



Introdução à Hidratação e Microestrutura do Cimento Portland

PCC 3222
2023

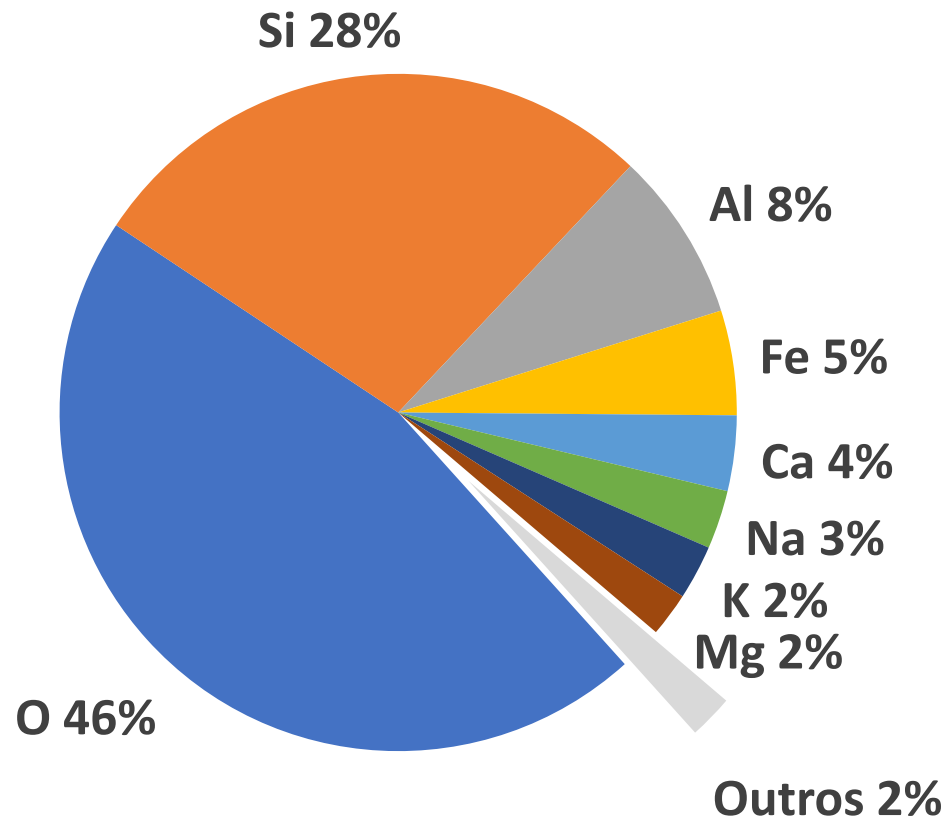
Objetivos da aula

- Compreender como o cimento endurece e o papel da porosidade no desempenho no longo prazo
 - os mecanismos de endurecimento do cimento
 - Como a hidratação do cimento afeta a porosidade da pasta
 - Correlacionar a microestrutura com o comportamento de concretos

Revisão

- Quais são as matérias primas do clínquer?
- O que são adições?
- Quais são as diferenças entre cimento CP II F e o CP V?

Elementos químicos do clínquer e a composição da crosta terrestre



~98% da composição da crosta terrestre

Revisão:



<https://forms.gle/brebaqeq7SvjWdJ76>

De micropartículas para macro sólido poroso

Dissolução

dos grãos de ligante

PRECIPITAÇÃO

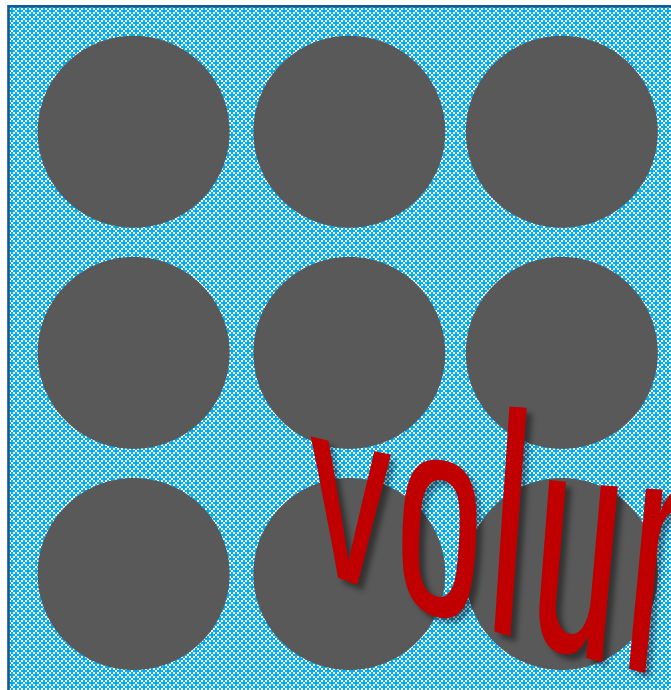
de novo sólido contínuo com geometria da forma

Endurecimento do Cimento

Hidratação: reação química com a água

aumento do volume de sólidos causa contato “molecular” entre cristais

Mistura



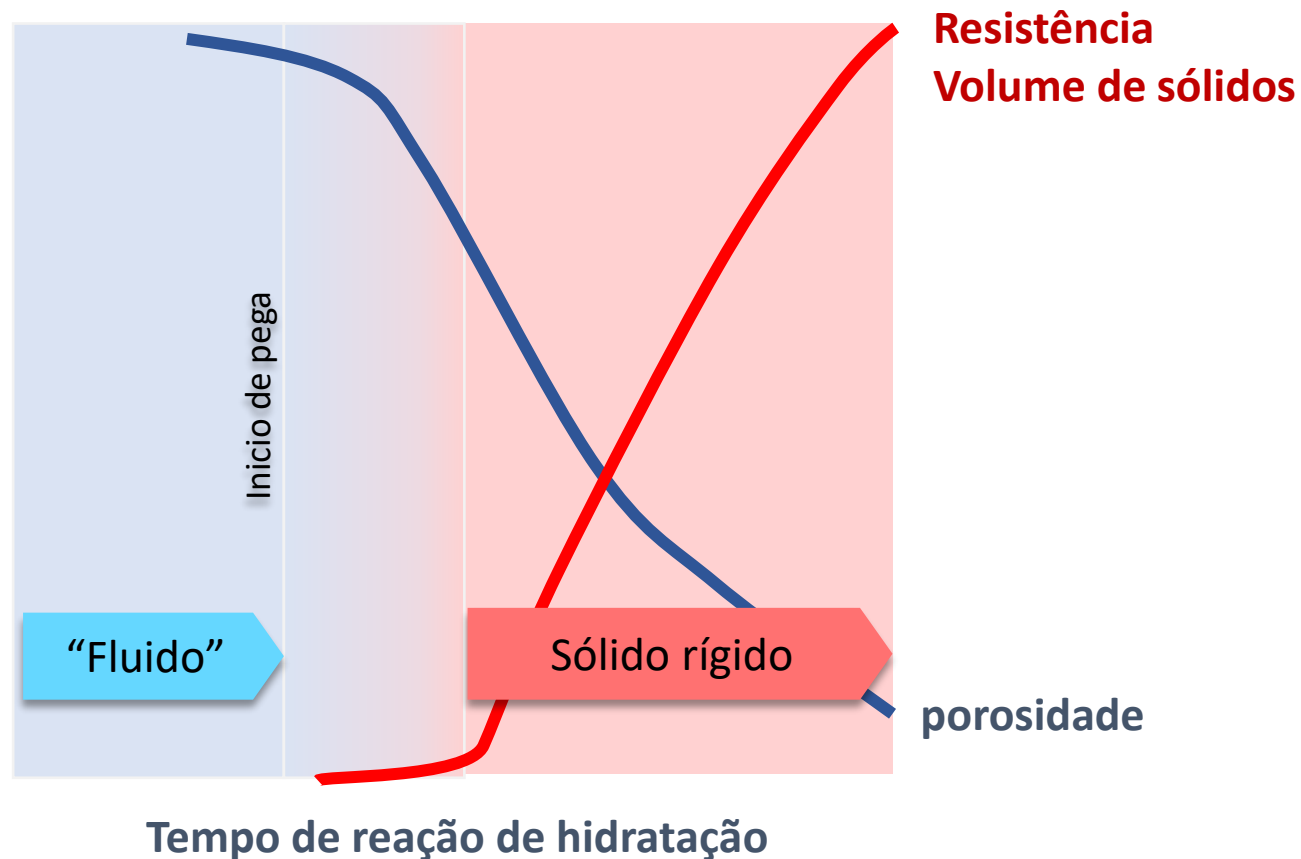
Tempo HR>95, T> 4°C



volume sólidos aumenta

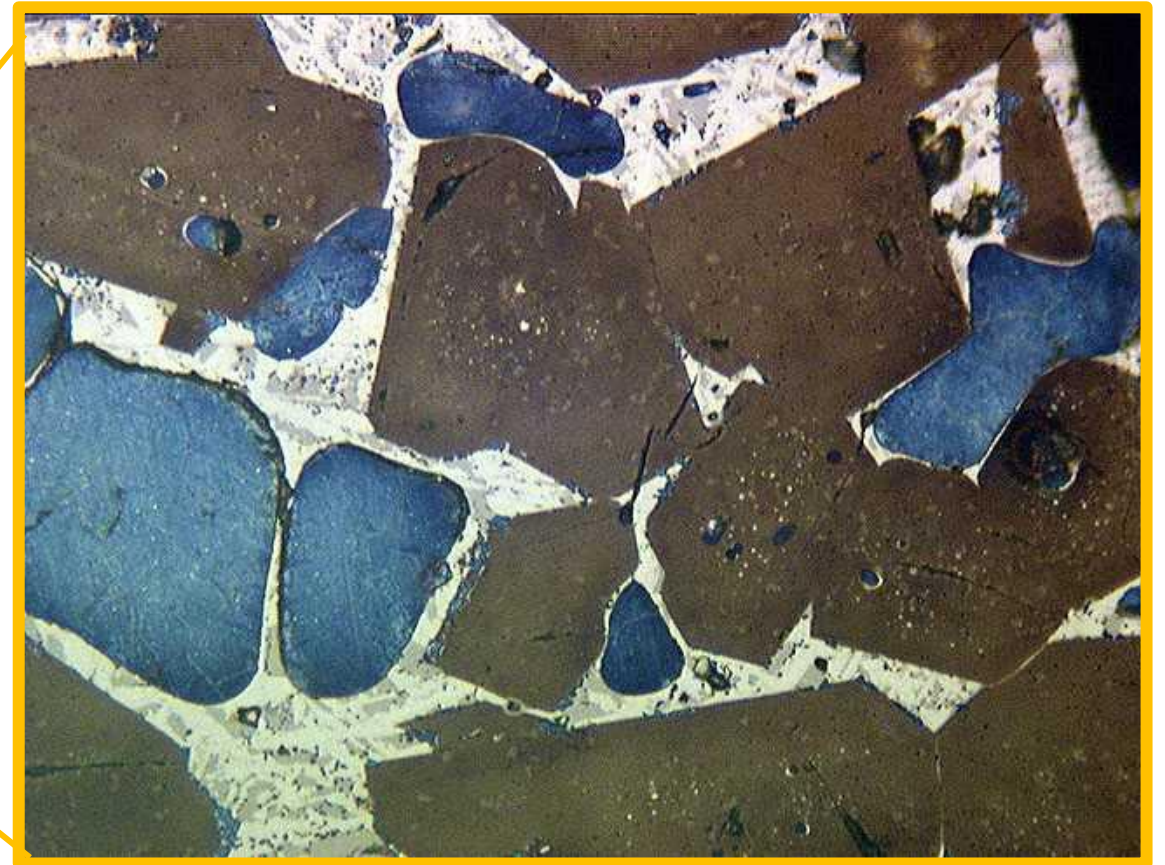
volume aparente (externo) ~constante.

Hidratação: aumento progressivo do volume de sólidos



A água quimicamente combinada (evapora >> 100°C) é responsável pela redução de porosidade e ganho de resistência

Grãos de clínquer (<math><50 \mu\text{m}</math>) tem múltiplas fases



Hidratação do clínquer – como ocorre?

Grão de cimento anidro

Alita
(C₃S)

Belita
(C₂S)

Aluminato de cálcio
(C₃A)

Ferro-aluminato de cálcio
(C₄AF)

Dissolução em água

pH > 12.4

Ca²⁺

H₂SiO₄²⁻

Al(OH)₄⁻

OH⁻

SO₄²⁻

CO₃²⁻

Precipitação (hidratados)

C-S-H

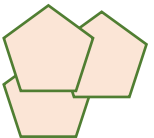
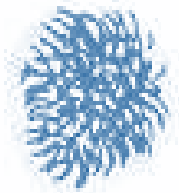
Silicato de cálcio hidratado

CH - portlandita

Hidróxido de cálcio

Trissulfo-aluminatos (etringita)

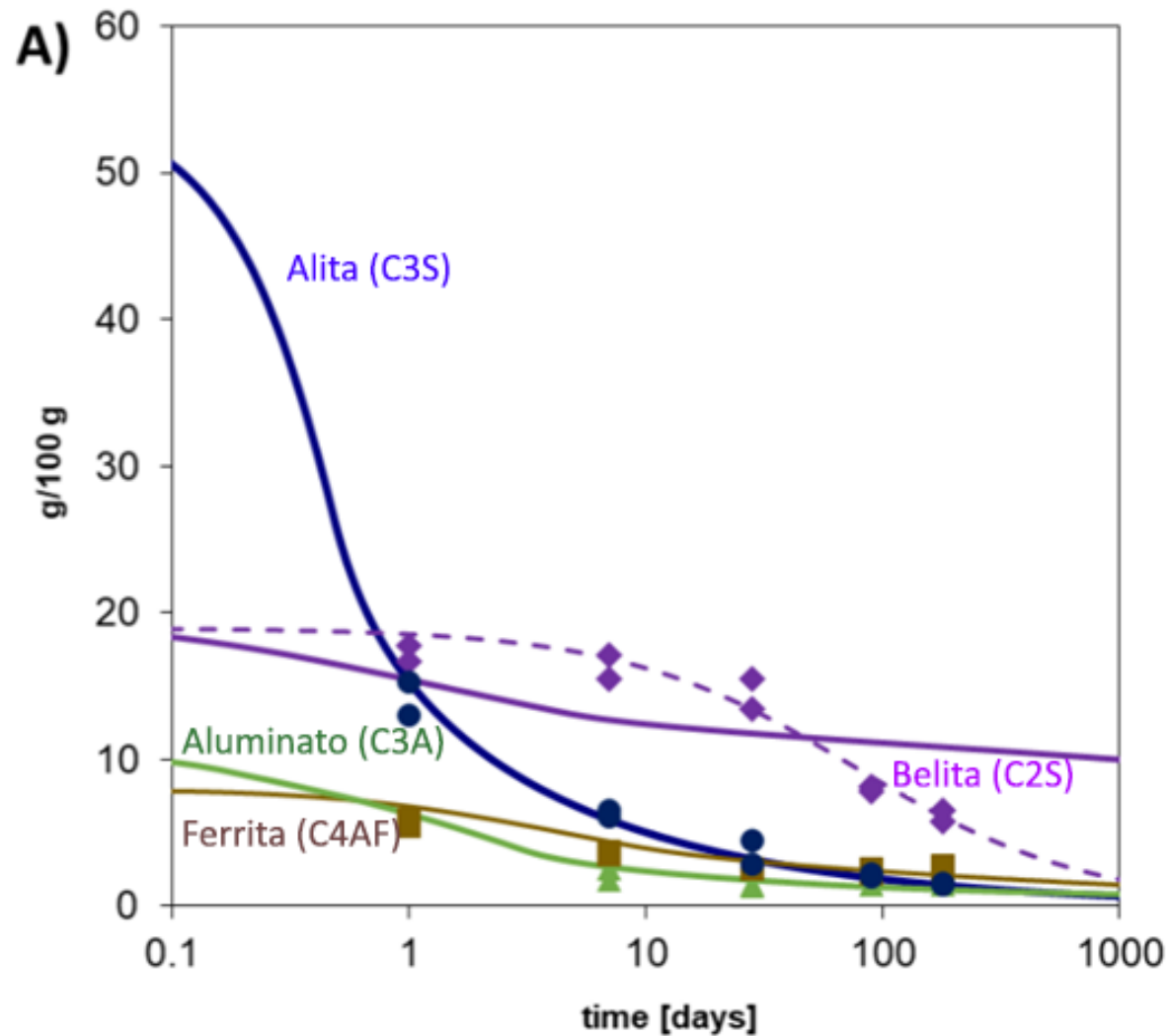
Monosulfo - aluminatos



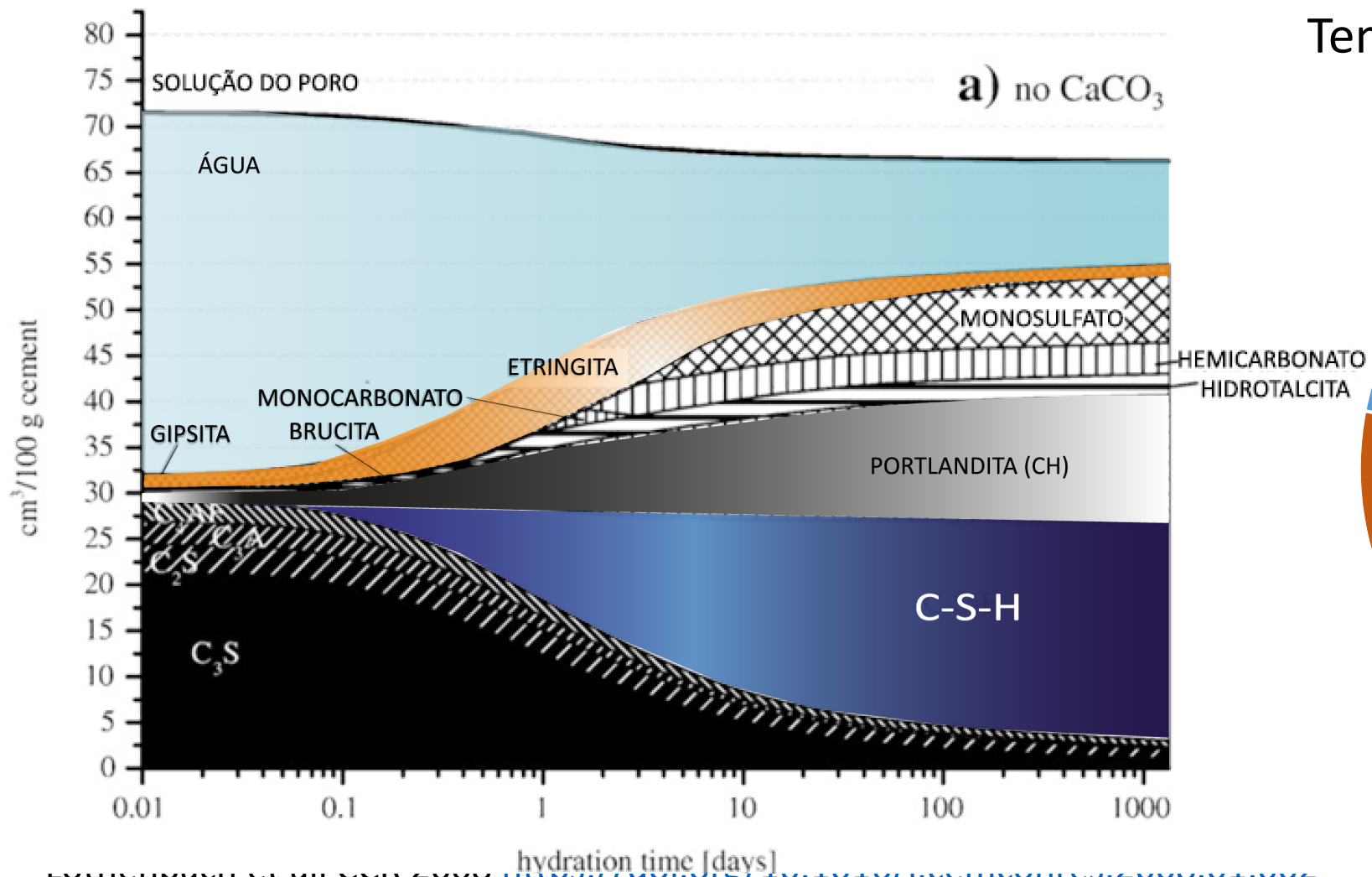
"AFm phases in hydrated cement is monosulfate and by far the most common AFt phase is ettringite."

C – CaO S – SiO₂ A – Al₂O₃ H – H₂O Š – So₃

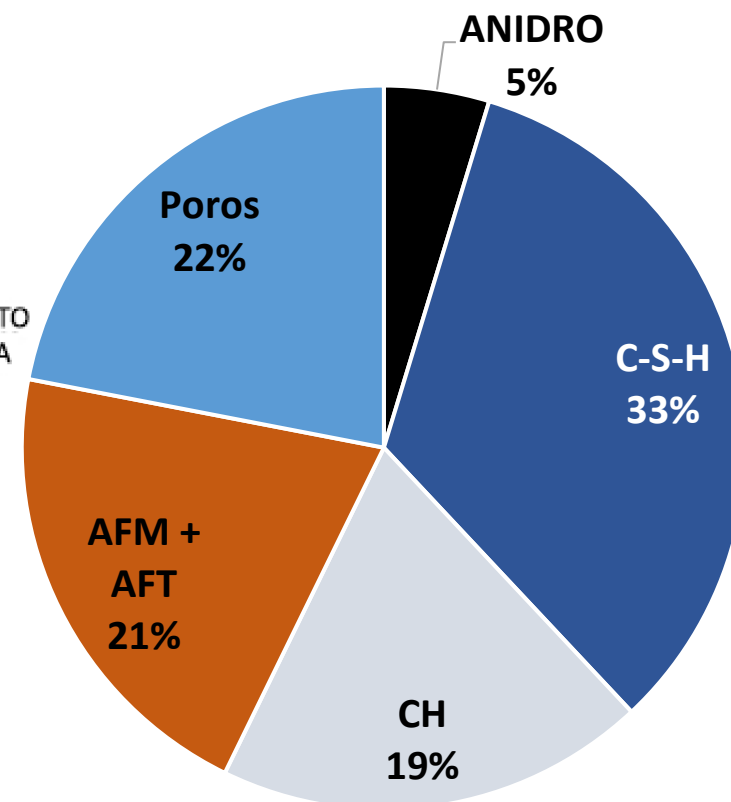
Hidratação: fases do clínquer são consumidas



Formação de hidratados (a partir do clínquer + sulfato)



Cimento 1,0 kg, Água 0.5 kg
Tempo de hidratação 1000 dias



Hidratação do cimento



$C_3S \sim 0,65 \text{ g/g}$ Rápida



$C_2S \sim 0,15 \text{ g/g}$ Lenta



$C_n-S_x-H_y$ - silicato de cálcio hidratado

- principal fase hidratada principal produto
- estequiometria variável de acordo com os reagentes e **espaço disponível**
- **Espaço inter-lamelar** acumula quantidade variável de água

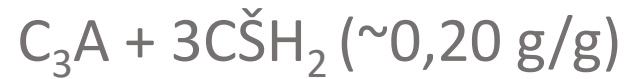
CH – hidróxido de cálcio

$C - CaO$ $S - SiO_2$ $A - Al_2O_3$

$H - H_2O$ $\checkmark - SO_3$

Calor
é
liberado

Hidratação do cimento (C₃A + Gipsita)



- C₃A (Sem gipsita): reação imediata
 - C₃A + xH → C₃AH₆, C₃AH₆ ou C₂AH₈



Calor
é
liberado

Reação pozolânica (Si Amorfo)

C_3S e C_2S hidratam precipitando CH (hidróxido de cálcio)

pH > 12,4 torna sílica amorfa da pozolana solúvel a temp ambiente



Pozolanas reduzem CH e aumentam C-S-H

Reação **lenta**, refinam porosidade



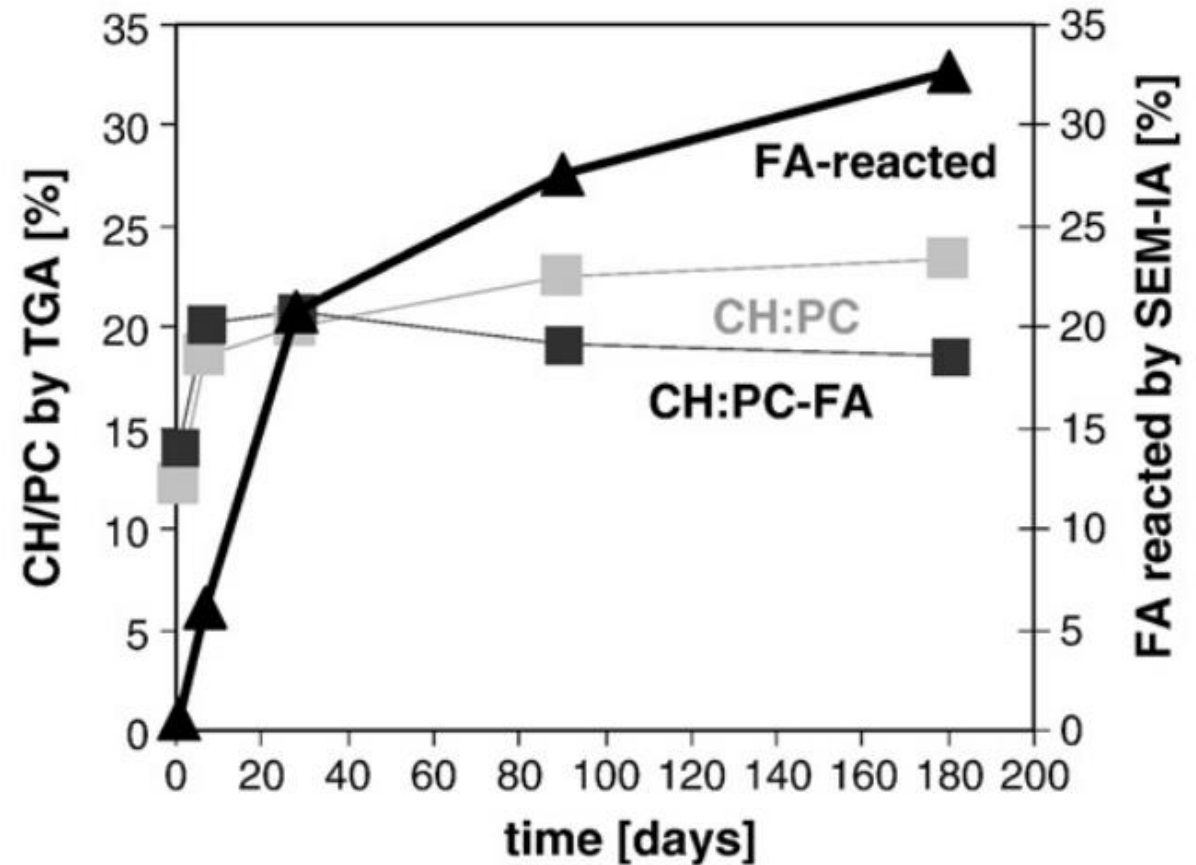
$C - CaO$ $S - SiO_2$ $A - Al_2O_3$ $H - H_2O$ $\checkmark - SO_3$

Efeito das Escórias e Pozolanas nos hidratados

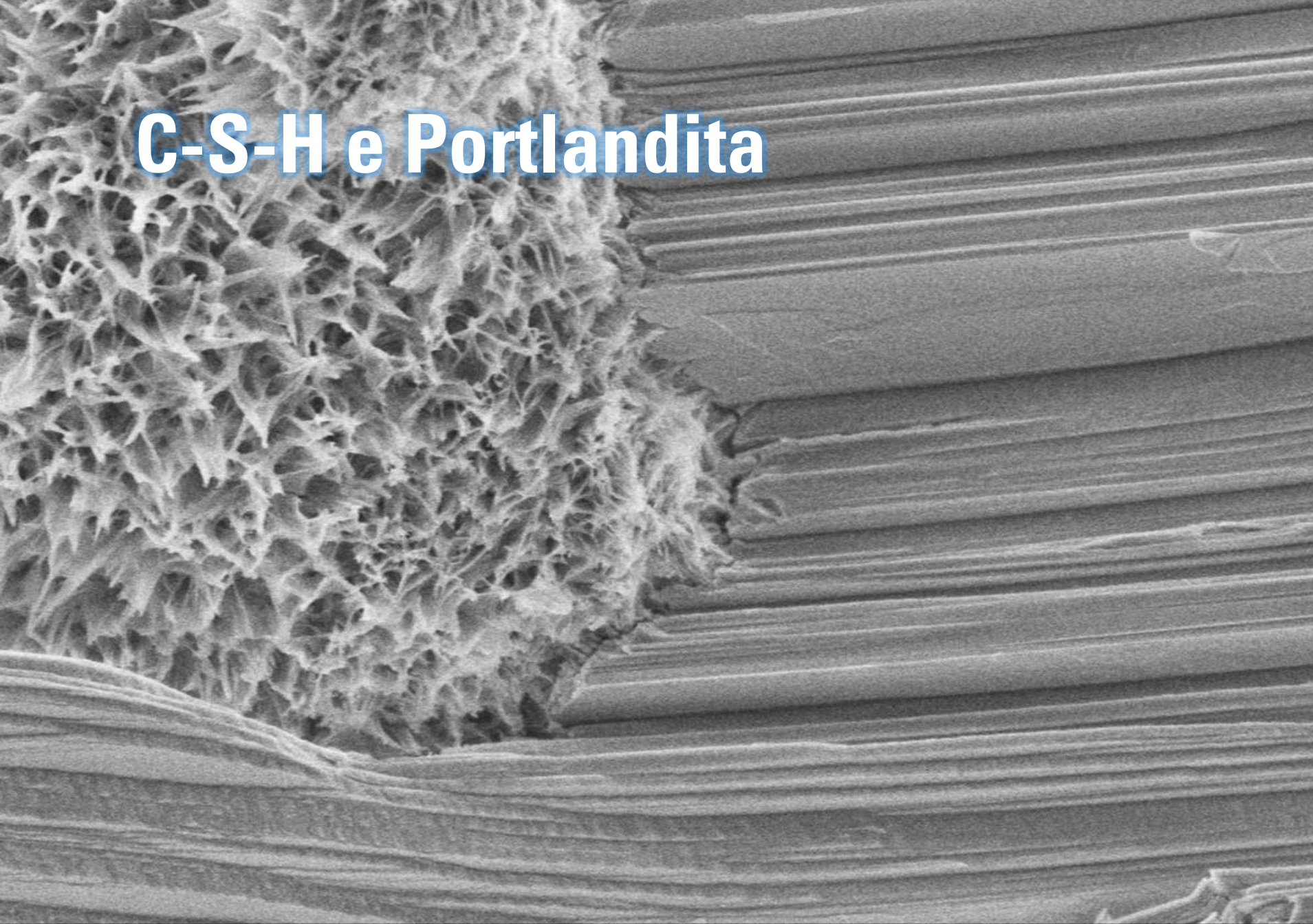
- Redução de CH e aumento do C-S-H
- Redução do razão C/S do C-S-H
- Alumínio nas adições
 - C-S-H transformado em C-(A-)S-H
 - Aumento teor de aluminatos como (hidrogranada)
 - C_3AH_6
 - C_3AH_{10}
- **Parte significativa das adições não hidrata, mesmo em longas idades**

Exemplo de reação de cinza volante

- Pouca reação até 28 dias
- 1/3 após 200 dias



C-S-H e Portlandita



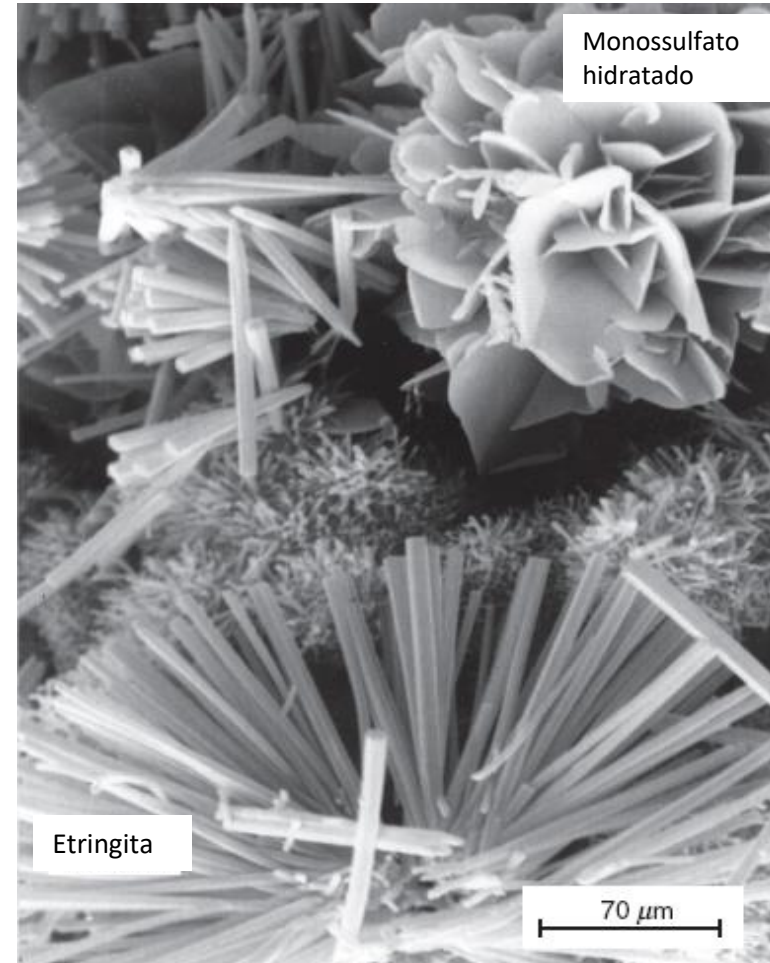
IRC 2.0kV 8.7mm x13.0k SE(M) 8/28/2008

4.00um

Cimento hidratado: Sólido multifásico

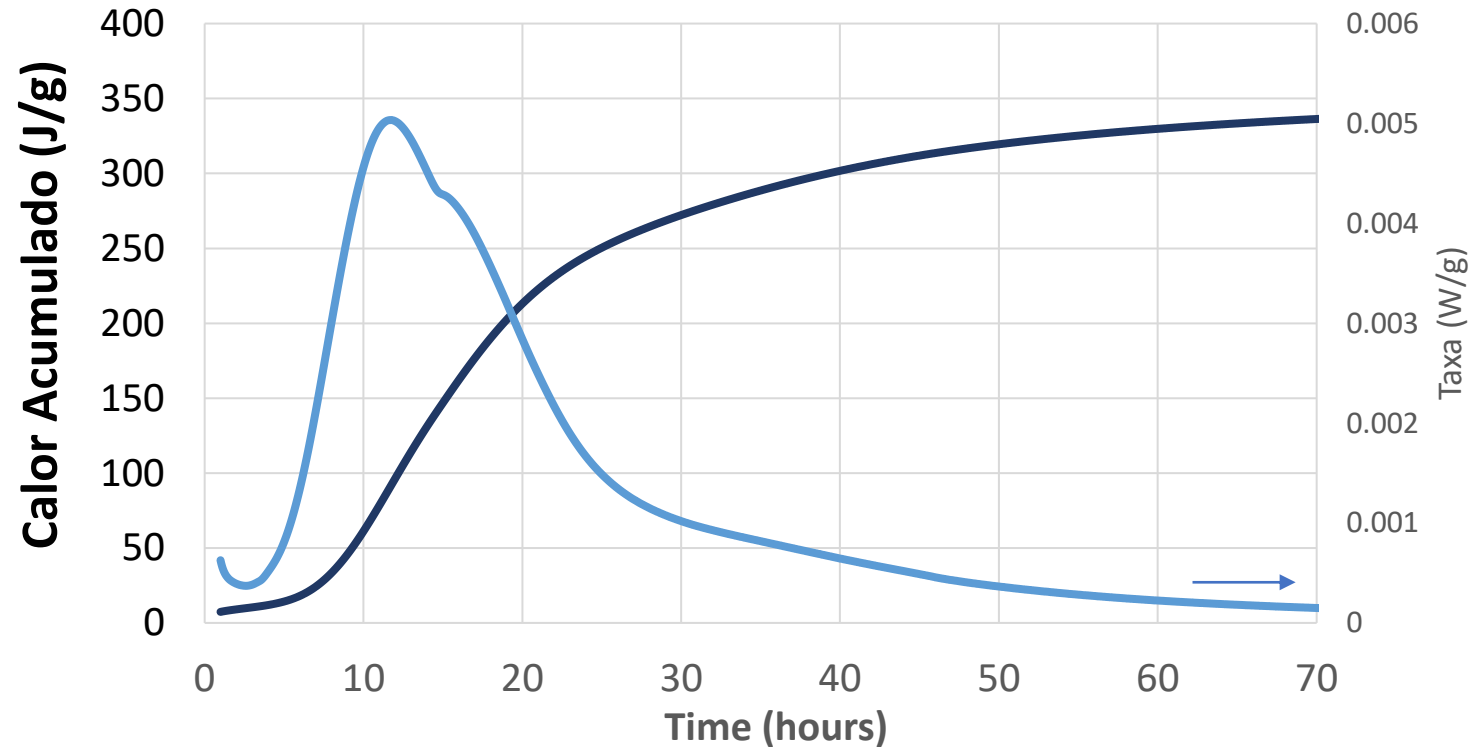
- Poros
- C-S-H
- CH
- Etringita
-

A microestrutura é complexa.



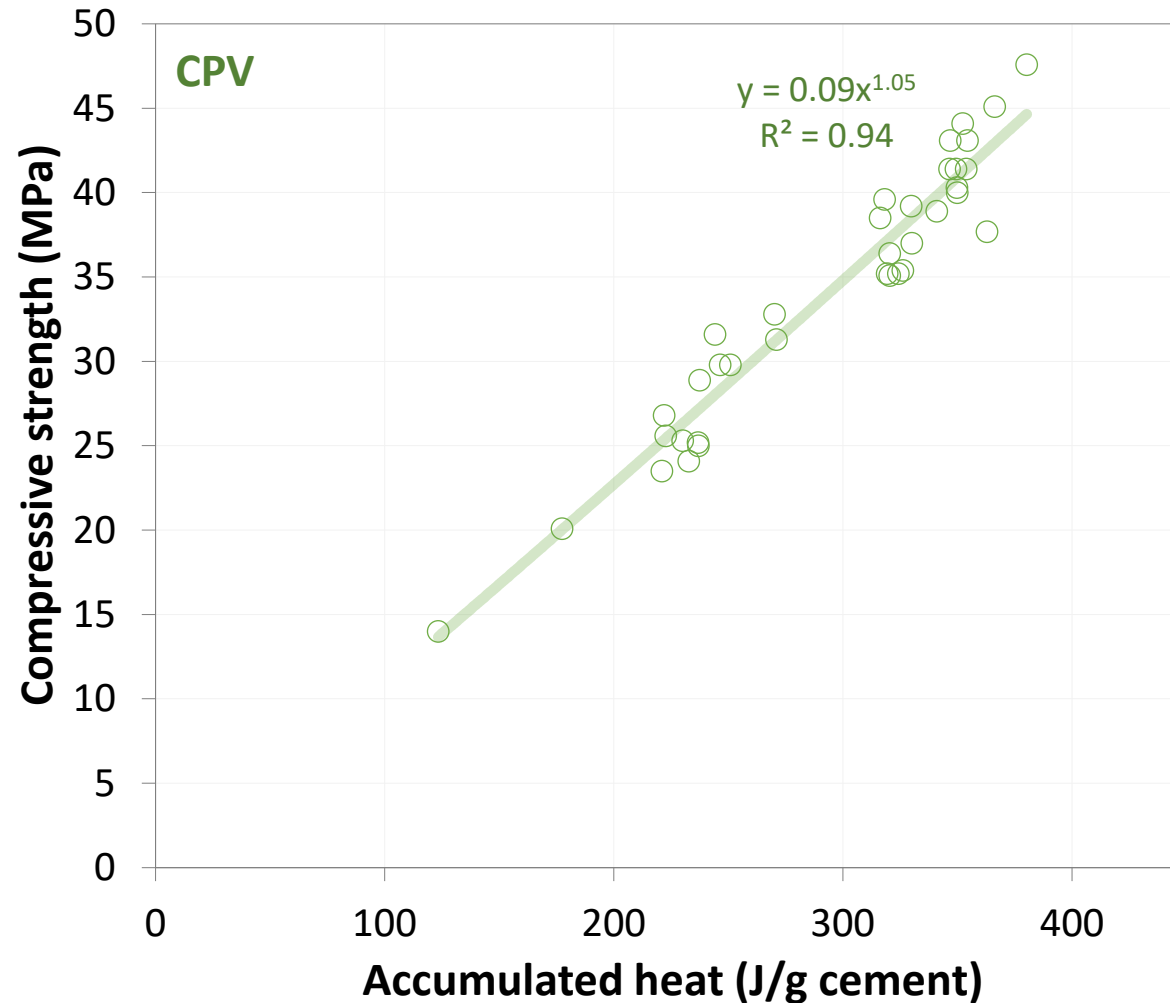
Hidratação do cimento é exotérmica

Calorimetria isotérmica (23°C)



Quantidade de liberado f (quantidade de reação química)

Calor liberado x Resistência à Compressão (argamassas 1:3:0,48)



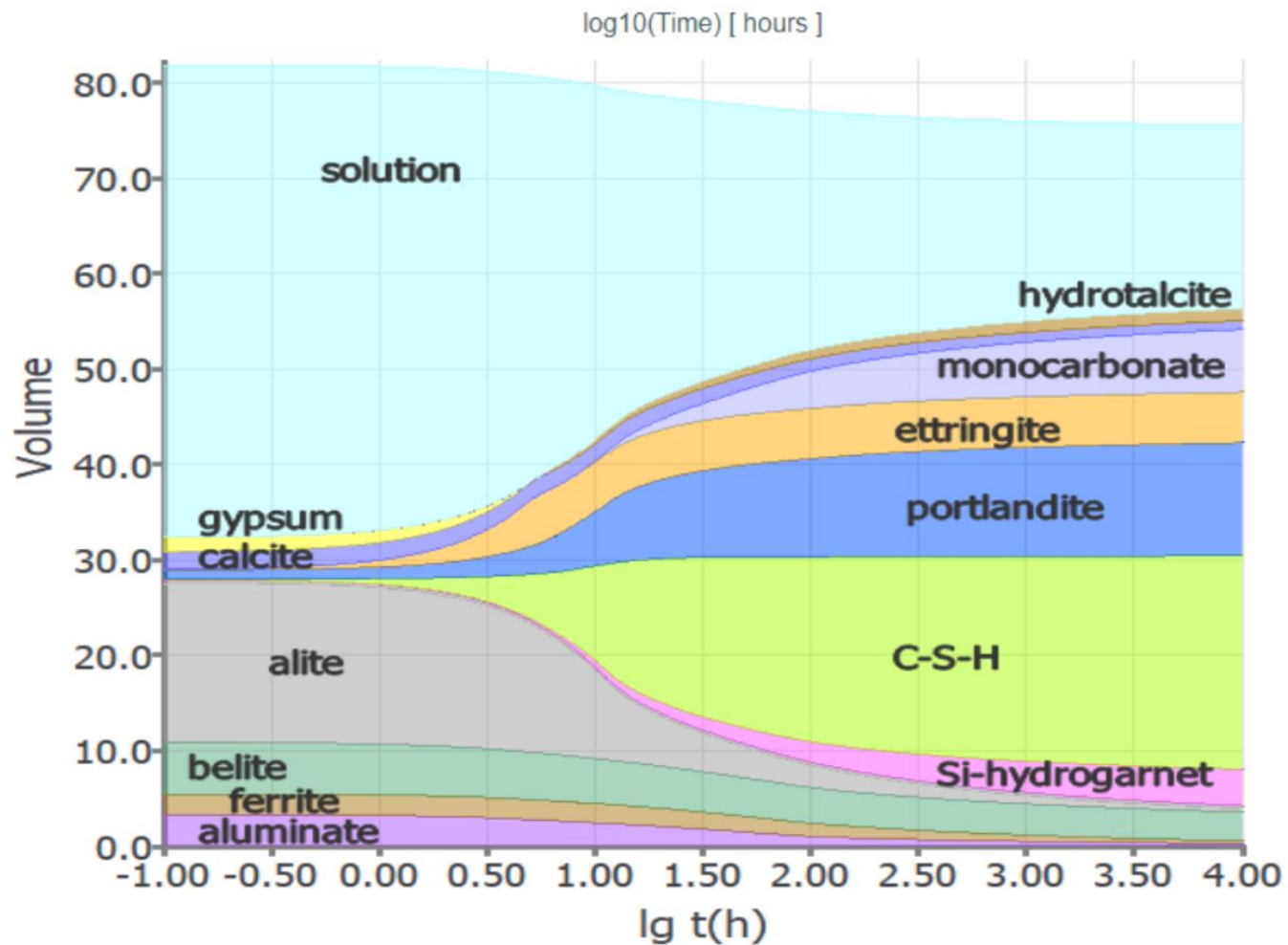
Exercício de revisão

<https://forms.gle/GFY4P3eSFsPgMtan6>



Microestrutura

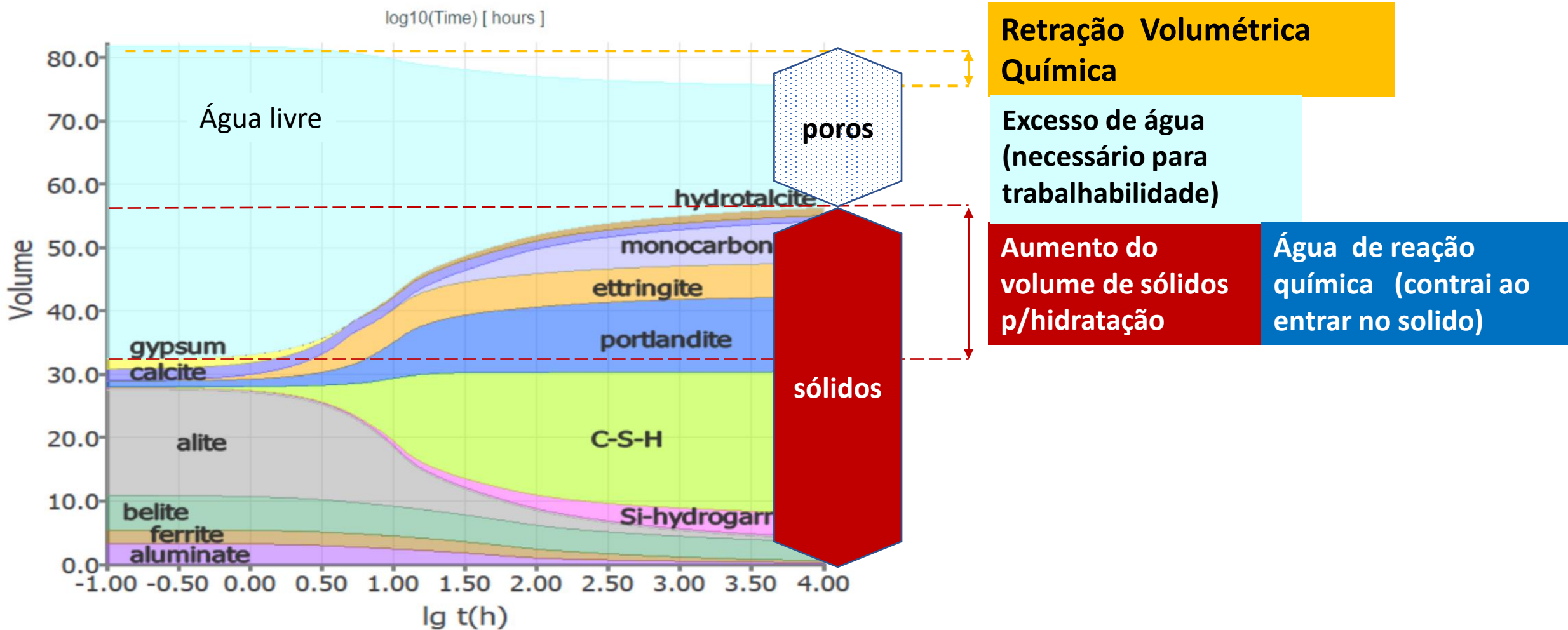
Fração volumétrica de fases ao longo do tempo



Volume inicial

Volume do produto

Fração volumétrica de fases ao longo do tempo

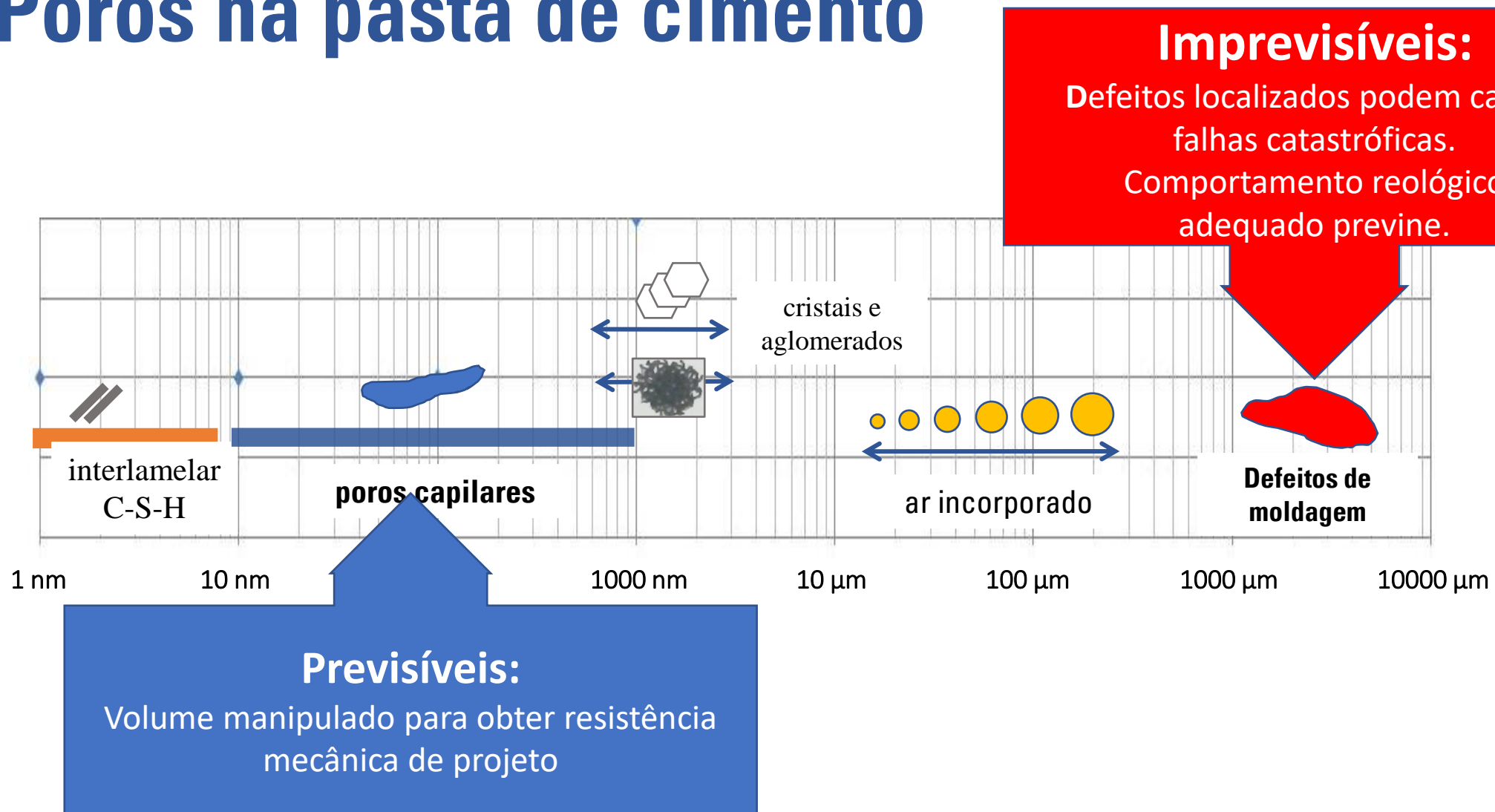


Scanning electron micrograph (SEM) showing a porous material structure. The structure consists of a network of interconnected fibers and spherical particles, creating a highly porous, interconnected network. The fibers are thin and elongated, while the particles are larger and more rounded. The overall appearance is that of a complex, three-dimensional porous scaffold.

Água não combinada define
a porosidade **previsível**

Tamanho controlado e conhecido
Distribuídos ao longo do volume.

Poros na pasta de cimento





Defeito de moldagem
(fração visível – podem existir defeitos internos)

**Comportamento reológico inadequado
para a energia de compactação empregada.**

Defeitos de moldagem

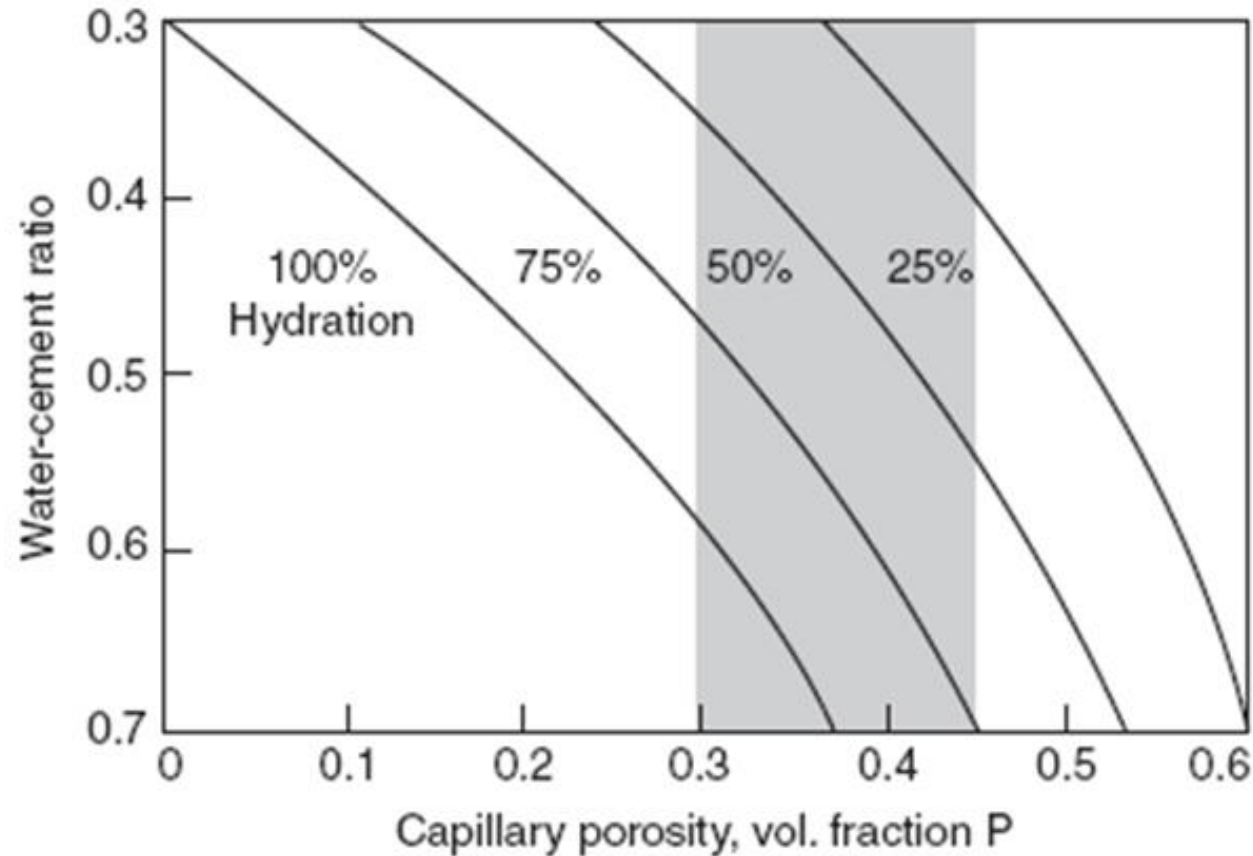
- Localização imprevisível
- Tamanho pouco previsível

Consequências destes defeitos?

Defeitos de concretagem no Canal do Panamá



Água para hidratar: 0,2-0,3 g/g de cimento Excesso gera porosidade.



Porosidade capilar influencia:

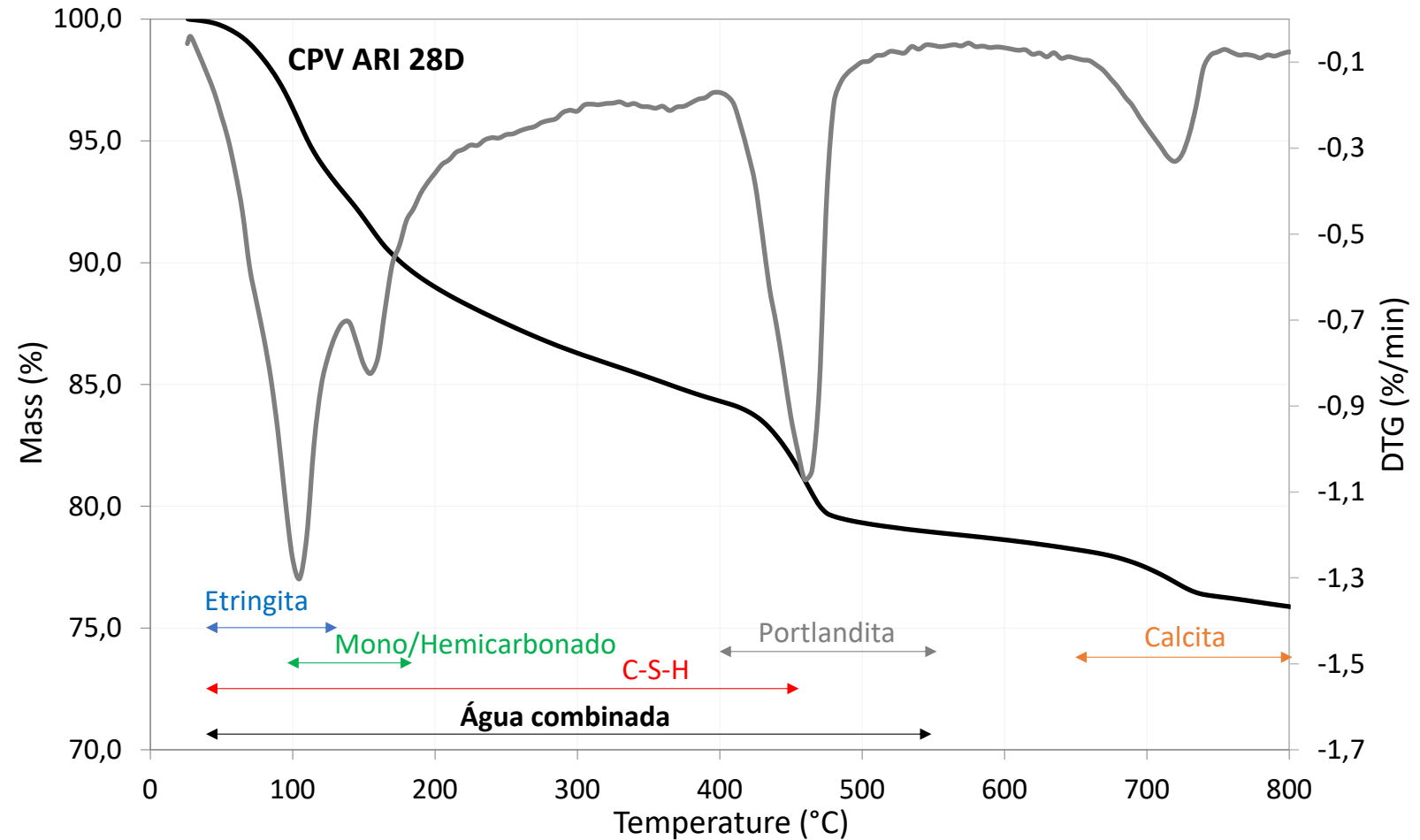
- Resistência mecânica
- Módulo de elasticidade
- Estabilidade dimensional
- Permeabilidade (e **durabilidade**)

Estimativa da água combinada

$$C_w = \frac{m_{50^\circ\text{C}} - m_{550^\circ\text{C}}}{m_{550^\circ\text{C}}}$$

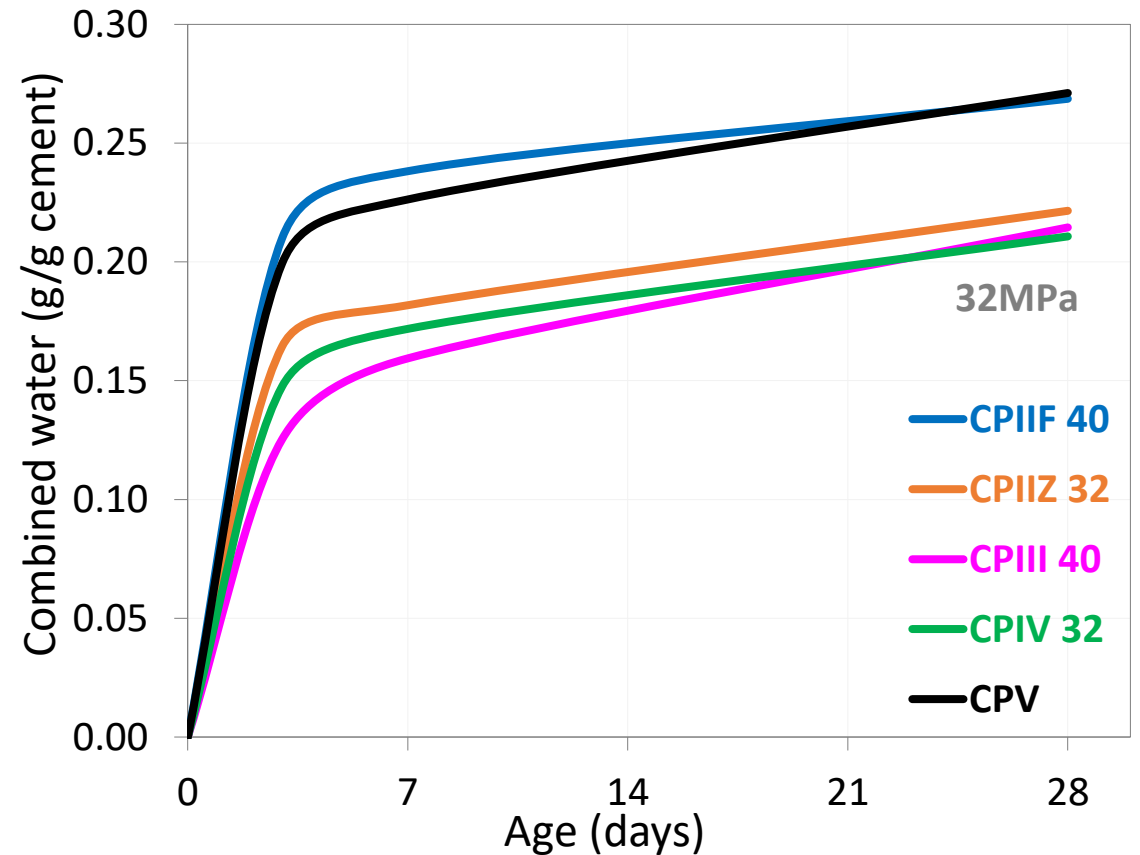
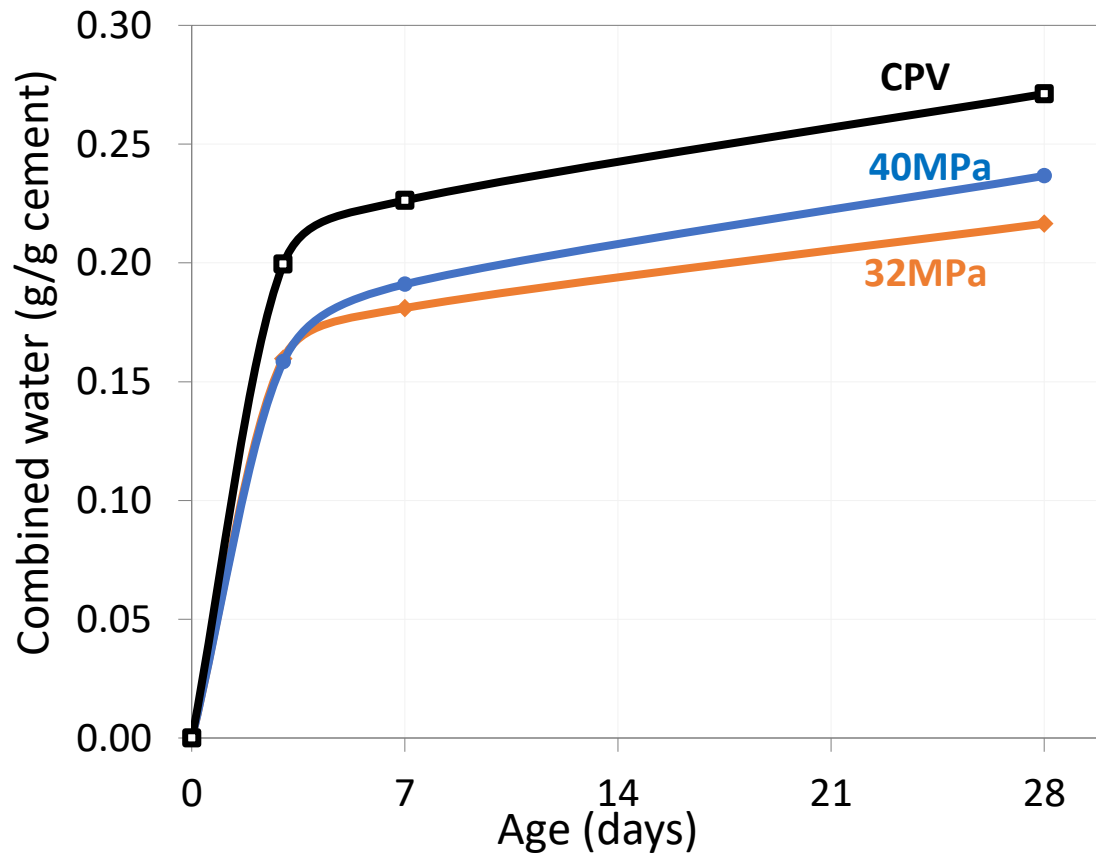
Onde,

- C_w é água combinada (g/g de cimento)
- $M_{x^\circ\text{C}}$ é a massa na temperatura indicada

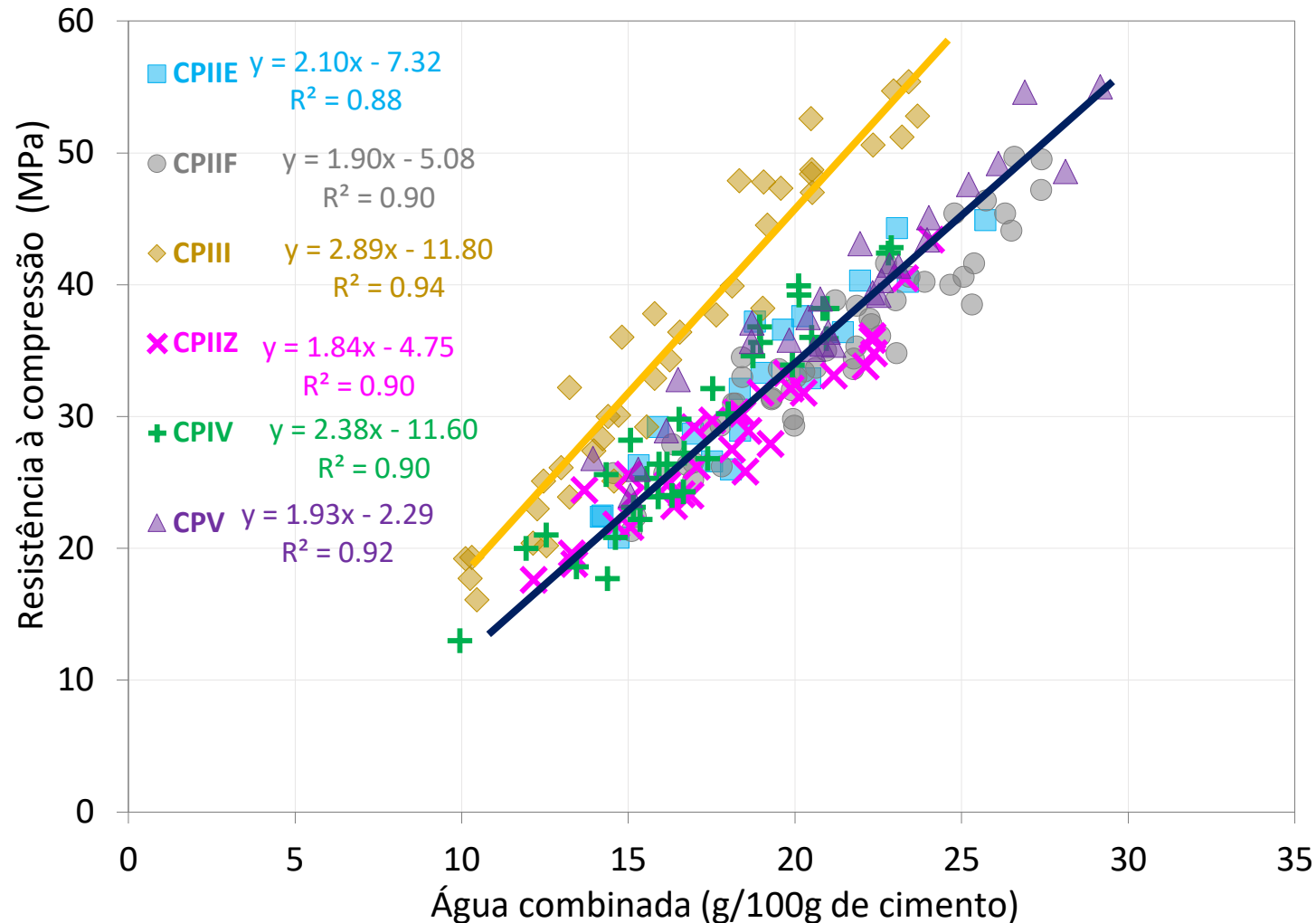


Água combinada

Diferente tipos e classes de cimentos



Modelagem da água combinada x Resistência à Compressão (argamassas 1:3:0,48)



Leitura obrigatória

- Mehta; Monteiro
 - Item 6.3 – Hidratação do Cimento Portland em.. P.216-23
 - Item 2.5 – Microestrutura da Pasta de Cimento Hidratada. P.26-41
 - Item 2.6 – Zona de transição no Concreto P.41-46

Estimando a porosidade do cimento hidratado

Porosidade previsível. A formulação do concreto varia a porosidade capilar para controlar a resistência e outras propriedades relevantes do concreto.

Porosidade

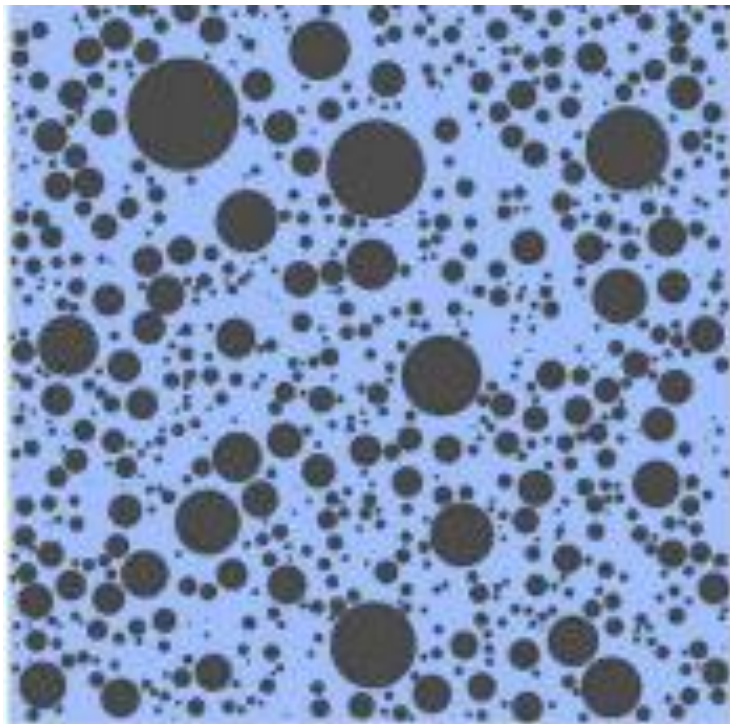
- Fração do volume total que é constituída de poros v/v (ex $0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, ...) ou $100*v/v$ (10%)

$$p = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{V_s + V_p}$$

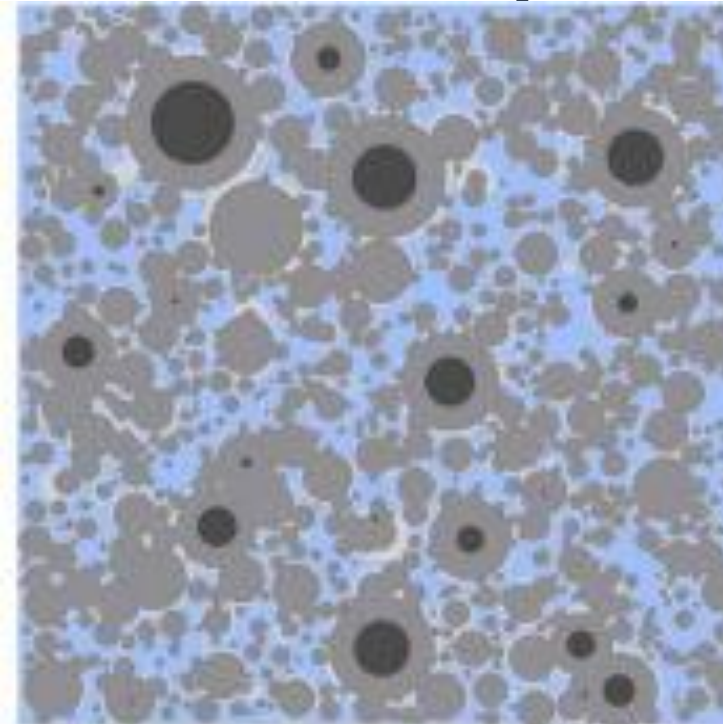
- V_p – volume de poros
- V_s = volume de sólidos
- V_t = volume total

Como estimar a porosidade da pasta (e controlar RC)?

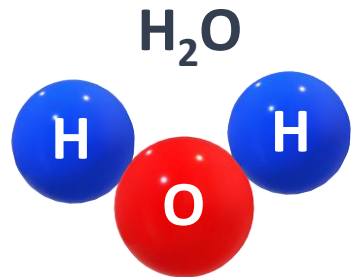
Após Mistura



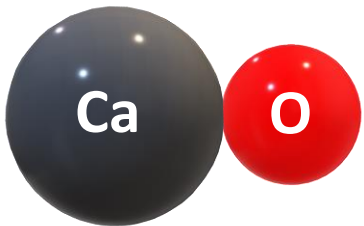
28 dias de hidratação



A água de reação
diminui ~25% de seu
volume após
hidratação



$$\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$$

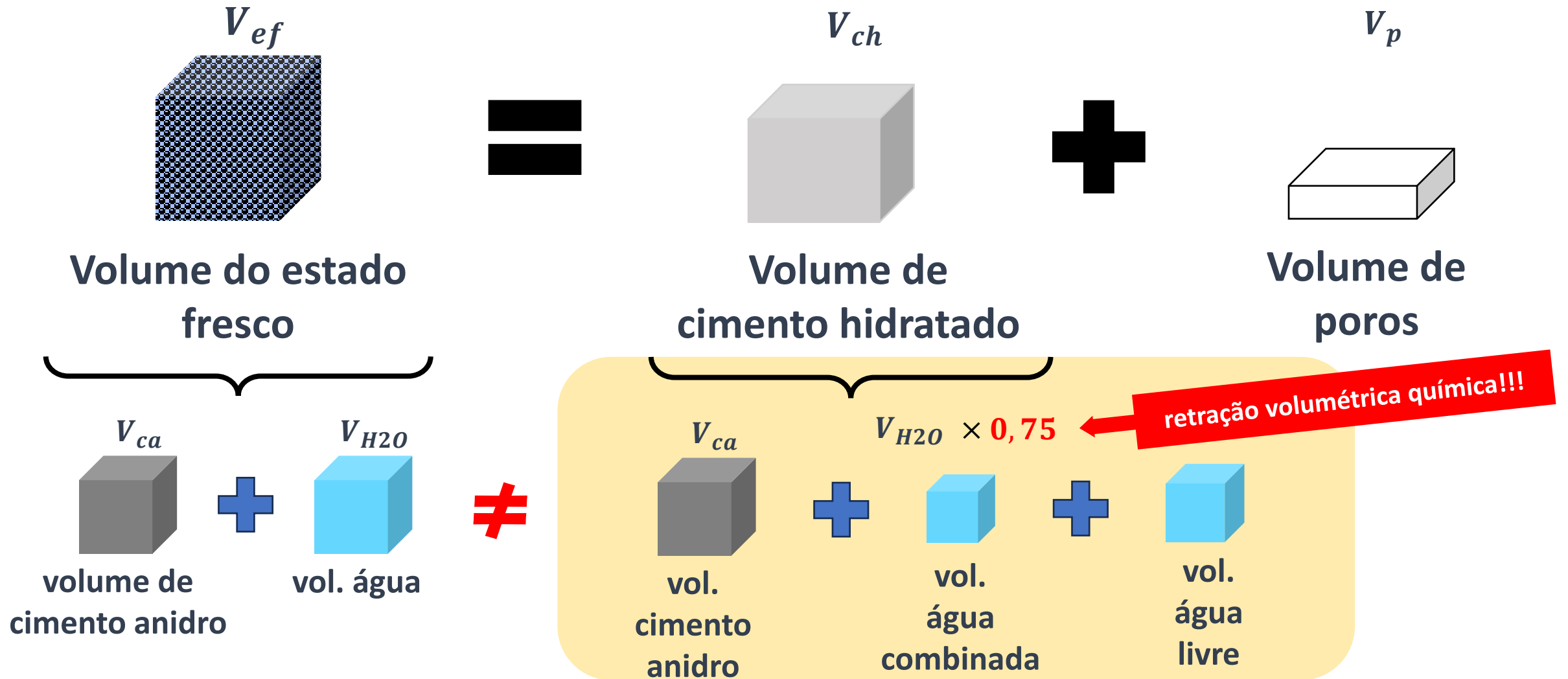


$$\rho = 3,34 \text{ g/cm}^3$$

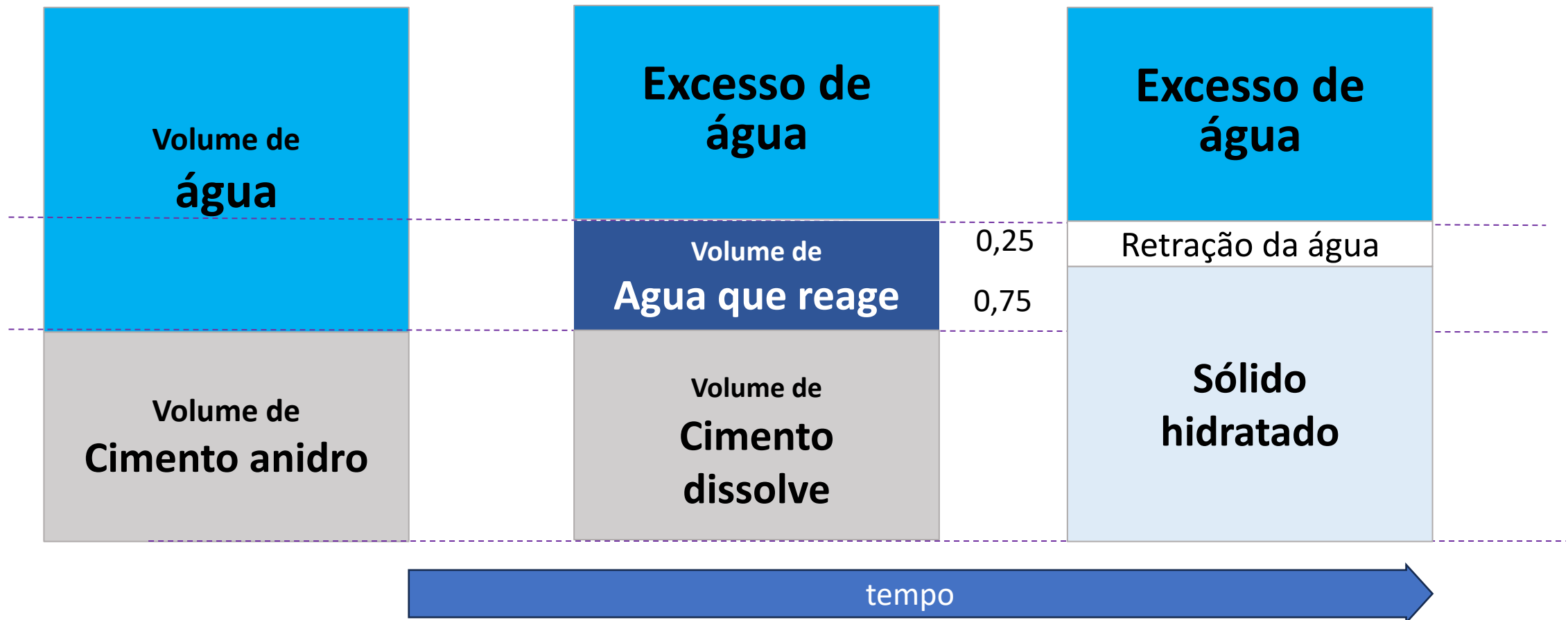
anidro; hidratado; água

$$\rho = 2,21 \text{ g/cm}^3$$

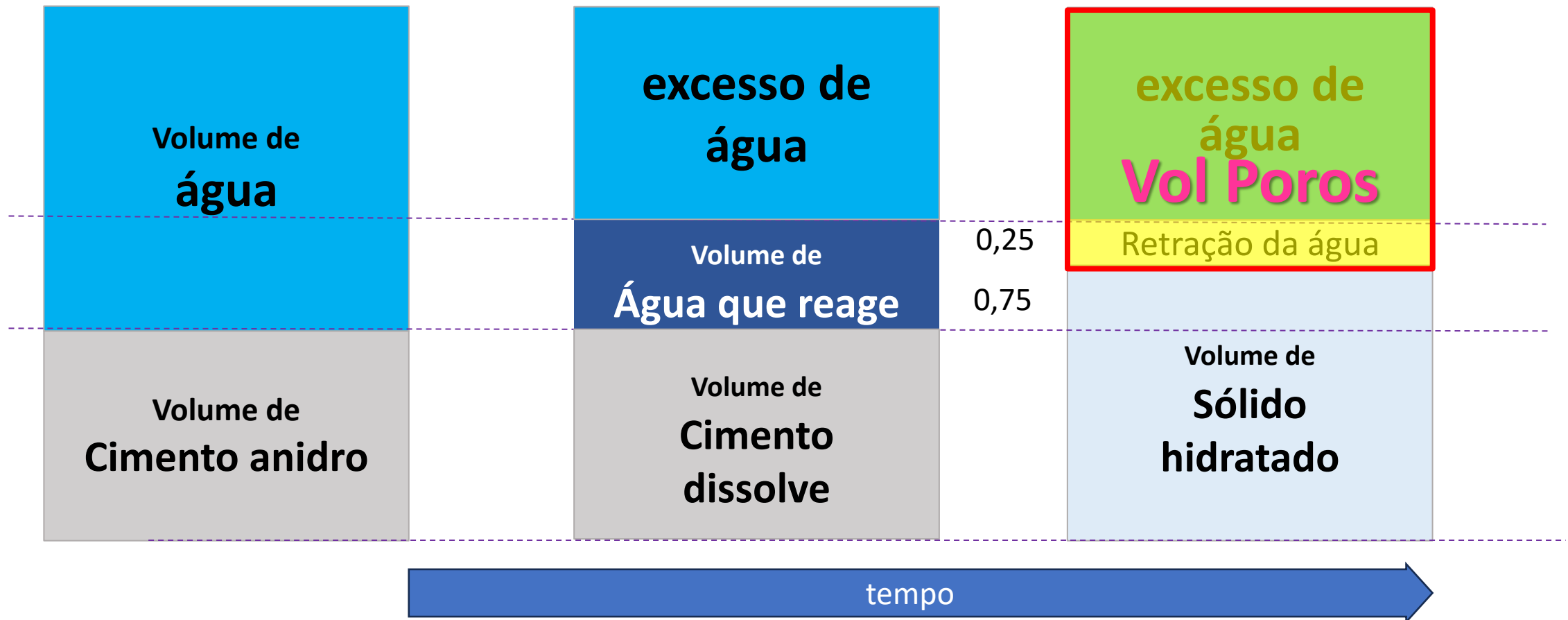
Como estimar a porosidade da pasta (e controlar RC)?



Transição de Vol suspensão → Vol solido



Transição de Vol suspensão → Vol solido



Estimando porosidade da pasta de cimento 1:0,5 (cimento:água)

- **Formulação da pasta :**
 - 1,00 kg de cimento
 - 0,50 kg de água
- **Água combinada com o cimento: 0,2g/g de cimento**
- **(~100% de hidratação do cimento para cimento CP 32)**
- **Densidade das fases:**
 - Cimento anidro $\approx 3,10 \frac{g}{cm^3}$
 - Água $\approx 1,00 \frac{g}{cm^3}$
 - Agregados naturais $\approx 2,60 \frac{g}{cm^3}$

Transformando massa em volume

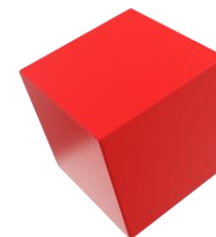
Massa

Densidades

Madeira: 0,7 t/m³

0,7t ocupam 1 m³

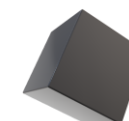
2t ocupam 2,8 m³



Cimento: 3 t/m³

3t ocupam 1 m³

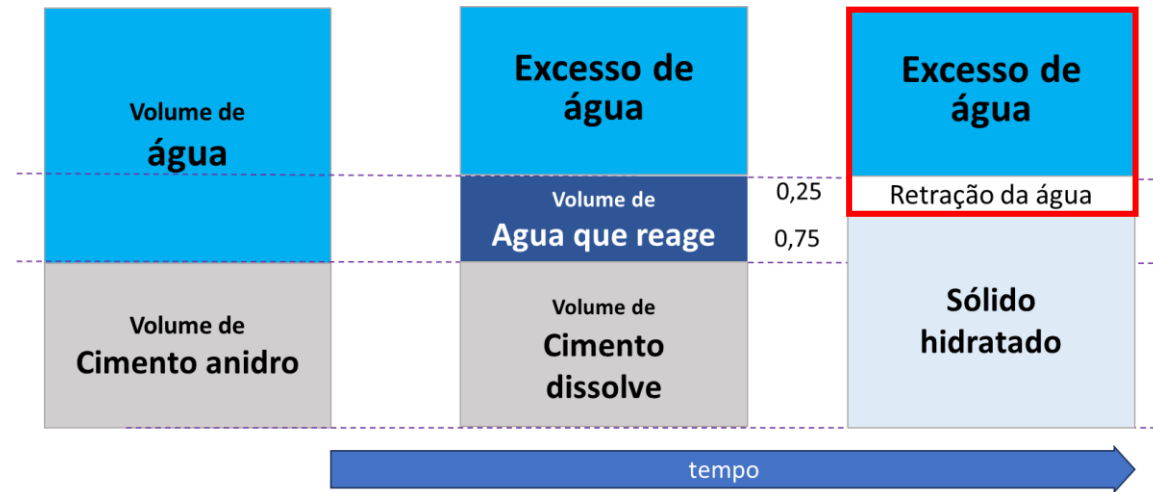
2t ocupam 0,66m³



$$V = \frac{M}{\rho} \left(\frac{g.cm^3}{g} \right)$$

Calculo dos volumes

- Volume total de água V_h
- Volume de cimento anidro V_{ca}
- Volume Total da Mistura (V_t)
- Volume da água combinada que reage V_{hc}
- Volume de contração da água combinada ($0,25 * V_{hc}$)
- Volume do solido hidratado (V_{sh})
- Volume total de poros (V_p)
- Porosidade total (p)



Estimando porosidade da pasta de cimento 1:0,5 (cimento:água) (0,2 g/g de água combinada)

SOLUÇÃO

1º Etapa – calcular o volume total do estado fresco

$$V_t = V_{cimenta} + V_{H_2O}$$

1kg cimento ---> X dm³ de cimento

Estimando porosidade da pasta de cimento 1:0,5 (cimento:água) (0,2 g/g de água combinada)

1º Etapa – calcular o volume do estado fresco

$$V_t = \left(\frac{1000 \text{ g}}{3,1 \text{ g/cm}^3} \right) + \left(\frac{500 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} \right)$$

$$V_t = 322,58 \text{ cm}^3 + 500 \text{ cm}^3 = 822,58 \text{ cm}^3$$

$$V_t = 0,82 \text{ dm}^3$$

$$\times \frac{1 \text{ dm}^3}{1000 \text{ cm}^3}$$

Desprezamos o ar aprisionado.

Como ele poderia ser considerado?

Estimando porosidade da pasta de cimento 1:0,5 (cimento:água) (0,2 g/g de água combinada)

2º Etapa – calcular o volume de pasta hidratada

$$V_h = V_{ca} + V_{hc} - 0,25V_{hc} \quad \text{Contração da água que vira sólido}$$

$$V_{ca} = \text{Vol cimento anidro} - \quad V_{hc} = \text{Vol água combinada}$$

$$V_{sh} = \left(\frac{m_{ca}}{\rho_{ca}} \right) + 0,75 \left(\frac{m_{H2O}}{\rho_{H2O}} \right)$$

$$V_{sh} = \left(\frac{1000 \text{ g}}{3,1 \text{ g/cm}^3} \right) + 0,75 \left(\frac{200 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} \right)$$

Estimando porosidade da pasta de cimento 1:0,5 (cimento:água) (0,2 g/g de água combinada)

2º Etapa – calcular o volume de pasta hidratada

$$V_{sh} = \left(\frac{1000 \text{ g}}{3,1 \text{ g/cm}^3} \right) + \left(\frac{200 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} \right) \times 0,75$$

$$V_{sh} = 322,58 \text{ cm}^3 + 150 \text{ cm}^3 = 472,58 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ dm}^3}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$V_{sh} = 0,47 \text{ dm}^3$$

Estimando porosidade da pasta de cimento 1:0,5 (cimento:água) ($h_c=0,2$ g/g de água combinada)

SOLUÇÃO

3º Etapa – calcular o volume de poros

$$V_p = V_t - V_h = 0,82 \text{ dm}^3 - 0,47 \text{ dm}^3 = 0,35 \text{ dm}^3$$

4º Etapa – calcular a porosidade

$$P = \frac{V_p}{V_t} = \frac{0,35 \text{ dm}^3}{0,82 \text{ dm}^3} = 0,43 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$$

Na prática porosidade é maior que a estimada: defeitos de moldagem + ar incorporado

Poros capilares x gel

- Poros capilares – **maiores dimensões**, entre cristais
 - Definem a resistência mecânica
 - Transporte de agentes agressivos
 - Fração volumétrica pode ser controlada
- Poros do Gel - dimensões muito pequenas
 - **Não influenciam a resistência significativamente**
 - Fazem parte da microestrutura
 - Água adsorvida no C-S-H
 - Dificilmente secam em temperaturas ambiente

Estimando poros do gel

- Poros do gel são uma **fração do volume do sólido hidratado**.
- Dependem da quantidade de cimento e sua reatividade (água combinada)

$$V_{pg} = \sim 0,389 \times V_{sh}$$

$$V_{pg} = 0,389 \times 0,47 \text{ dm}^3 = 0,18 \text{ dm}^3$$

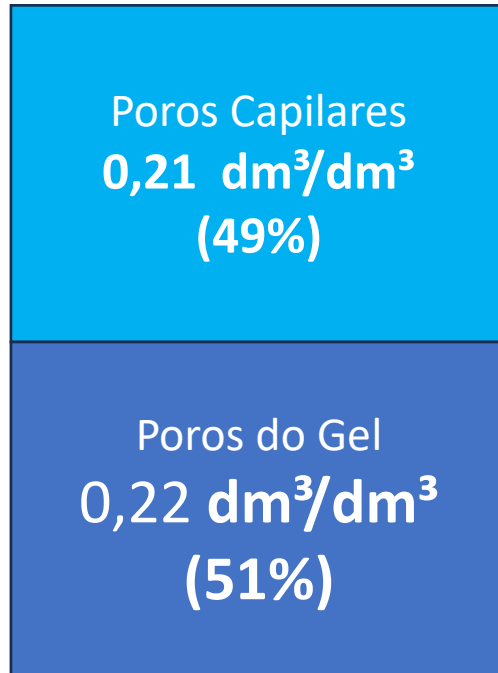
$$P_{pg} = \frac{V_{\text{Poros de gel}}}{V_t} = \frac{0,18}{0,82} = 0,22 \text{ dm}^3 / \text{dm}^3$$

Poros capilares x gel

$$V_{pc} = V_{ph} - V_{pg} = 0,35 \text{ dm}^3 - 0,18 \text{ dm}^3 = 0,17 \text{ dm}^3$$

$$P_{cap} = \frac{V_{pc}}{V_t} = \frac{0,17}{0,82} = 0,21 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$$

Porosidade da pasta 1:0,5 ($hc=0,2/g/g$)



- Aumento da proporção água/cimento na formulação

- não afeta significativamente o volume de poros do gel

$$V_{pg} = 0,389 \times V_{sh}$$

$$V_{sh} = V_{ca} + V_{hc} - 0,25V_{hc}$$

- Aumenta a **porosidade capilar** reduzindo resistência e facilitando penetração de agentes agressivos.

Exercício individual

A hidratação de um cimento consome 0,20g/g de água. Qual a porosidade (v/v) mínima da pasta 1:0,4 quando 50% do cimento hidratou?

Por que o adjetivo “mínima”?

Tempo: 10 minutos

<https://forms.gle/PjpormwwEQDqR32V6>



Volume no estado fresco

- | | | |
|--------------------------|-------|---------------------|
| • 1 kg de cimento | 1/3,1 | 0,32dm ³ |
| • 0,4 kg de água | 0,4/1 | 0,40dm ³ |
| • Volume total (mistura) | | 0,72dm ³ |
- Desprezamos o ar aprisionado inserido no concreto durante o processo de mistura.
 - Como ele poderia ser considerado?

Volume de sólidos 1:0,4 (50% hidratado)

- | | | |
|--|-------------------|--|
| • 0,5 kg de cimento | 0,5/3,1 | 0,160dm ³ |
| • (50%) 0,20 kg de água de reação | 0,1/1 | 0,100dm ³ |
| • Retração química
25% volume de água reação | 0,25*0,1 | -0,025dm ³ |
| • Volume de sólidos hidratados | 0 | 0,235dm ³ |
| • Volume de sólidos anidros | 0,5/3,1 | 0,160dm ³ |
| • Volume de sólidos totais | | 0,395dm³ |
| • Poros = 0,72 - 0,395 = 0,325 dm ³ | | |
| • Porosidade | 0,325/0,72 | 0,45dm³/dm³ |

Volume de poros 1:0,4 (50% hidratação)

• H ₂ O em excesso	0,4-0,1	0,30dm ³
• Retração química	0,025	0,025dm ³
• Poros totais		0,325dm ³
• Volume total		0,72 dm ³
• Porosidade	0,325/0,72	0,45dm ³ /dm ³

Exercício em grupo até 4 pessoas (para entregar no moodle até dia 08/09)

- Estime a porosidade **mínima** (m^3/m^3) de **um concreto** confeccionado com $360 \text{ kg}/\text{m}^3$ e relação água/cimento de $0,5 \text{ g}/\text{g}$. **A hidratação completa de 1g deste cimento exige 0,24g de água.** Despreze a porosidade dos agregados.
- O cimento hidratado foi exposto a estufa ventilada a temperatura de 105°C até constância de massa. Nesta condição acredita-se que toda a água não combinada evaporou e não houve perda de água combinada. Estimem quanta água ($\text{g}/100\text{g}$ de material seco) seriam absorvidas se este cimento hidratado for imerso em água até saturação.

Exercício em grupo (continuação)

- Pastas de mesma porosidade apresentarão a mesma resistência?
Explique.
- Você acha que há outros fatores, além da porosidade da pasta, que pode afetar o comportamento do mecânico do concreto?
Explique.
- Como você imagina que a porosidade da pasta afeta a durabilidade do concreto?

Atividade Extra

(upload arquivo com memória de cálculo no Moodle opcional)

- Faça gráficos mostrando a influência do grau de hidratação (0 a 100%) na porosidade total e da pasta dos concretos.

	Densidade (g/cm ³)	Traço 1 (% Massa)	Traço 2 (% Massa)
Cimento	3,1	15	10
Areia	2,6	25	31
Brita	2,6	52	52
Água	1	8	7

- Compare e discuta os resultados.