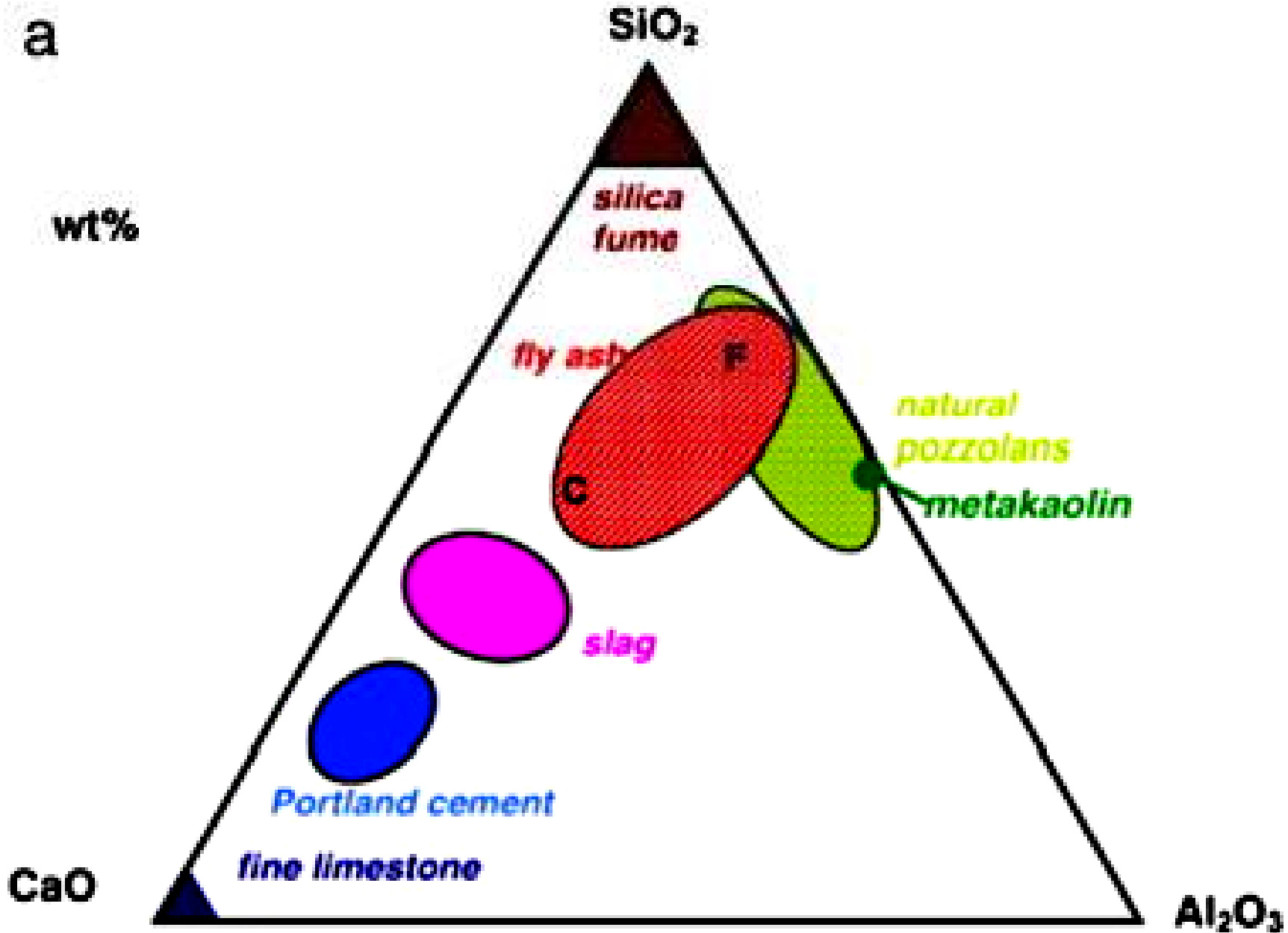
# Adições pozolânicas

- Materiais **silicosos** ou **sílico-aluminosos** que têm pouco ou nenhum valor cimentício, mas, quando **finamente subdivididos** e na **presença de umidade**, **reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio** à temperatura ambiente **formando compostos com propriedades cimentícias**.



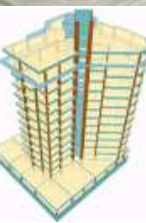
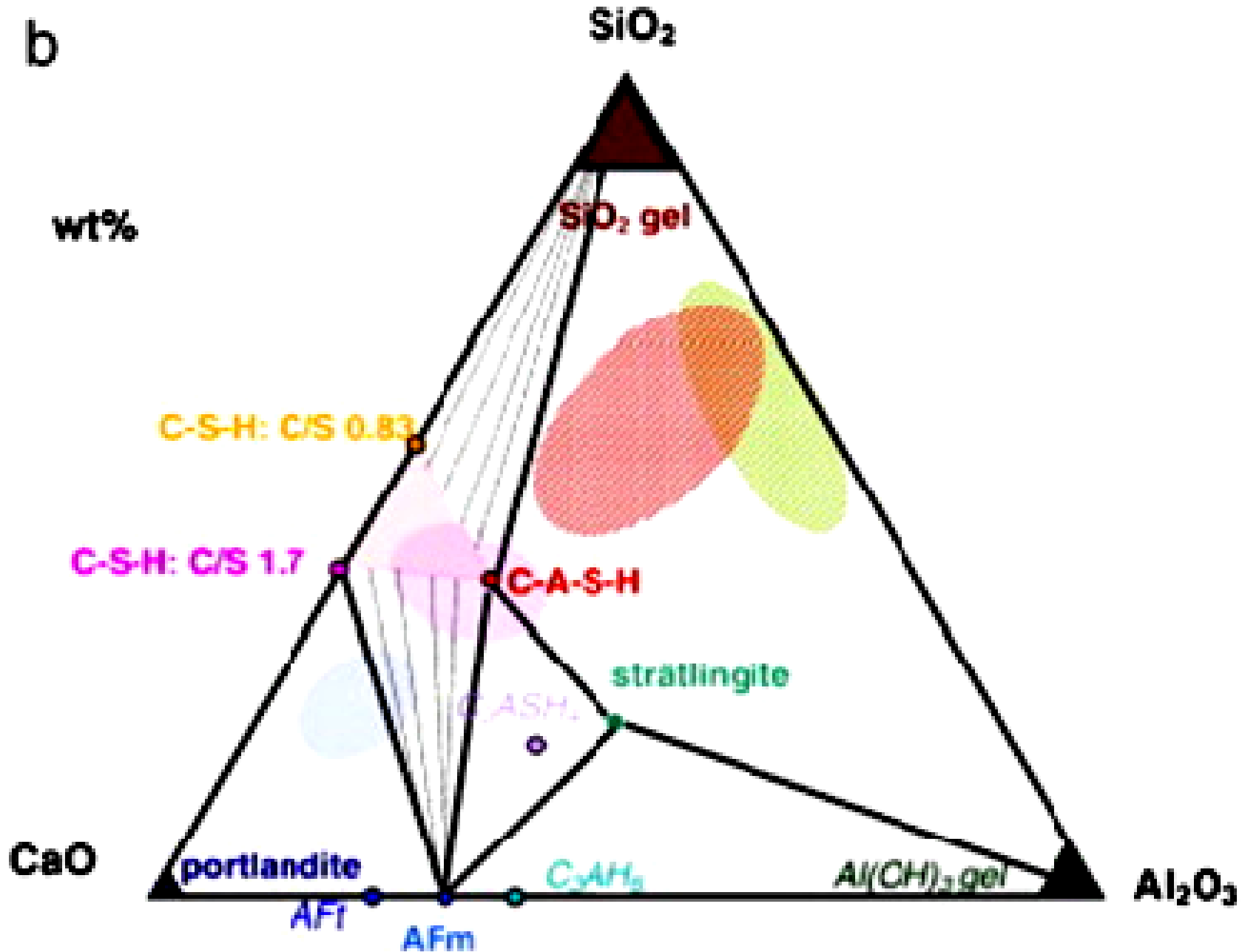


# Diagrama ternário de fases





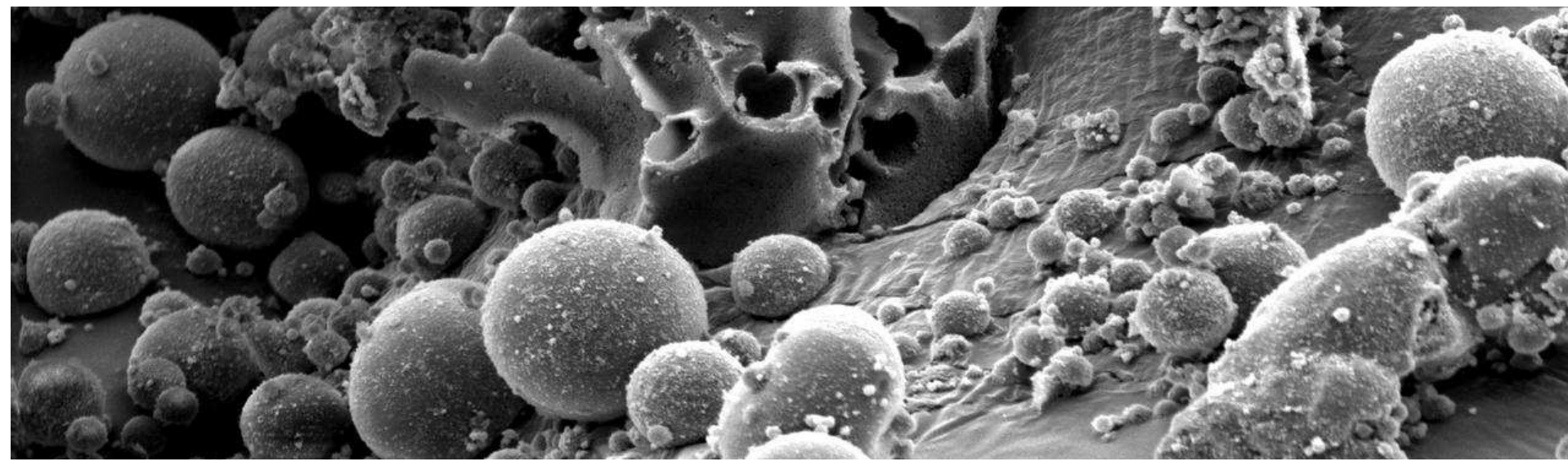
# Diagrama ternário de fases





# Composição química

Material	Percentual em massa (%)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	álcalis	perda ao fogo
Escória de alto-forno	30-40	8-13	0,1-2	35-45	8-20	0,5-1	0,3-2
Cinza volante	50-65	20-29	5-10	1-7	1-2	1-3	0,5-3,5
Sílica ativa	90-98	0,06-2,5	0,03-2,5	0,1-0,8	0,2-3	0,1-2,5	2,5-3,5
Cinza de casca de arroz	90-94	0,3-1,0	0,2-0,5	0,3-0,5	0,2-0,4	2-3	2-3
Metacaulim	41-55	35-45	1,0-1,5	1,5-2,5	0,1-0,3	0,3-0,6	1,5-2,5



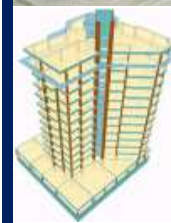
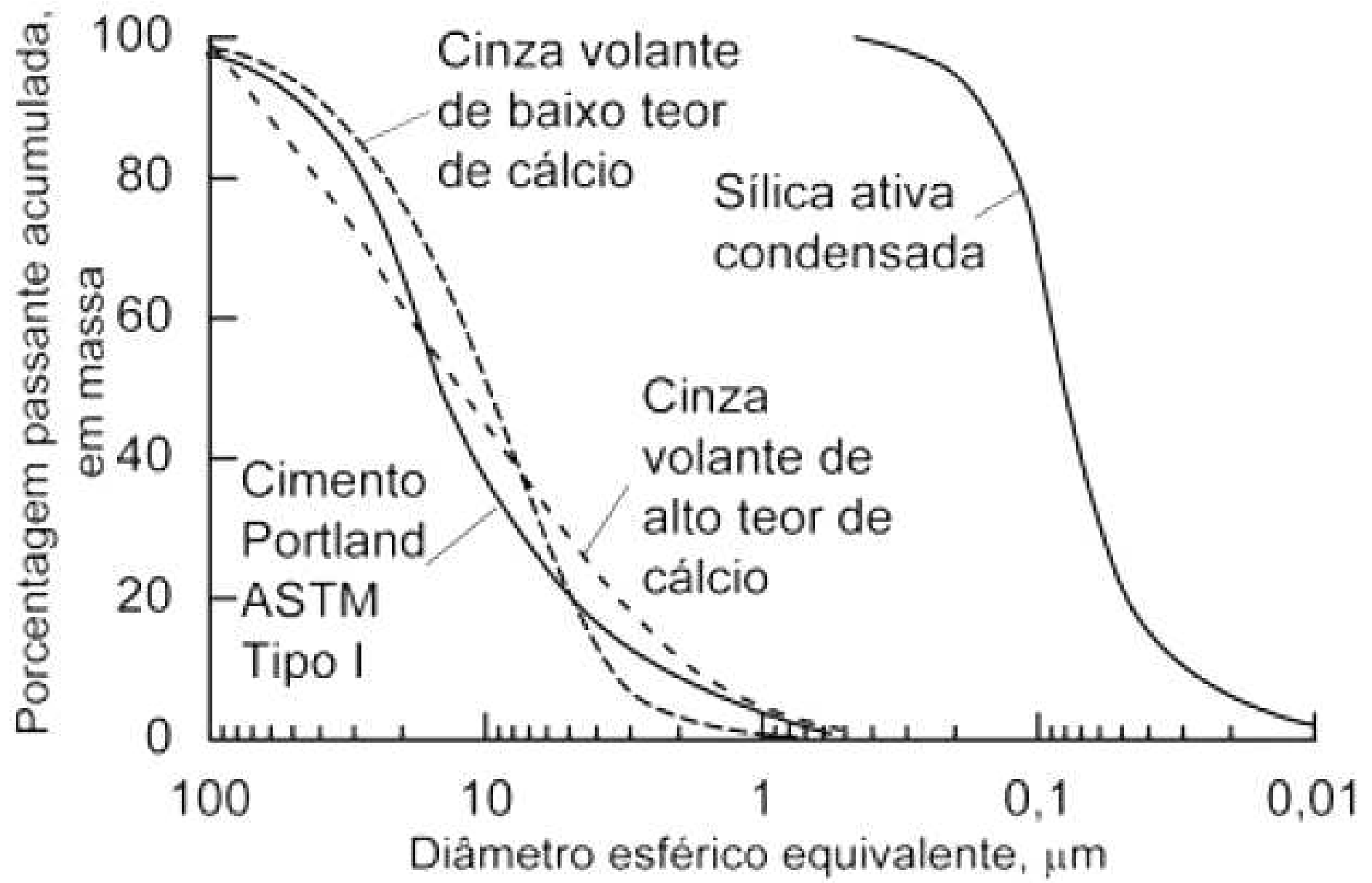


# Características das partículas

Adição mineral	Composição mineralógica	Características das partículas
Escória de alto-forno	Formada de 80% a 100% por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e magnésio, na forma não cristalina. Pequena quantidade de compostos cristalinos do grupo da melilita.	Na maior parte são partículas de textura rugosa menores que 45 $\mu\text{m}$ , com área específica Blaine de 400 a 500 $\text{m}^2/\text{kg}$ .
Cinza volante de baixo teor de cálcio	Formada de 50% a 90% por aluminossilicatos na forma não cristalina. Pequenas quantidades de minerais cristalinos geralmente de quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.	Esferas sólidas com diâmetro entre 1 e 100 $\mu\text{m}$ , com valor médio em torno de 20 $\mu\text{m}$ , podem ser encontradas cenosferas e plerosferas. Área específica Blaine de ~ 300 a 400 $\text{m}^2/\text{kg}$ .
Cinza de casca de arroz	Essencialmente constituída de sílica pura na forma não cristalina.	Partículas altamente celulares geralmente menores que 45 $\mu\text{m}$ , com dimensão média entre 6 e 10 $\mu\text{m}$ . A superfície específica obtida por adsorção de nitrogênio (BET) é de ~ 40k a 100k $\text{m}^2/\text{kg}$ .
Sílica ativa	Sílica pura na forma não cristalina.	Pó extremamente fino contendo esferas sólidas de diâmetro médio entre 0,01 $\mu\text{m}$ e 1 $\mu\text{m}$ . Superfície específica BET ~ 20k $\text{m}^2/\text{kg}$ . $\gamma \sim 2.200\text{kg}/\text{m}^3$ e $\rho$ de ~ 200 $\text{kg}/\text{m}^3$ a 600 $\text{kg}/\text{m}^3$ (compactada).
Metacaulim	Alumino-silicatos na forma amorfa.	Partículas com tamanho médio de 1,5 $\mu\text{m}$ e superfície específica BET ~ 20k $\text{m}^2/\text{kg}$ .



# Características das partículas



# Adições x aditivos

Aditivos  
químicos

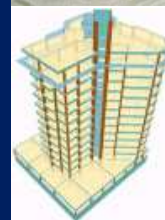


Adições  
mineraias



“Alterar as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto”

“Somar ou substituir parcialmente o cimento (devido às suas propriedades semelhantes às do cimento)”



# Efeito no concreto



**Prof. M.Sc. Ricardo Ferreira**

Fonte: Egydio Herve Neto  
Silvia Selmo  
Rubens Curti

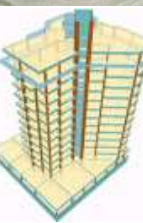
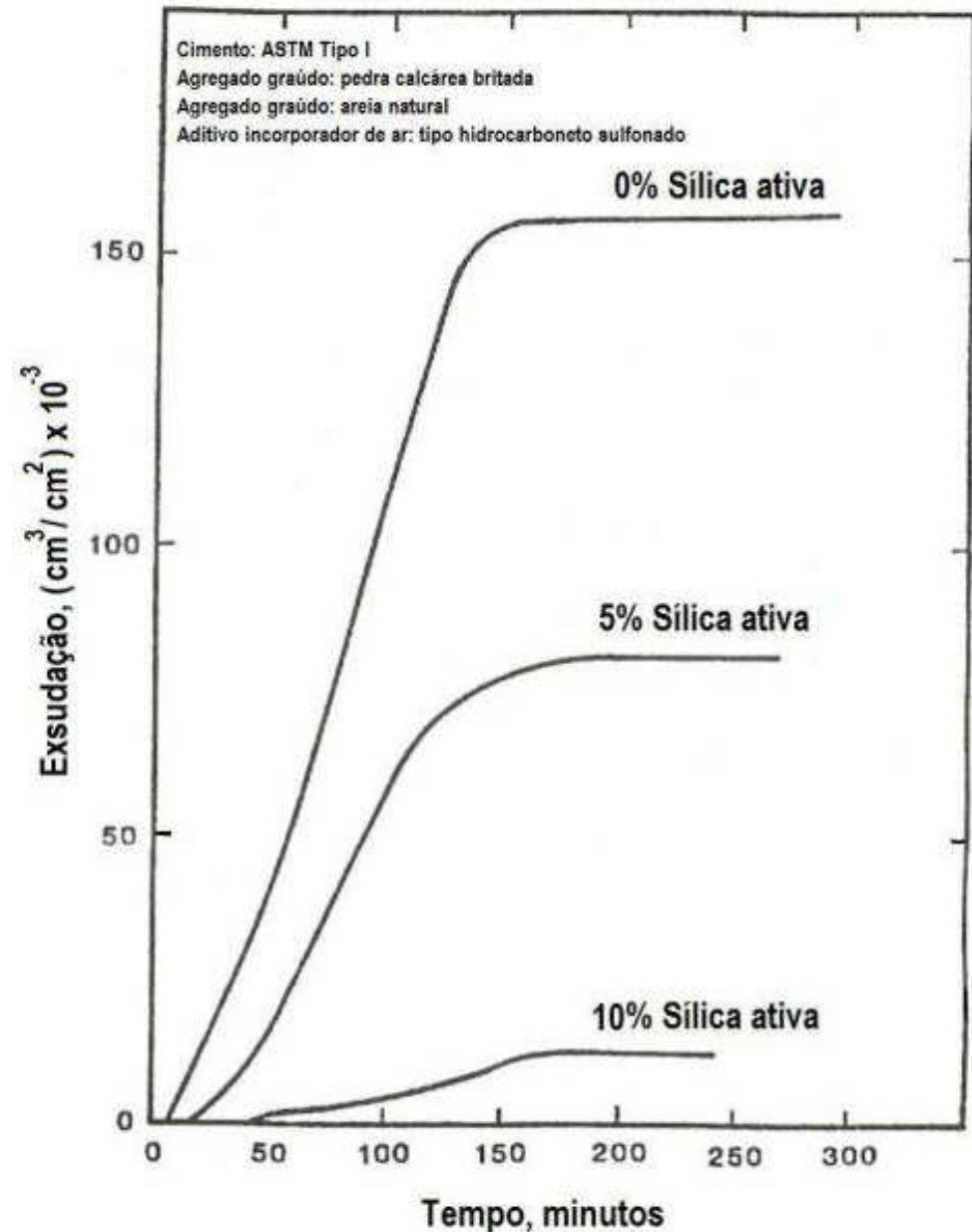
# Influência das adições minerais nas propriedades do concreto fresco

## Plasticidade e coesão

- ↑ relação “volume de sólidos /volume de água”
- ↑ trabalhabilidade
- ↓ energia de bombeamento e melhor acabamento

## Exsudação e segregação

- ↑ volume de finos e ↑ homogeneidade
- ↓ quantidade de canais de exsudação



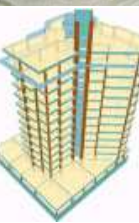
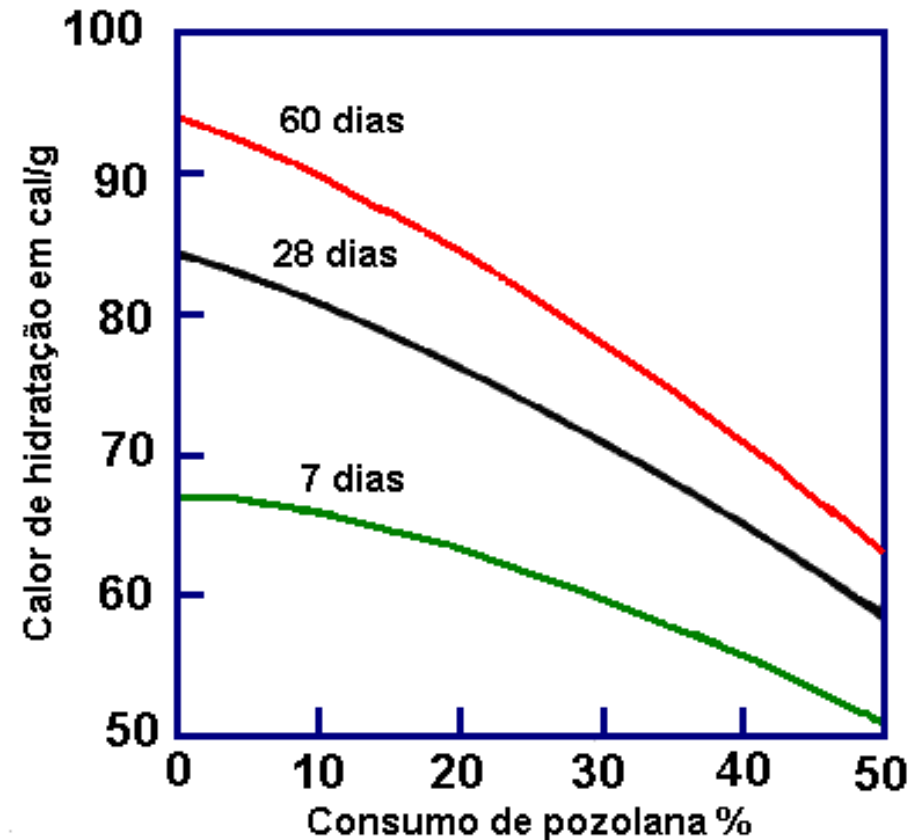
# Influência das adições minerais nas propriedades do concreto fresco

## Consumo de água

- Efeito dispersor das partículas pequenas (forças eletrostáticas)
- Superpozolanas → ↑ consumo  $H_2O$
- Uso de aditivos **superplastificantes**

## Calor de hidratação

- Clínquer: estágio de energia elevado
- Reação pozolânica: ↓ calor de hidratação do que nas reações do cimento
- ↓ risco de fissuração térmica

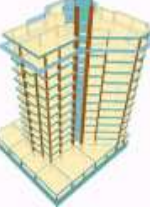
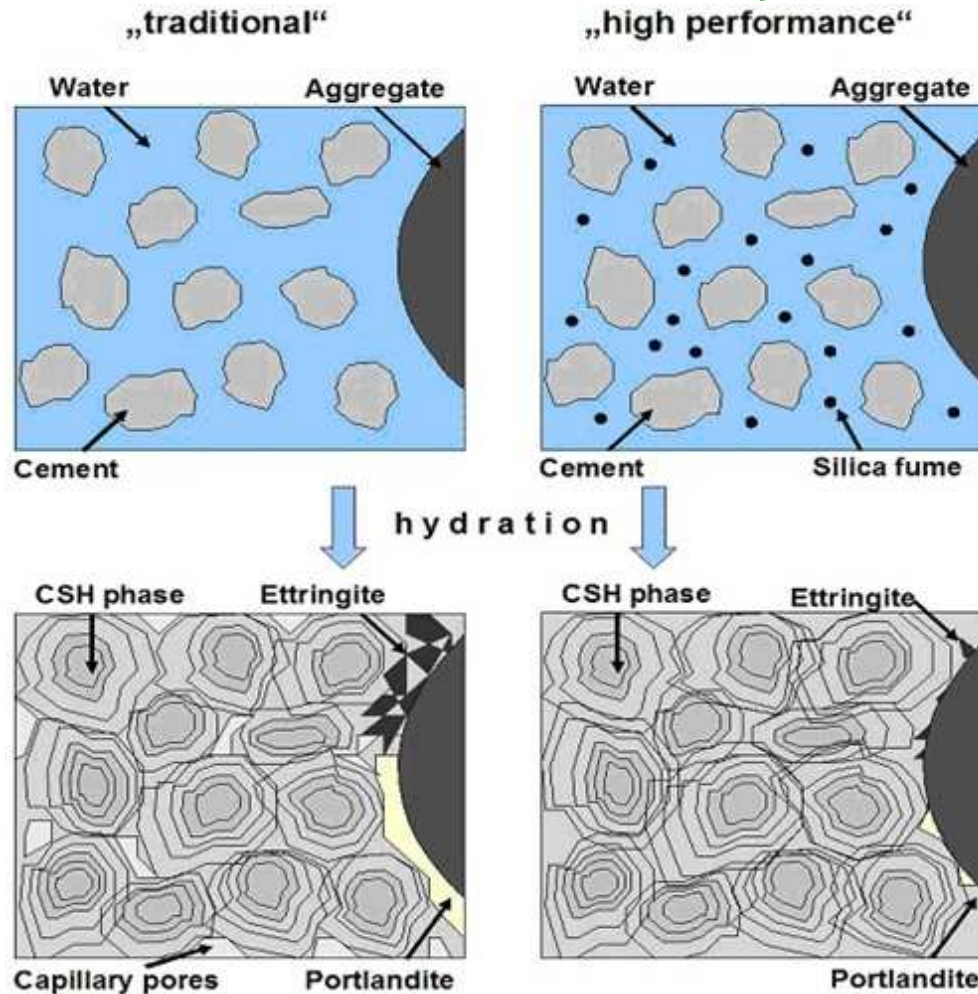




# Influência das adições minerais nas propriedades do concreto endurecido

## ■ Resistência Mecânica

- Formação de composto mecanicamente resistente
- Refinamento dos poros e dos cristais na pasta
- ↑ resistência da matriz na zona de transição



# Influência das adições minerais nas propriedades do concreto endurecido

## Durabilidade

- ↓ porosidade e permeabilidade do concreto
- ↓ ingresso de agentes nocivos

## Resistência a sulfatos

- Refinamento dos poros
- ↓ quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  disponível para combinar com sulfatos e gerar compostos expansivos

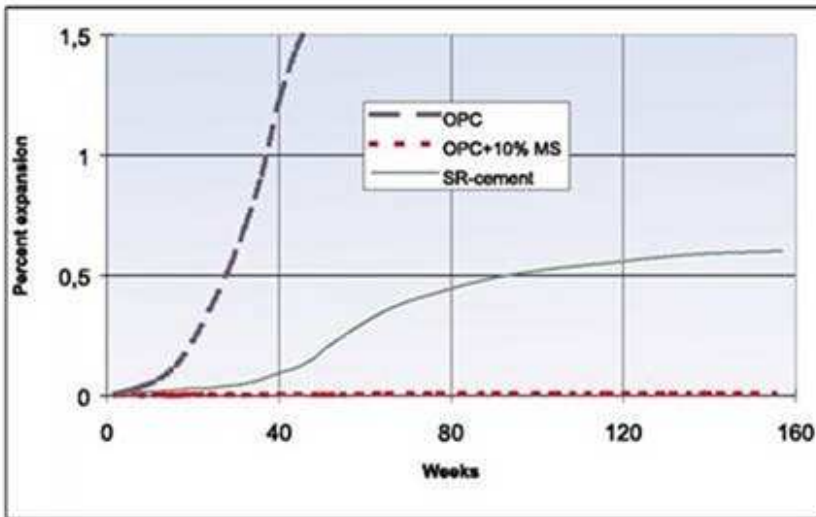
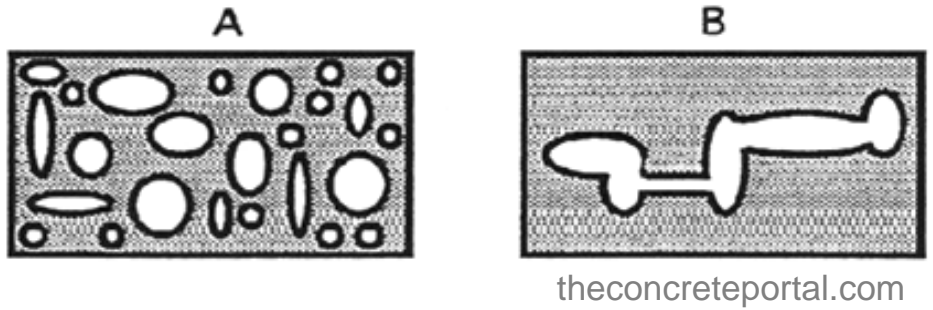
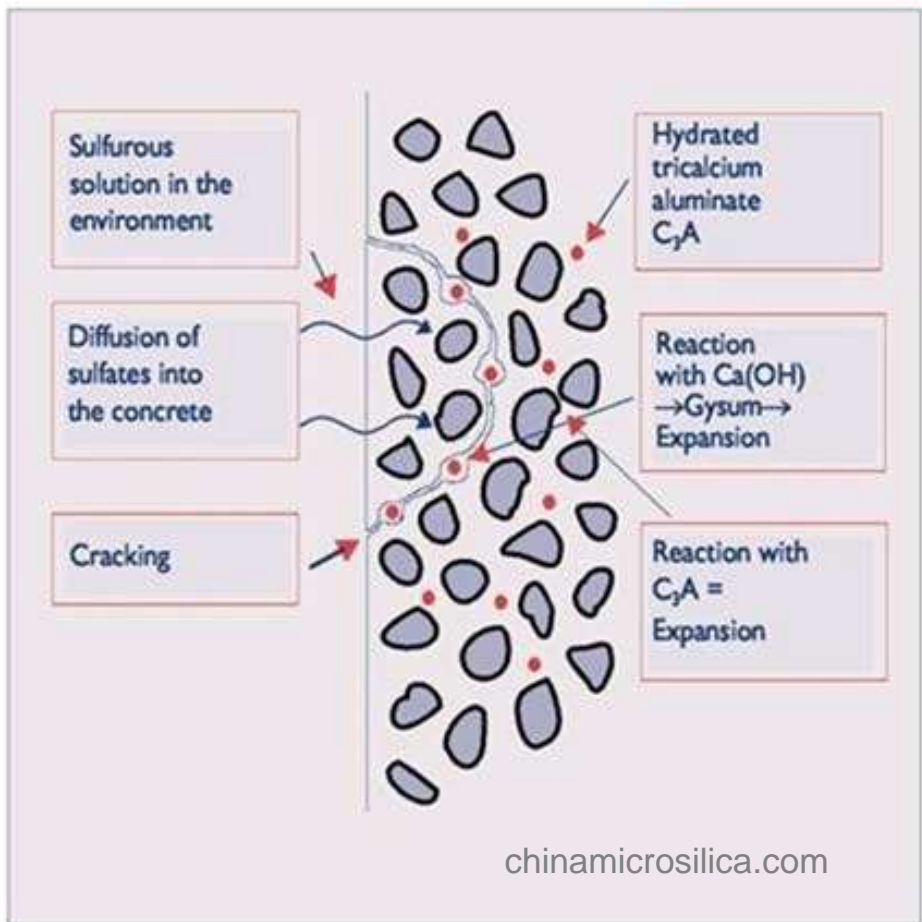


Fig. 2 Effect of microsilica on sulfate attack. (5)

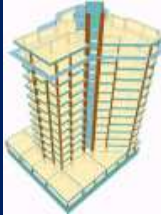


theconcreteportal.com

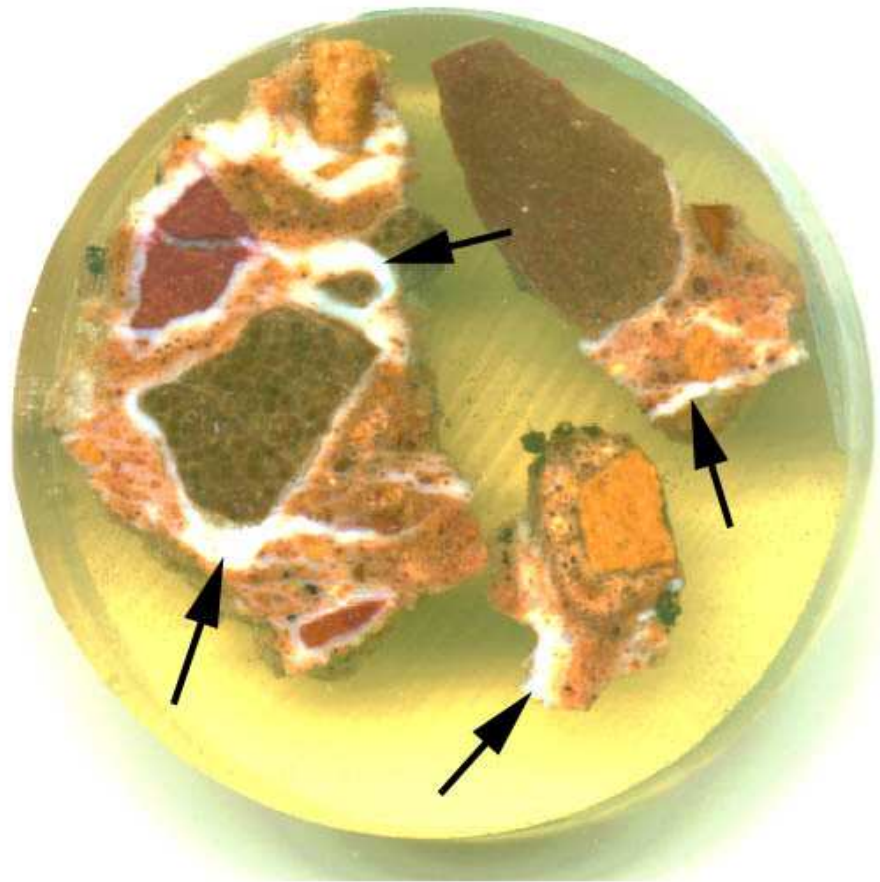


chinamicrosilica.com

Fig. 1 Schematic diagram of sodium sulfate attack



# Influência das adições minerais nas propriedades do concreto endurecido

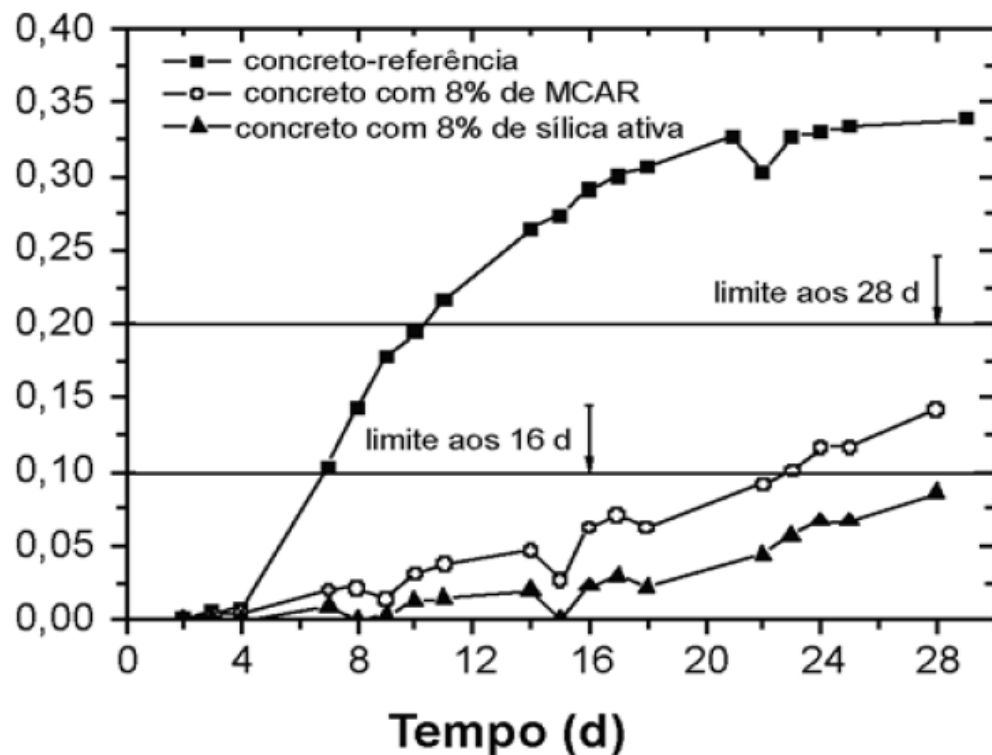


Seção polida de concreto com ataque por sulfato. Concreto de auto-estrada no Reino Unido. Formação de taumasita ao redor de agregado gráúdo do tipo litológico calcário acompanhado de fissuras.

# Influência das adições minerais nas propriedades do concreto endurecido

- Reação álcali-agregado (RAA)
  - ↓ absorção de água
  - ↓ total de álcalis (substituição de parte do cimento)
  - Consumo de parte dos álcalis pela reação pozolânica

Coeficiente de expansão linear (%)



theconcreteportal.com





# Justificativas para o uso de adições

## ■ Técnicas

- Maior coesão
- Menores exsudação e segregação
- Redução da porosidade capilar
- Redução da permeabilidade
- Redução da carbonatação
- Maior resistência a sulfatos
- Redução do calor de hidratação
- Inibição da reação álcali-agregado
- **Maior Durabilidade**



## ■ Econômicas

- Redução do consumo energético

## ■ Ecológicas

- Aproveitamento de subprodutos e resíduos poluentes
- Preservação das jazidas



CP IV  
pozzolana  
(calcinação da  
argila)

CP III  
(escoria de  
siderúrgicas)

CP IV  
(pozzolana das  
termoelétricas)



# Principais adições minerais



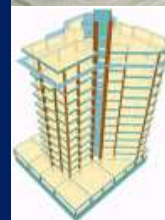
**Prof. M.Sc. Ricardo Ferreira**

Fonte: Egydio Herve Neto  
Dario Dafico  
Silvia Selmo  
Rubens Curti



# Fíler Calcário

- Materiais **carbonáticos**.
- Praticamente **inertes** na mistura.
- **Dimensão média similar ao do cimento** ou menor.
- Os **fíleres não devem aumentar a demanda de água** da mistura quando usados em concreto, **a menos que usados com aditivo redutor de água**, para não prejudicar a resistência do concreto às intempéries ou a proteção do concreto à armadura.
- **Ação predominantemente física**.
- Devem **ser fisicamente compatíveis com o cimento**.
- Principais efeitos no concreto:
  - ↑ trabalhabilidade
  - ↓ permeabilidade
  - ↓ capilaridade
  - ↓ exsudação
  - ↓ tendência à fissuração





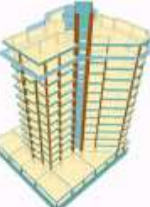
# Escória de alto-forno

- A escória é um **subproduto da produção do ferro-gusa**, durante reações de redução ou oxidação do metal líquido a  $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ .
- Gera-se cerca de **300kg de escória por tonelada de ferro-gusa**.
- Quando **rapidamente resfriada** (solidifica-se como material vítreo) e **finamente moída**, desenvolve propriedade de **hidraulicidade latente**. Podendo ser utilizada como material cimentício, mas na presença de um álcali ativador ou iniciador.
- Se **resfriada naturalmente** ao ar, os seus óxidos se cristalizam e perdem as características hidráulicas, tornando-se **inerte**.
- Composição química: **Cal, Sílica, Alumina**.
- Principais efeitos no concreto:
  - **↑ trabalhabilidade** (dispersão das partículas);
  - Desprendimento de **calor de forma lenta** (↓ risco de fissuração);
  - **Refinamento** dos poros (microestrutura mais densa);
  - **↑ resistências** mecânicas em idades avançadas;
  - **↑ durabilidade**.





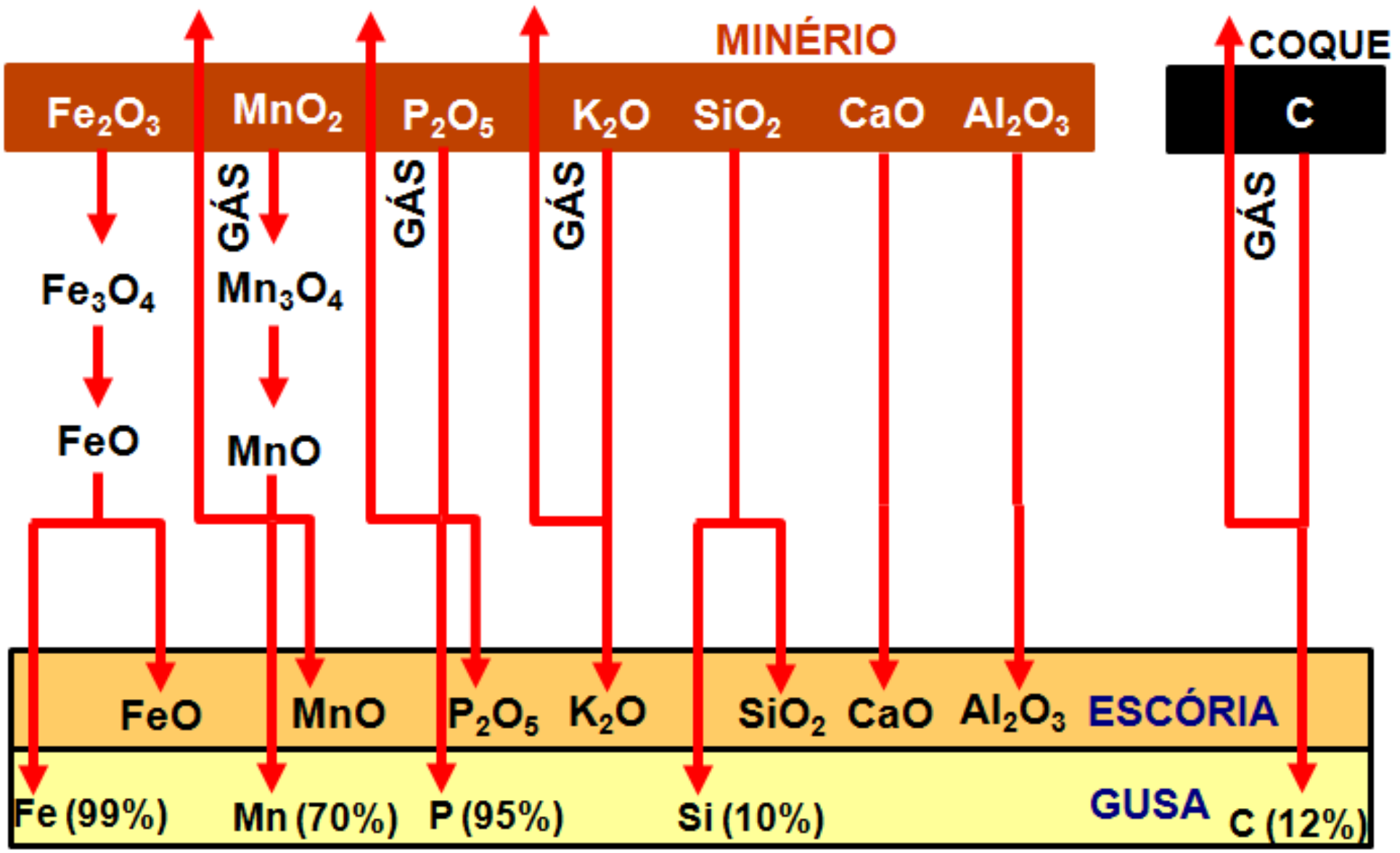
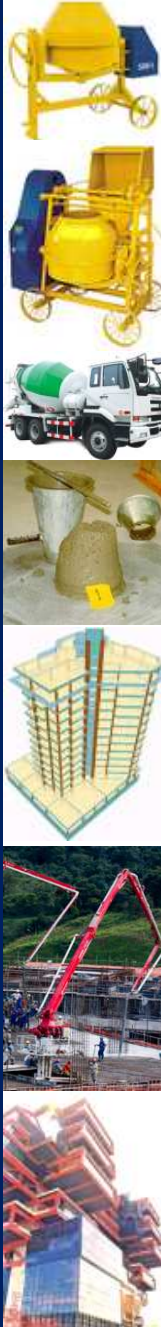
# Escória de alto-forno Produção



Aspecto da escória solidificada e resfriada

# Escória de alto-forno

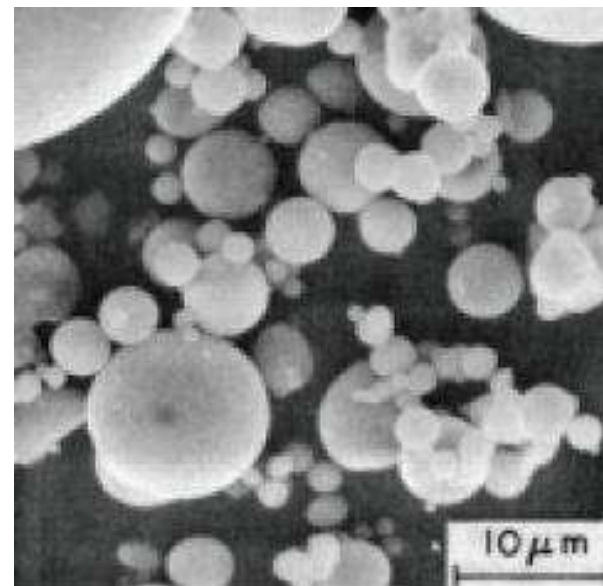
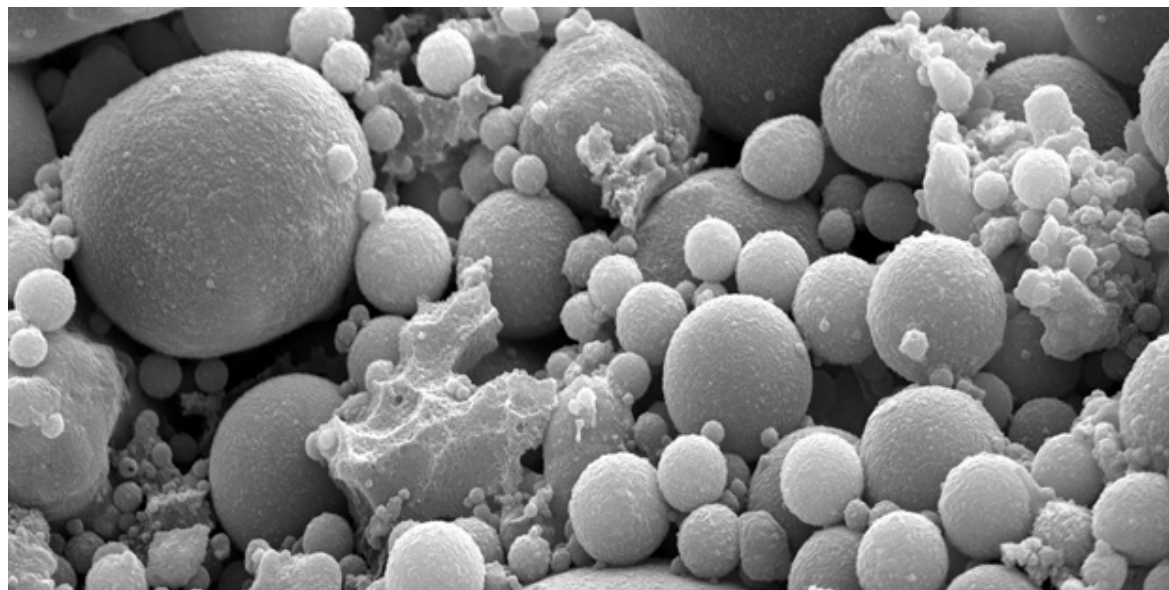
## Composição química





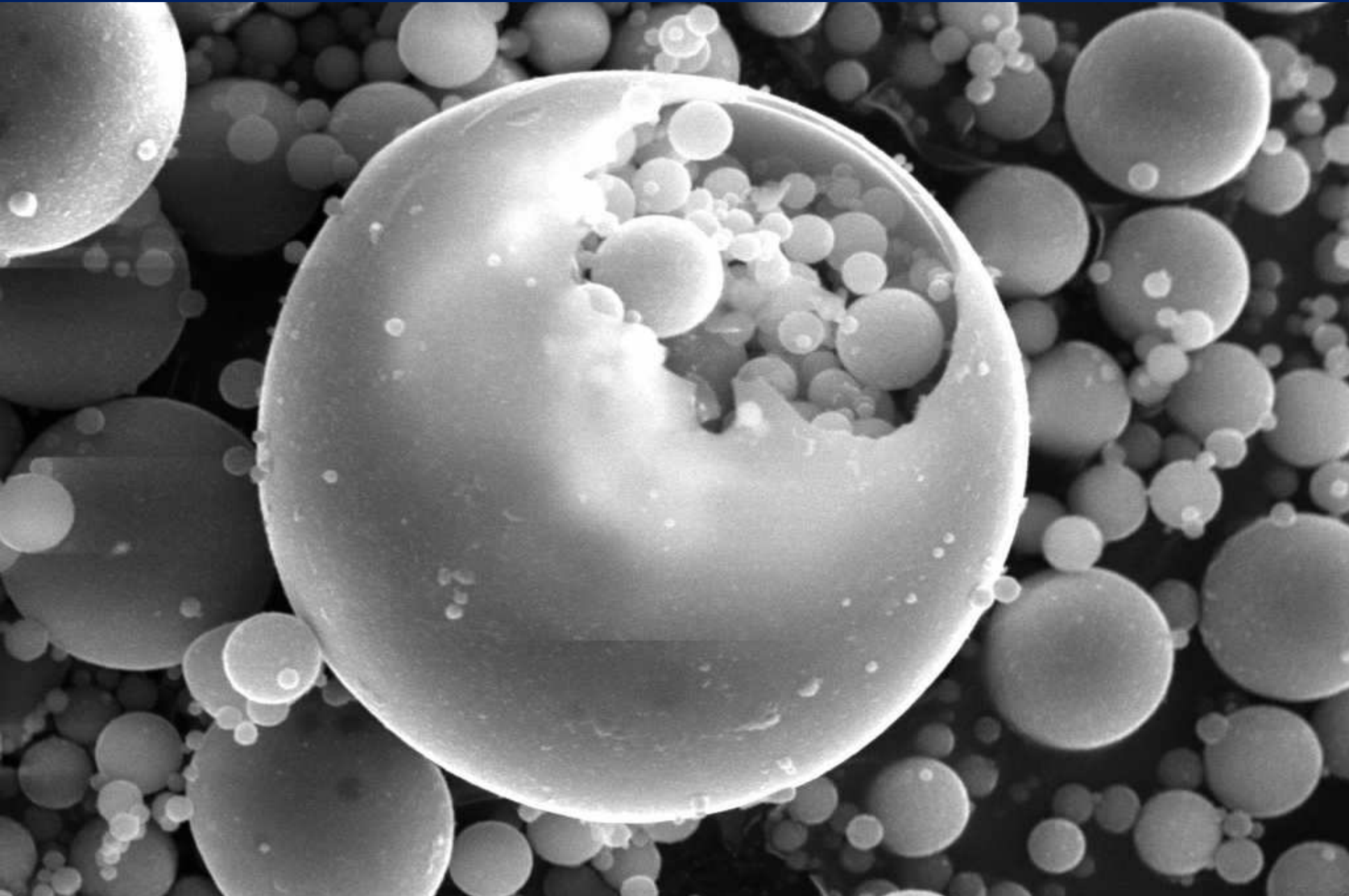
# Cinza Volante

- Pozolana obtida por precipitação mecânica ou eletrostática dos **gases de exaustão em termelétricas a carvão** mineral.
- Suas **partículas são esféricas**, com diâmetros entre **1 $\mu$ m e 100 $\mu$ m**, e têm finura elevada, normalmente entre **250 m<sup>2</sup>/kg e 600 m<sup>2</sup>/kg**.
- Constituídas por **silica amorfa**; contendo **Al, Fe e álcalis**.
- A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.
- Teor de cálcio variável, depende do tipo de carvão utilizado.
- Teor de carbono não-queimado variável ( > 5% indesejável)

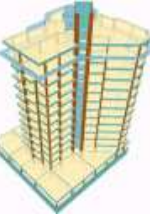




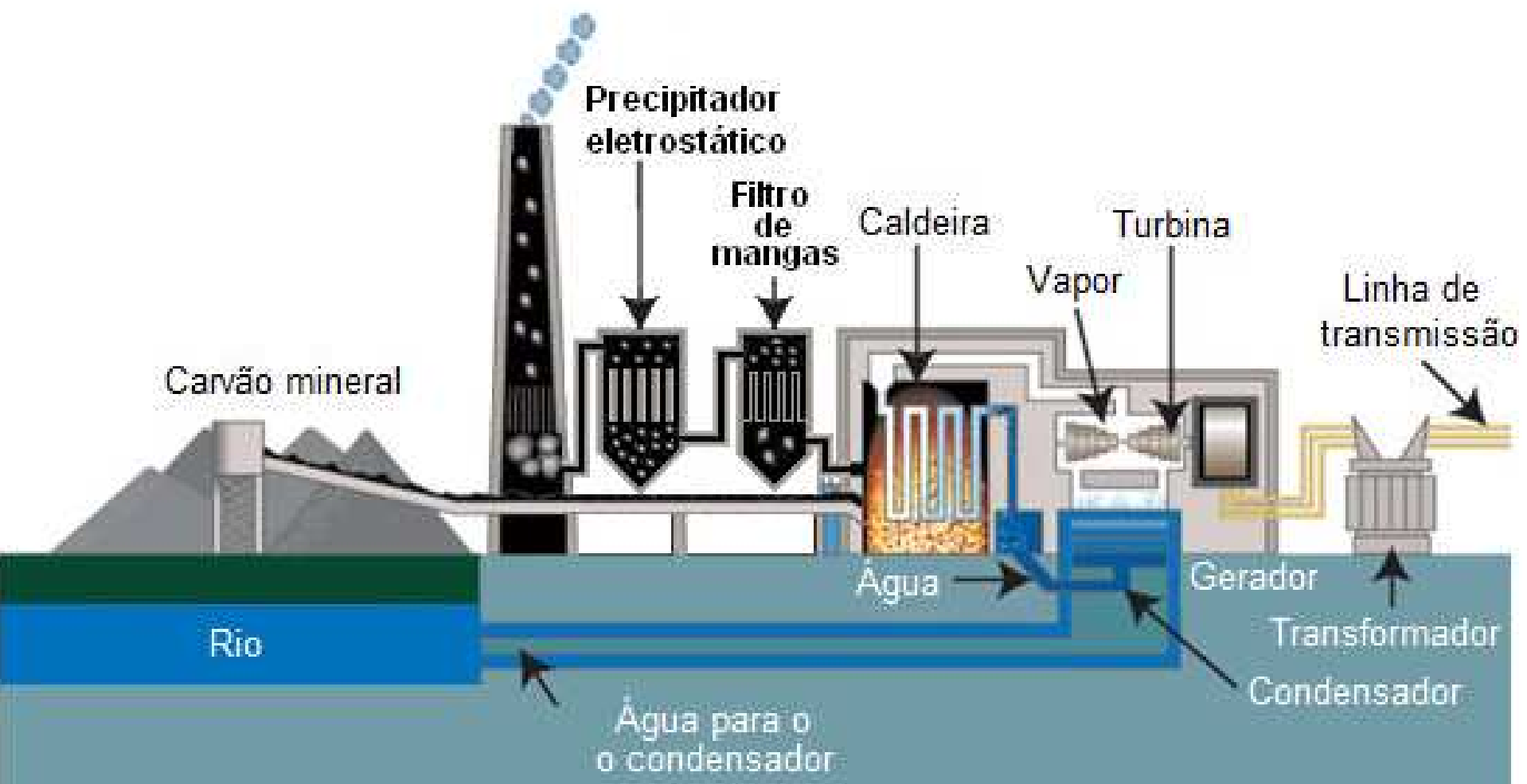
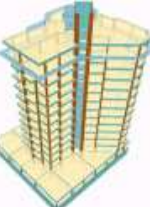
# Cinza Volante



10 um SE1 25 kV 1 nA

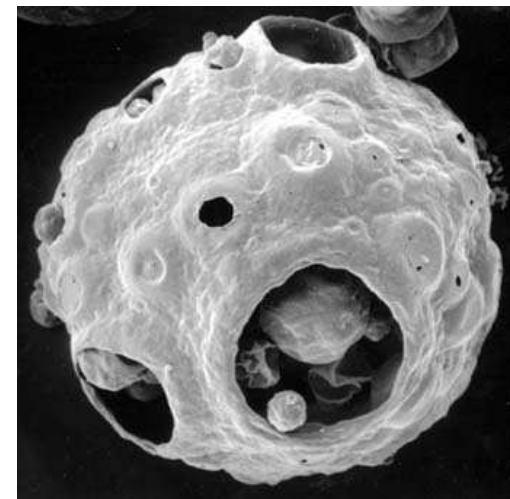


# Cinza Volante Produção

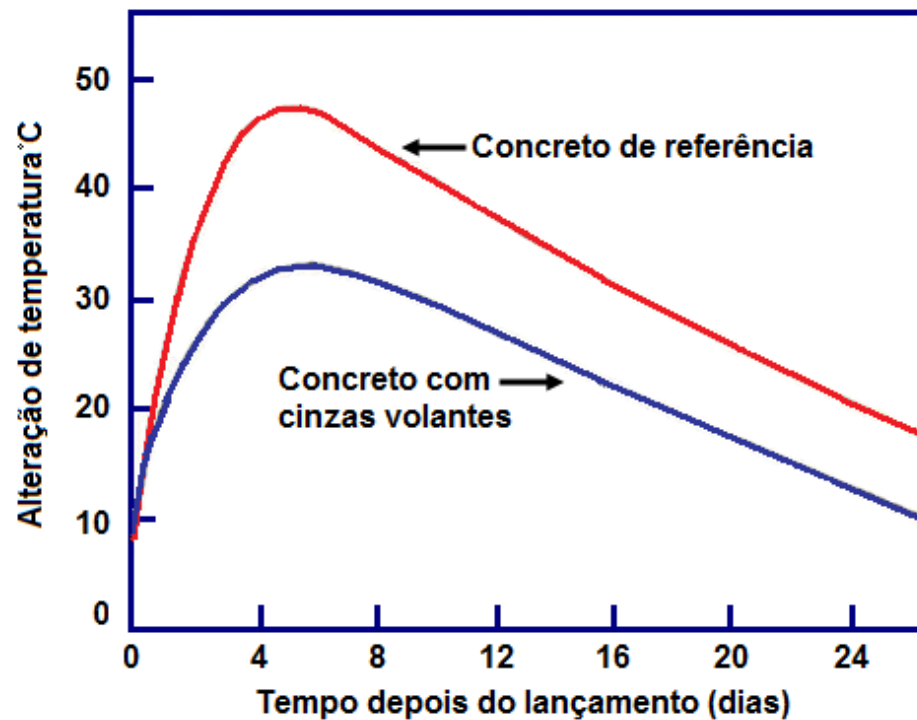
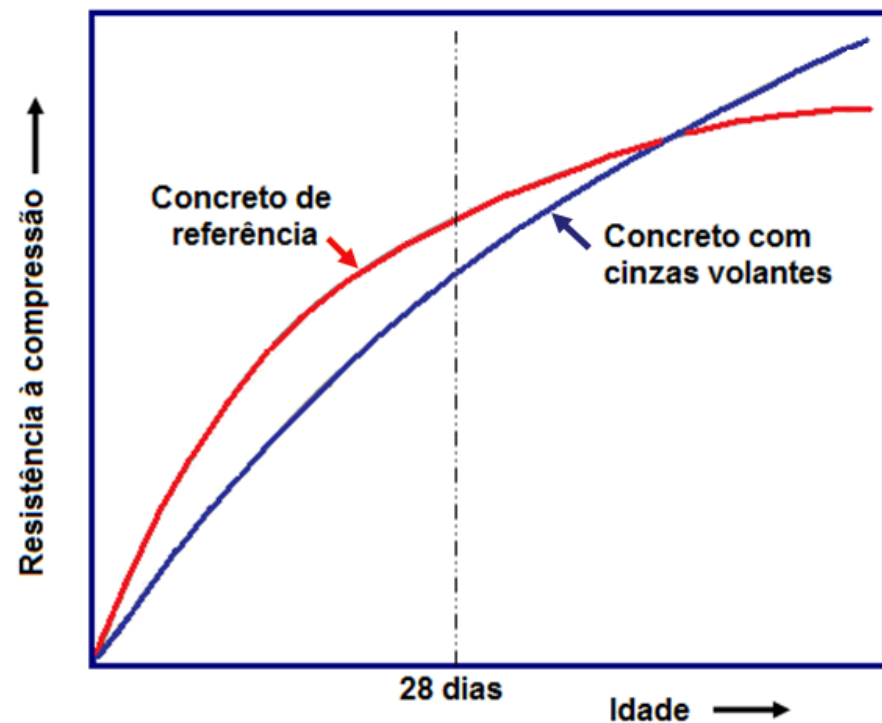


# Cinza Volante

- Principais efeitos no concreto :
  - Retardamento do tempo de pega;
  - ↓ calor de hidratação (< retração e < fissuração);
  - ↑ trabalhabilidade e maior coesão;
  - ↓ da porosidade (< permeabilidade);
  - Pode inibir a RAA.



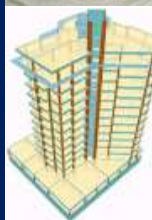
<http://constructionz.com/cementflyash>





# Argila Calcinada

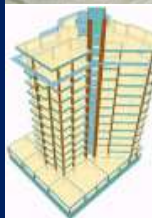
- Segundo LEA (1971) o desenvolvimento da **atividade pozolânica está associado à temperatura de queima** na qual a estrutura cristalina da argila perde água, **resultando em um produto de estrutura amorfa e elevada reatividade química**.
- A argila termicamente ativada, em contato com o meio alcalino das pastas de cimento Portland, promove **a dissolução do silício e do alumínio** que posteriormente, com a **disponibilidade de cálcio**, irão **cristalizar-se em C-S-H**, ou seja, ocorre a reação pozolânica. (TAYLOR, 1997; HE et al., 1995).
- As argilas mais utilizadas são as **cauliníticas, montmoriloníticas e illitas** (BARATA, 1998).
- AMBROISE et al. (1992) constataram que as produzidas com **maior conteúdo de caulinita são mais reativas**.





# Sílica Ativa

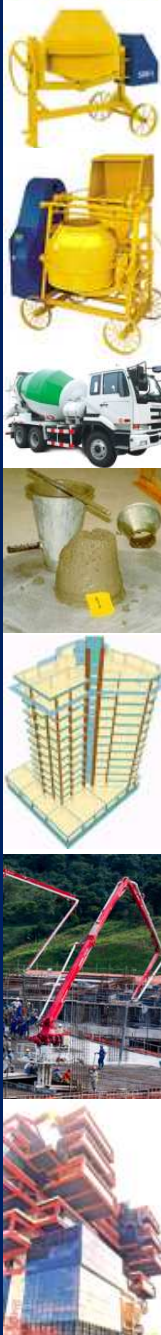
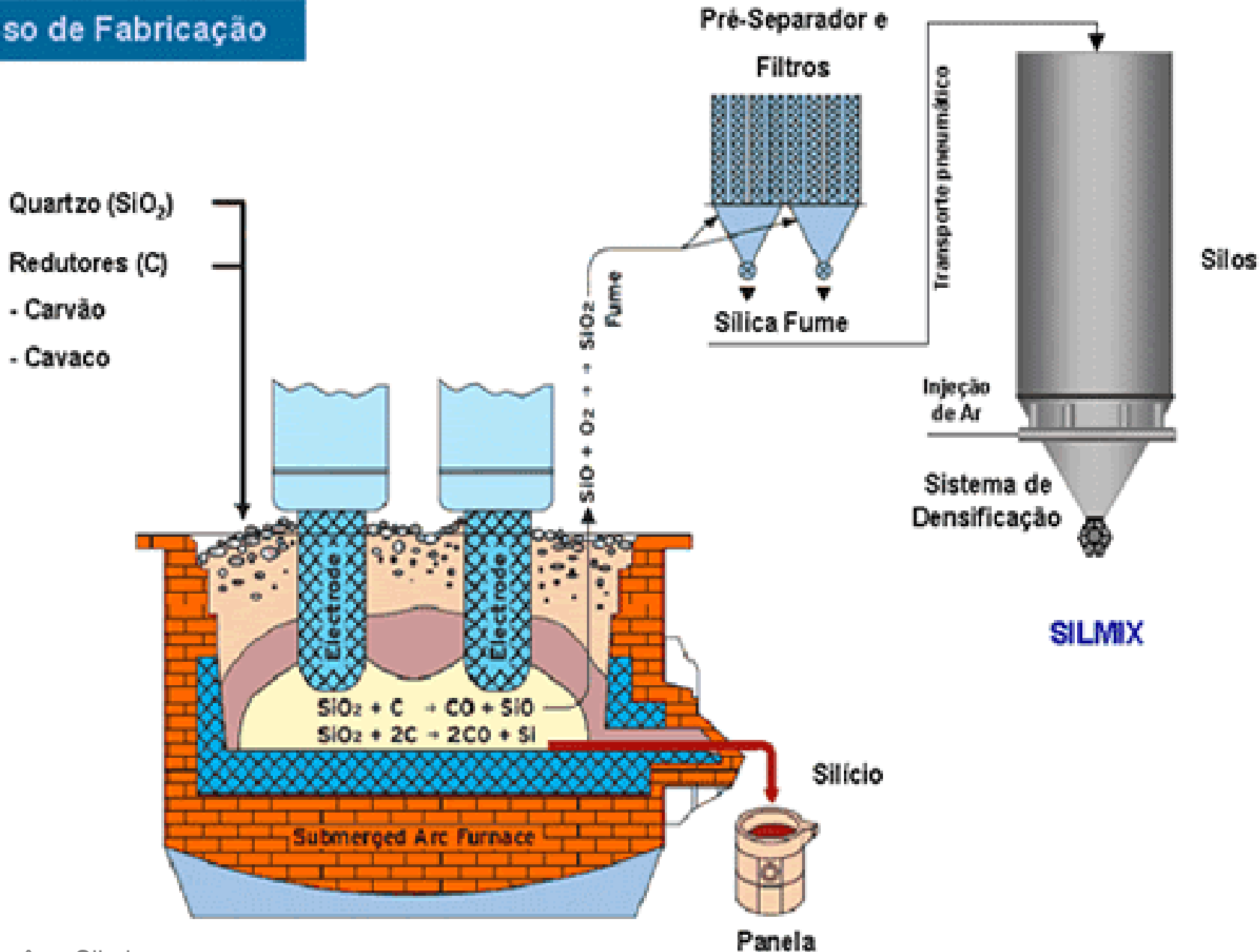
- **Subproduto da fabricação de silício ou liga de ferro silício** a partir da redução de quartzo e carvão em forno elétrico de eletrodos de arco submerso em altas temperaturas ( $\approx 2000^{\circ}\text{C}$ ).
- A sílica ativa é composta basicamente de **sílica amorfa,  $\text{SiO}_2$** , com teor que varia entre **85% a 90%**, dependendo do tipo de liga a ser produzida. Quanto maior o teor de silício empregado para a fabricação das ligas maior o teor de sílica amorfa da sílica ativa.
- A sílica ativa apresenta variações de **cor, do cinza escuro até o branco**. Uma exceção é o SiMn-CSF, que é **marrom**. O teor de carbono e de ferro tem influencia preponderante na coloração da sílica ativa.
- O uso de **toras de madeira** no processo de queima pode influenciar na composição da sílica ativa, especialmente no **teor de carbono**.





# Sílica Ativa Produção

## Processo de Fabricação

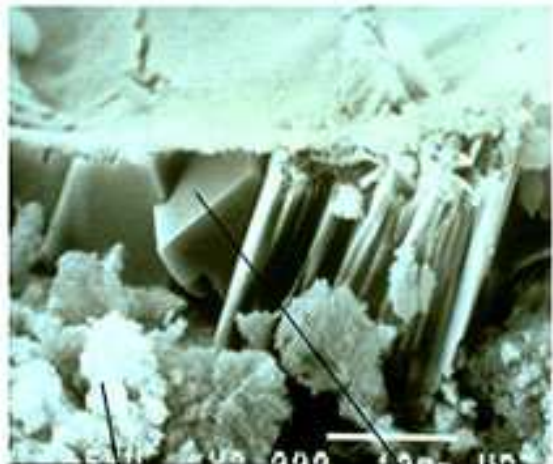


# Sílica Ativa

## Histórico

- **1952**: primeira utilização do subproduto da fabricação de silício metálico e das ligas de ferro silício é relatada por um **pesquisador norueguês, Bernhardt**.
- **Década de 70**: começa a ser utilizada como material cimentício suplementar ao concreto, pela **Escandinávia**, chegando ao mercado **Norte Americano no início dos anos 80**.

Concreto sem Sílica Ativa

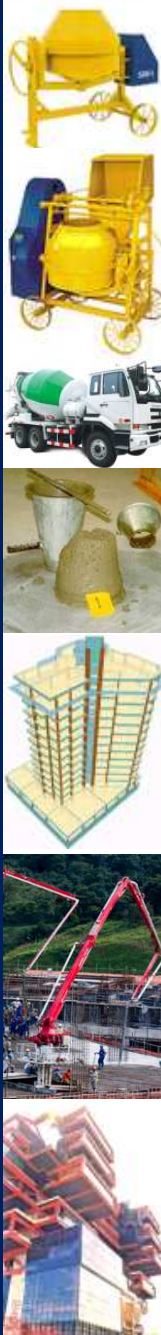
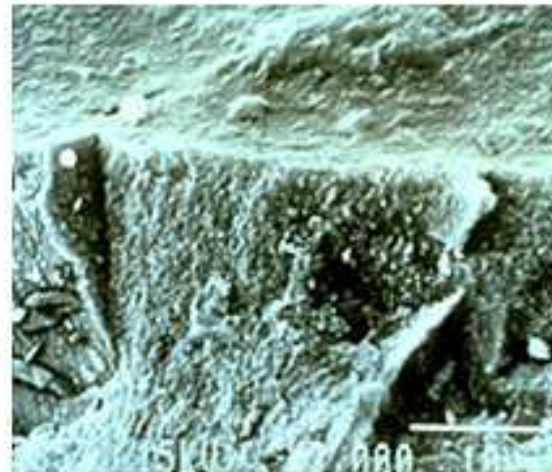


C - S - H

Ca(OH)<sub>2</sub>

Vázios

Concreto com Sílica Ativa



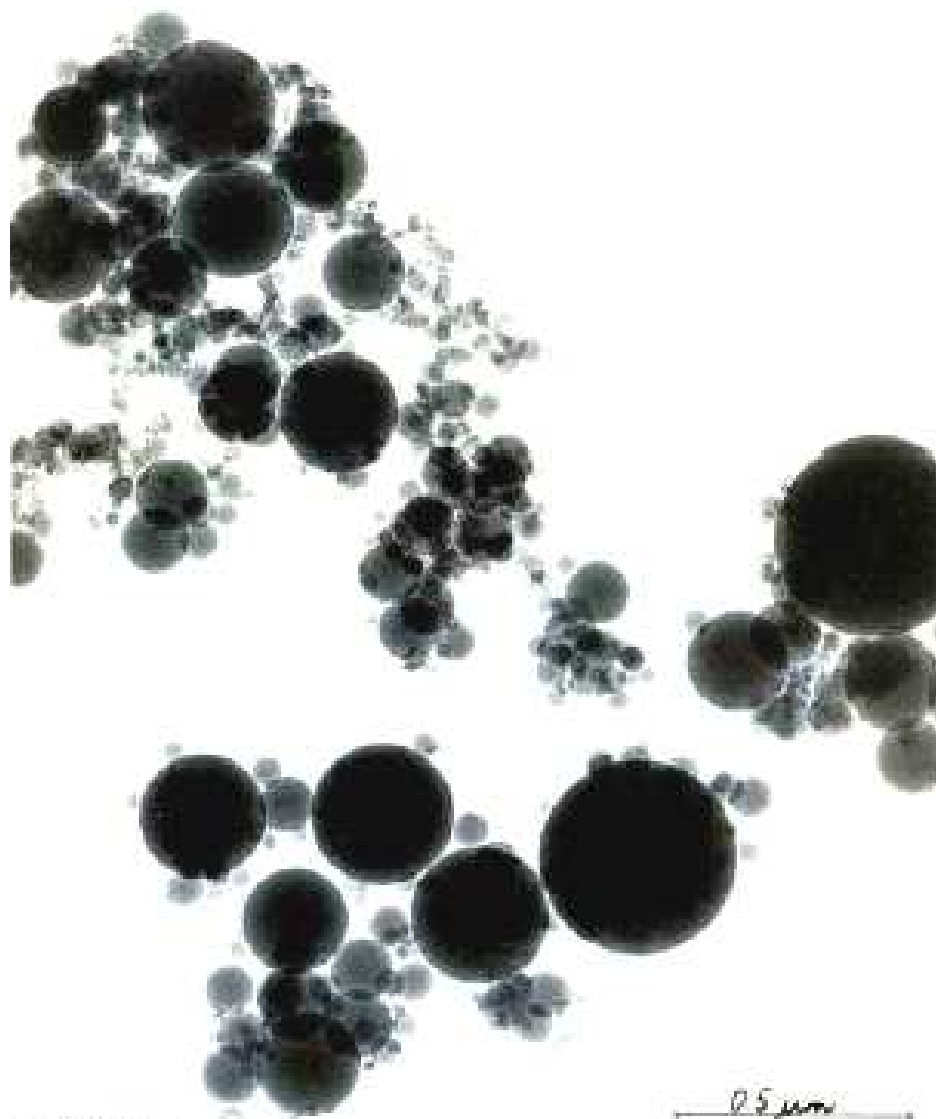
# Sílica Ativa

- A sílica ativa atualmente é disponível em **quatro formas**:
  - **tradicional**
  - em forma de **lama**
  - **densificada**
  - misturada ao **cimento** Portland



# Sílica Ativa

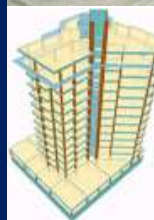
- Principais efeitos no concreto:
  - Refinamento dos poros
  - ↑ propriedades mecânicas
    - ↑ de 10% a 40% de  $f_c$
  - ↑ coesão da pasta
  
- Desvantagens:
  - ↑ consumo de água
  
- Carbonatação:
  - Consumo elevado do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
  - ↓ Ph da água capilar



Microssilica  
983

0.5  $\mu\text{m}$

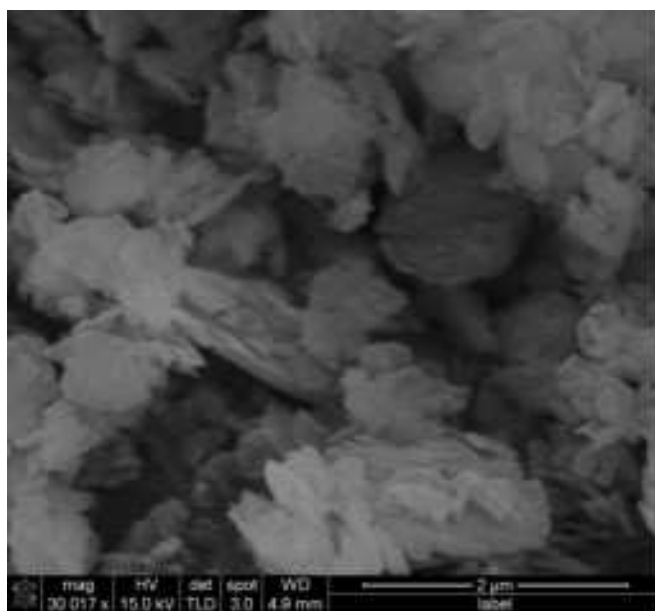
p. 86/19



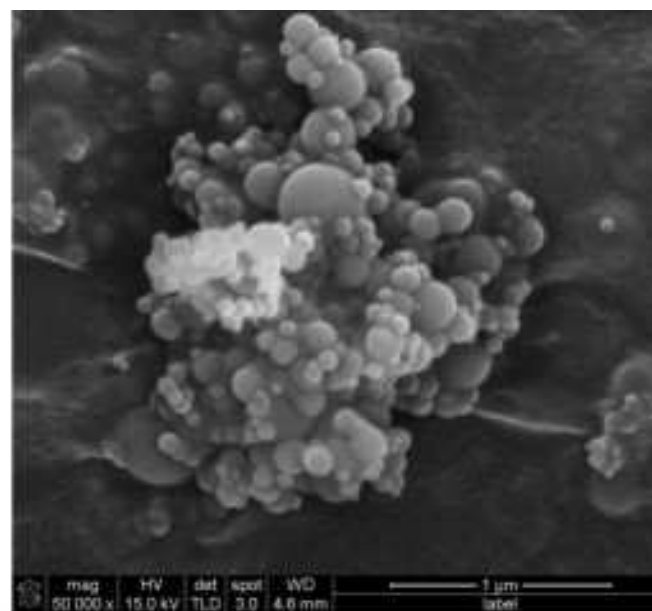


# Metacaulim

- **Calcinação e moagem de argilas caulínicas**
  - Queima rigorosamente controlada:  $t \sim 600^{\circ}\text{C}$  a  $900^{\circ}\text{C}$
- **Matéria prima**
  - depósitos naturais de **argila caulínica** extremamente finas
  - Subproduto industrial do beneficiamento do **caulim destinado à cobertura de papel**
- **Composição química: sílica e alumina** no estado amorfo.
- **Efeito mecânico semelhante ao da sílica ativa**

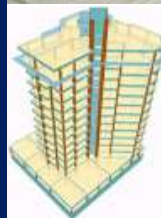


(a)



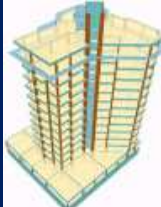
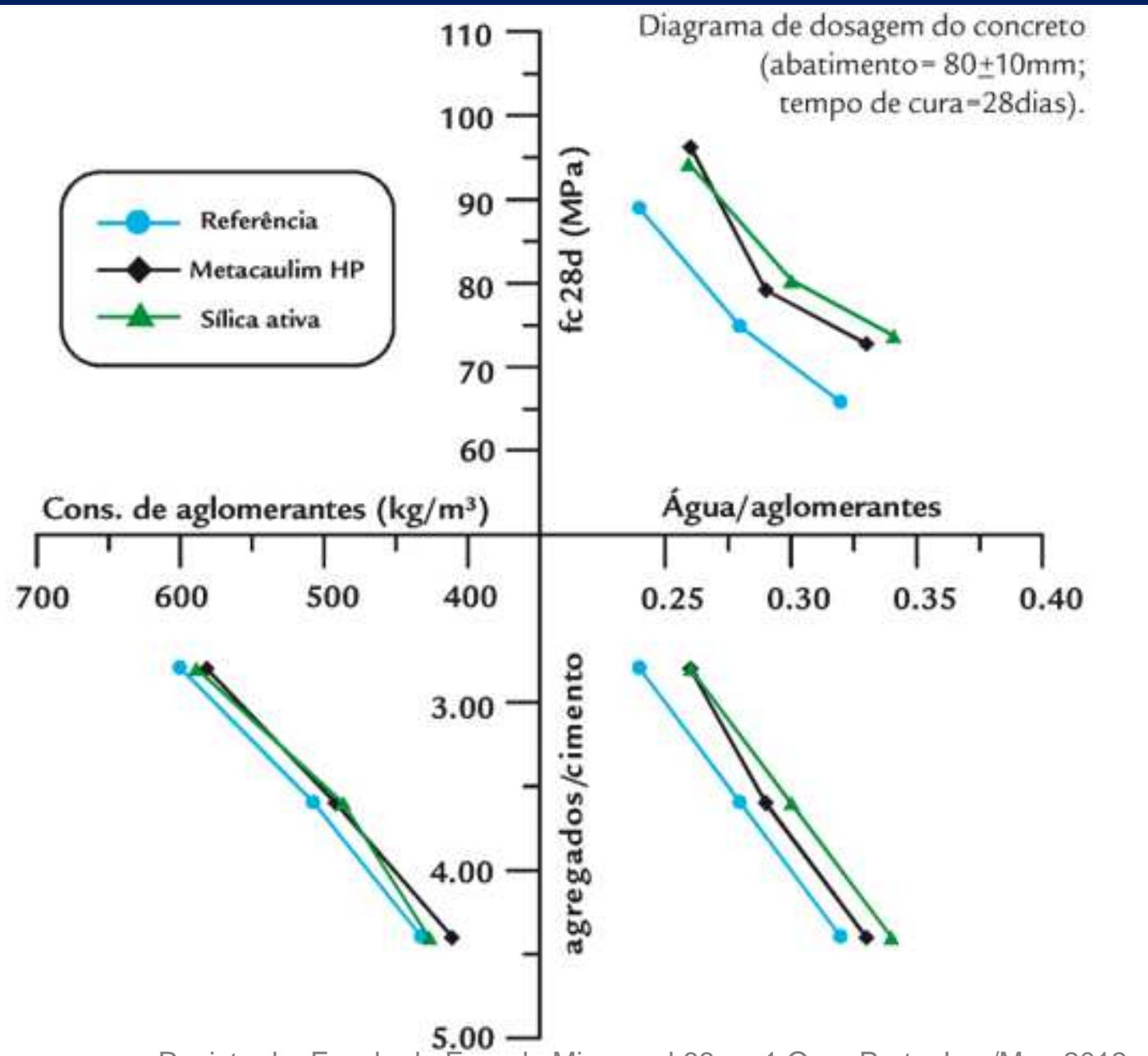
(b)

SEM images of metakaolin (a) and silica fume (b) particles





# Metacaulim

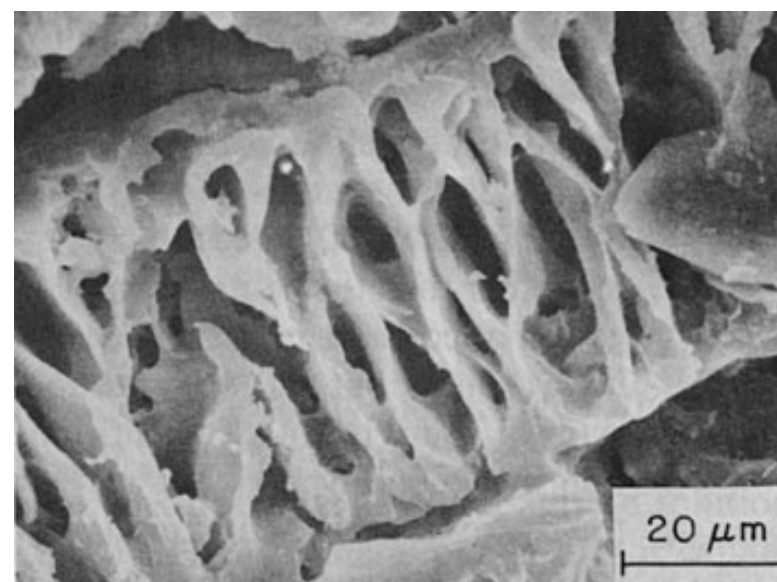


# Cinzas de Casca de arroz

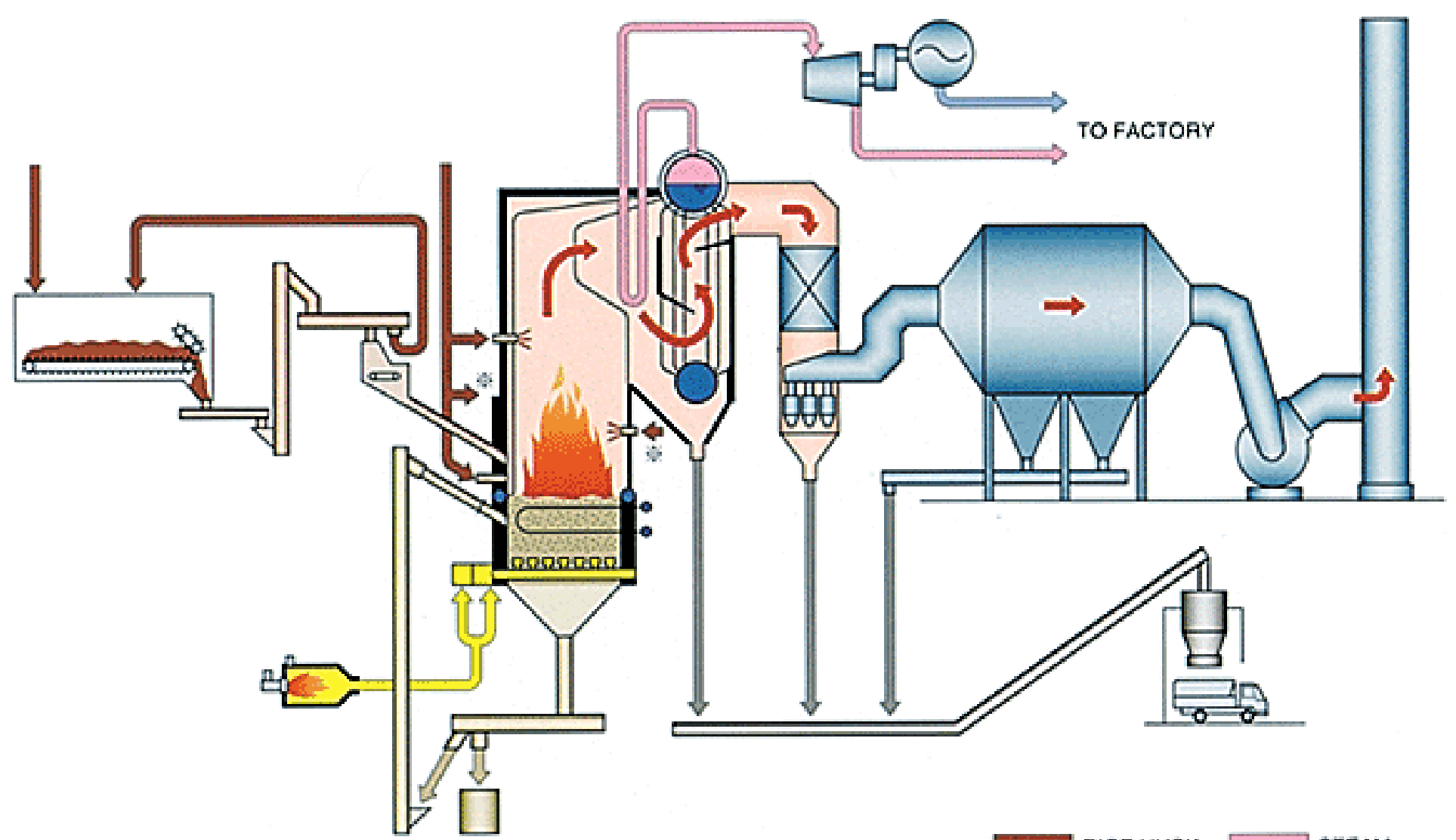
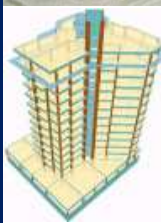
- 1000 kg Arroz → 200 kg Casca → 40 kg CCA (4%)



- Queima controlada e moagem:
  - Sílica na forma não-cristalina
  - Estrutura celular porosa
  - Pozolana altamente reativa
  - Propriedades similares à sílica ativa



# Cinzas de Casca de arroz Produção

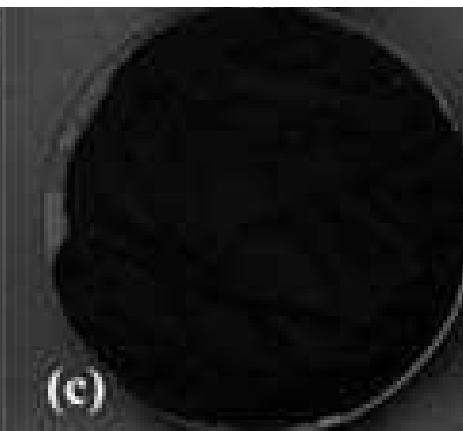
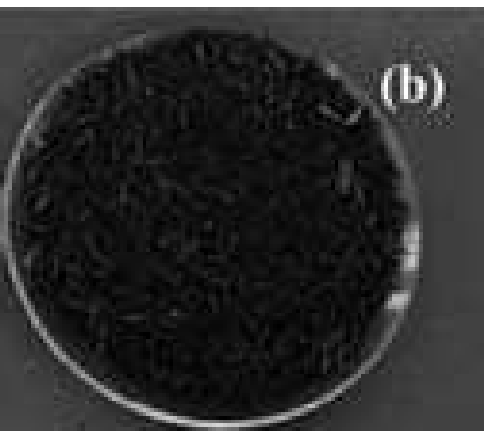
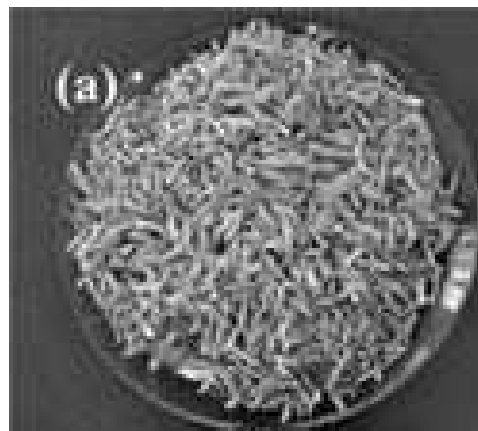


- |   |           |   |         |
|---|-----------|---|---------|
|  | RICE HUSK |  | STEAM   |
|  | GAS       |  | WATER   |
|  | ASH       |  | HOT AIR |



# Cinzas de Casca de arroz

- A queima da casca de arroz em diferentes temperaturas produz diferentes tipos de cinzas.



(a) casca de arroz in natura (b) CCA (c) CCA moída residual e (d) CCA moída queimada a 700 °C.



# Cinzas de Casca de arroz

## TABELA DE TRAÇOS COMPARATIVOS

ME 3,04 1,70 1,00 2,62 2,66 2,68 2,68

### CONSUMO DE MATERIAIS

Traço	Tor de Adição (%)	A / C	Cimento (kg/m³)	Adição (kg/m³)	Água (l/m³)	Areia de quartzo (kg/m³)	Areia de brita (kg/m³)	Pedra 0 (kg/m³)	Pedra 1 (kg/m³)	Aditivo Plastificante (kg/m³)	Acabamento (mm)	Ar Incorporado (%)	Massa Útil (kg/m³)
Sem adição	0.	0,543	350	0	190	412	412	292	681	1,750	65	1,8	2339
Casca de arroz	10.	0,494	350	35	190	391	391	292	681	1,925	45	1,8	2331

### Ensaio de durabilidade

### Resistência à compressão

Traço	Tor de Adição (%)	Ensaio de durabilidade						Resistência à compressão					
		Absorção com fervura		Índice de vazio		Massa unitária		24 horas		7 dias		28 dias	
		Individual (%)	Média (%)	Individual (%)	Média (%)	Individual (%)	Média (kg/m³)	Individual (Mpa)	Média (Mpa)	Individual (Mpa)	Média (Mpa)	Individual (Mpa)	Média (Mpa)
Sem adição	0.	—	4,15	—	9,35	—	2510	18,9	18,1	31,0	31,5	36,1	34,6
		—		—		—		17,2		32,0		33,2	
Casca de arroz	10.	—	2,85	—	6,55	—	2510	17,6	17,0	25,4	26,8	39,6	40,4
		—		—		—		15,4		28,1		41,3	

