

***Estrutura Interna, Dosagem
& Controle do Concreto***



Escola Politécnica

Estrutura Interna do Concreto

Paulo Helene

*Prof. Titular da Universidade de São Paulo
Diretor da PhD Engenharia Civil & Consultoria
Vice-Presidente do Instituto Brasileiro do Concreto*

1



Bibliografia de referência

- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M.
Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.
IBRACON, São Paulo, 2008.

- ISAIA, G. C. (Editor). **Concreto – Ensino,
Pesquisa e Realizações.** IBRACON, São
Paulo, 2005. p. 583-604
 - **Capítulo 19** (*Vladimir Antonio Paulon*)

2



Importância

Conhecimento da microestrutura do concreto:

- *auxiliar* na previsão e otimização das propriedades físicas e mecânicas;
- prevenir manifestações patológicas nas estruturas;
- “contribuir” para a economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas.

03/12/2024

PCC 2341 Tecnologia do Concreto

3

3



Concreto endurecido

Resistência

Compacidade

**Estrutura
interna**

Durabilidade

Deformações

**Fatores
externos e
agentes
agressivos**

4

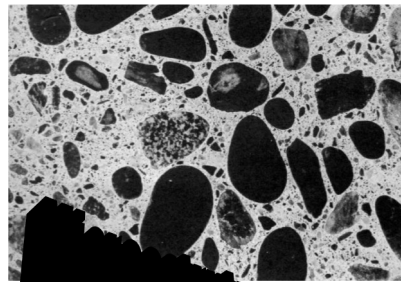
4



Concreto endurecido → fases



Quais são?



- Tipo;
- Quantidade;
- Tamanho;
- Forma;
- Distribuição.

5



Concreto endurecido

- Composição:
 - agregados miúdos e graúdos (*fase descontínua*)
 - pasta ou *matriz contínua e porosa*
 - zona de transição entre pasta/agregado
- Pasta não é homogênea nem imutável:
 - idade da pasta ou grau de hidratação
 - quantidade de água ou relação água/cimento
 - proximidade com uma superfície

6



Microestrutura - concreto



Direitos Reservados USP 2009

7

7



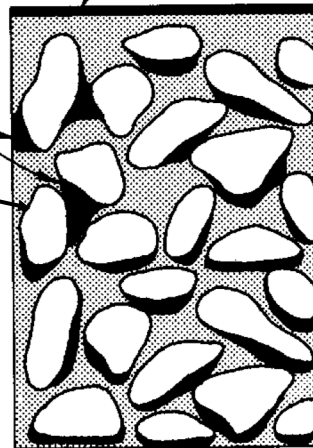
Macroestrutura - concreto

■ Heterogeneidades:



Exsudação interna da água

Exsudação visível da água



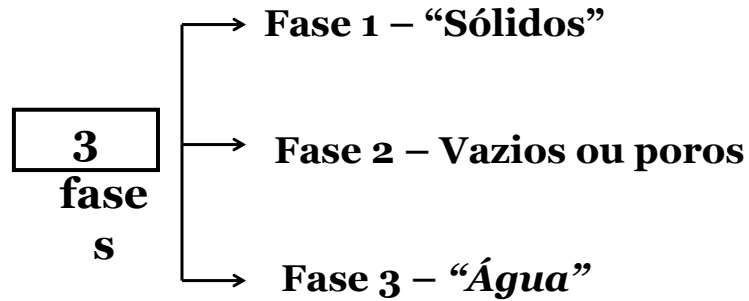
Direitos Reservados USP 2009

8

8



Fases constituintes da Pasta



9



Fases constituintes da Pasta

- 1. “SÓLIDOS”**
- produtos da hidratação;
 - C-S-H (cristal);
 - Hidróxido de cálcio;
 - Sulfoaluminatos;
 - Grãos anidros;
- 2. VAZIOS ou POROS**
- vazios de gel
 - vazios capilares;
 - vazios de ar apr./inc.

3. ÁGUA

- *capilar ou livre*
- *interlamelar ou adsorvida*
- *quimicamente combinada*

10



Fases constituintes da Pasta

■ Fase 1 - SÓLIDOS

■ 3 principais produtos da hidratação do cimento Portland + outros menores;

• C-S-H
(cristal);

• Hidróxido de cálcio;

Sulfoaluminatos.



Direitos Reservados USP 2009

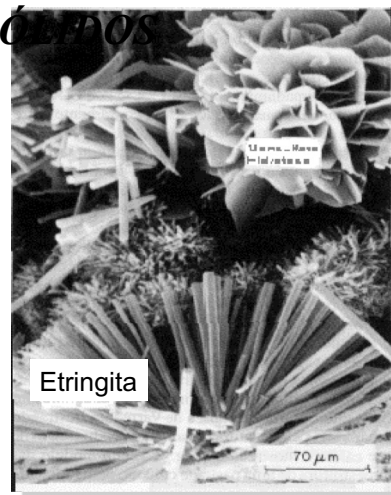
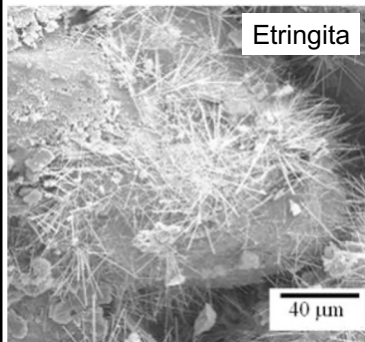
11

11



Fases constituintes da Pasta

• Fase 1 - SÓLIDOS



Direitos Reservados USP 2009

12

12



Fases constituintes da Pasta

- ***Fase 2 -VAZIOS ou POROS***
 - vazios de gel (espaço interlamelar no C-S-H)
 - vazios/poros capilares;
 - vazios/poros de ar aprisionado e de ar incorporado

13



Poros da Pasta

- ***Espaço interlamelar no C-S-H*** ***0,5 a 2,5 nm***
- ***Vazios capilares*** ***0,01 a 1 μm***
- ***Ar incorporado*** ***0,05 a 1 mm***
- ***Ar aprisionado*** ***0,5 a 5 mm***

1 nm → 10⁻⁹ m

14



Poros da pasta e efeitos

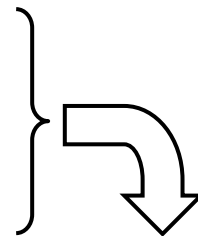
- **Vazios de gel e capilares**
 - **natureza** → 1 cm³ cimento anidro ~ 2 cm³ cimento hidratado
 - **relação a/c** → distância entre partículas do cimento
 - **grau de hidratação** → idade (gel); 10 a 50nm para 90% hidratado e a/c baixa, até 3000 a 5000nm (pastas jovens, a/c elevadas)
 - > 50 nm = macroporos → **resistência;**
 - < 50 nm = microporos → **retração e fluência.**

15



Fases constituintes da Pasta

- **Fase 3 - ÁGUA**
 - quimicamente combinada
 - adsorvida e interlamelar
 - capilar ou livre



poros

16



Água na pasta hidratada e seus efeitos

- **Água quimicamente combinada**
 - *integra a estrutura física do C-S-H*
 - *varia de 0,20 a 0,25 kg / kg cimento anidro (para 100 % de grau de hidratação)*
 - *remoção apenas acima de 200°C (incêndio)*



Água na pasta hidratada e seus efeitos

- **Água interlamelar ou adsorvida**
 - *“monomolecular”, fixada ao C-S-H por pontes de H*
 - *apenas se movimenta p/ U. R. < 11% e temperatura > 100 °C;*
 - *explica o mecanismo de fluência e retração pois são fenômenos de longo prazo*



Água na pasta hidratada e seus efeitos

■ *Água capilar*

- *entra e sai fácil;*
- *retração de secagem ou retração hidráulica;*
- *expansão por umedecimento;*
- *durabilidade: difusividade, permeabilidade, capilaridade*



Quais as águas
da pasta hidratada?





Água na pasta hidratada

Água – Quimicamente combinada

Água – Adsorvida ou interlamelar

Água – Capilar ou livre

Direitos Reservados USP 2009

21

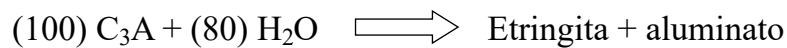
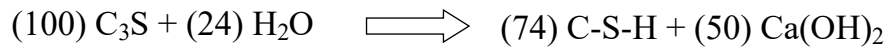


**Qual a água
necessária para
hidratar o cimento?**

22



Química do cimento Portland



+ compostos menores

23



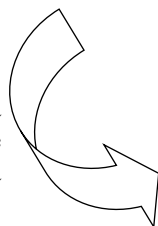
Cálculo da água quimicamente combinada

EXEMPLO: Cimento X

$\text{C}_3\text{S} = 51\%$ / $\text{C}_2\text{S} = 23\%$ / $\text{C}_3\text{A} = 8\%$
 $\text{C}_4\text{AF} = 9\%$ / $\text{CaO livre} = 1\%$ / $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 5\%$

Compostos menores = 3 %

Água
quimicamente
combinada



$$\text{C}_3\text{S} \rightarrow 51 \times 0,24 = 12$$

$$\text{C}_2\text{S} \rightarrow 23 \times 0,21 = 4$$

$$\text{C}_3\text{A} \rightarrow 8 \times 0,80 = 6$$

$$\text{C}_4\text{AF} \rightarrow 9 \times 0,37 = 3$$

H₂O total = 20 a 25 % da massa de cimento

24



Composição típica da fase “sólida” da pasta hidratada

$C_3S \rightarrow 37,6\% \text{ C-S-H} \quad / \quad 25,5\% \text{ Ca(OH)}_2$

$C_2S \rightarrow 23,0\% \text{ C-S-H} \quad / \quad 4,8\% \text{ Ca(OH)}_2$

$C_3A \rightarrow \text{estável} = 3,3\% \quad / \quad \text{instável} = 5,3\%$

$C_4AF \rightarrow \text{estável} = 9\%$

TOTAL:

C-S-H = 60,6%

$\text{Ca(OH)}_2 = 30,3\%$

Estáveis = 12,3%

Instáveis = 5,3%

25



Volume da pasta de cimento Portland

... a reação de hidratação ocorre com a redução de volume equivalente a 25,4% do volume de água que reagiu...

Cimento = 1 kg

H_2O quimicamente combinada = 0,22 kg

Vol. de cimento = $1/3,10 = 0,32 \text{ dm}^3$

Vol. da água quimicamente combinada = $0,22 \text{ dm}^3$

TOTAL = $0,54 \text{ dm}^3$

Efetivo $\Rightarrow 0,32 + 0,746 \times 0,22 = 0,48 \text{ dm}^3$

26



Modelo de Powers

Gel 100% hidratado tem 28% de vazios

Para: Água quimicamente combinada = 0,22
Água adsorvida = 0,18 da massa de cimento

TOTAL = 0,40

Água mínima para
hidratação a 100%

27



Modelo de Powers

EXEMPLO 1:

Concreto – 1 : 2 : 3 : 0,55

Cimento

C₃S = 50 % / C₂S = 22 % / C₃A = 13 %
C₄AF = 9 % / Outros = 6 % / H₂O quim. comb. = 0,22

Produto sólido:

Em massa → 1 + 0,22 = 1,22

Em volume → 1/3,12 + 0,22/1,00 = 0,54 (ERRADO)
= 0,32 + 0,22 (1-0,256) = 0,48 (CERTO)

Água adsorvida (p/ porosidade 27%) = 0,18

28



Modelo de Powers

EXEMPLO 1:

Concreto – 1 : 2 : 3 : 0,55

Volume absoluto de cimento = $1/0,32 = 0,32$ ----- 11,6%

Volume absoluto de areia = $2/2,65 = 0,75$ ----- 27,1%

Volume absoluto de brita = $3/2,70 = 1,11$ ----- 40,0%

Volume absoluto de água = $0,55/1 = 0,55$ ----- 19,8%

Ar aprisionado = $1,50\% = 0,04$ ----- 1,5%

VOLUME TOTAL DE CONCRETO = 2,77 ----- 100%

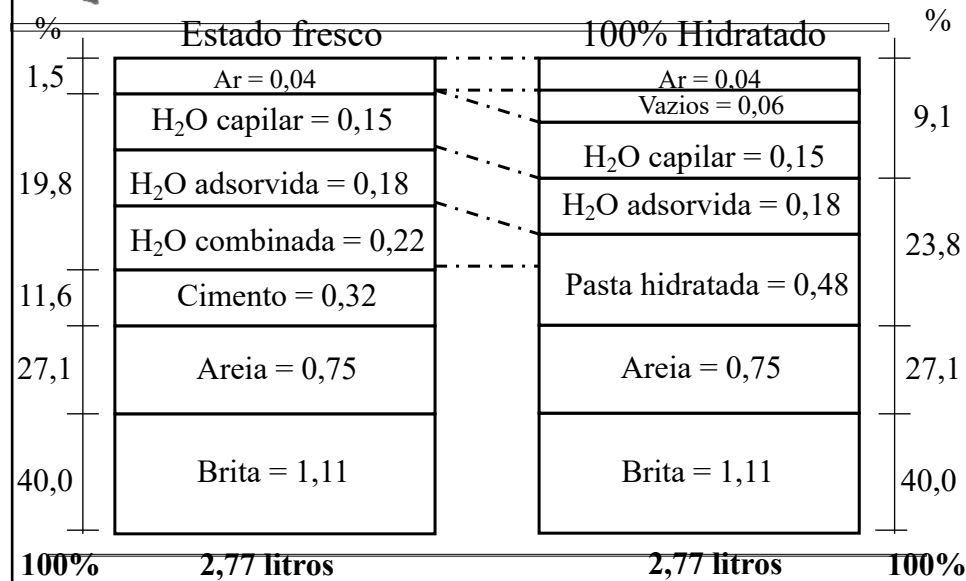
Qual o consumo de cimento? \Rightarrow 361 kg/m³

29



Modelo de Powers

EXEMPLO 1: Concreto – 1 : 2 : 3 : 0,55 / 361 kg/m³



30



Resistência à Compressão segundo Powers

$$f_c = K \left(\frac{0,679 * \alpha}{0,3175 * \alpha + w/c} \right)^n$$

Obs.: k = 120 e n = 3 para fc em MPa