

Estrutura Interna do Concreto

Paulo Helene

Concreto endurecido



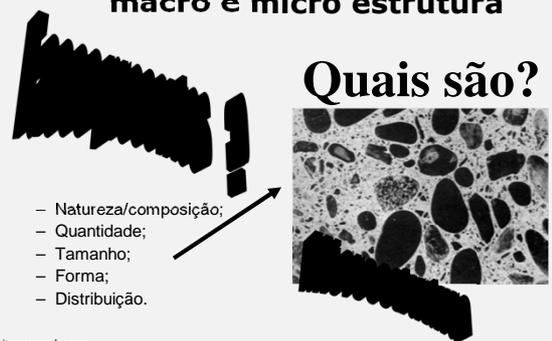
direitos reservados 2010

Bibliografia de referência

- HELENE, Paulo R.L. & TERZIAN, Paulo R. **Manual de Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland**. São Paulo, PINI, 1993. 350 p. ISBN 85-7266-007-0
- HELENE, Paulo R.L. Dosagem do Concreto de Cimento Portland. Cap. 15. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, IBRACON, Instituto Brasileiro do Concreto, 2 v. 2005, 1.600 ISBN 85-98576-04-2, p.583-604
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. (Rev. & Coord.). Nicole Pagan Hasparyk, Paulo Helene & Vladimir Antonio Paulon. São Paulo: IBRACON, Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. 674 p. ISBN 978-85-98576-12-1

direitos reservados 2010

Concreto fases macro e micro estrutura



direitos reservados 2010

Importância

Conhecimento da microestrutura do concreto:

- auxiliar na previsão e otimização das propriedades físicas e mecânicas;
- prevenir manifestações patológicas precoces nas estruturas;
- contribuir para a durabilidade das estruturas;
- modelar o comportamento do concreto endurecido

direitos reservados 2010

Concreto

- 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:
 - varia com a idade da pasta ou grau de hidratação
 - varia com a quantidade de água ou relação água/cimento
 - varia nas proximidades de uma superfície

direitos reservados 2010

Microestrutura - concreto



direitos reservados 2010

Fases constituintes da Pasta

• Produtos "SÓLIDOS"

- produtos da hidratação;
 - Gel C-S-H;
 - Hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
 - Aluminatos, ferritos, ...
 - Sulfoaluminatos (etringita);
 - Grãos anidros (CaO , MgO , clínquer);

• Vazios, Ar & Poros

- Vazios de gel;
- Vazios capilares;
- Vazios de ar apr./inc.;
- Poros de contração química

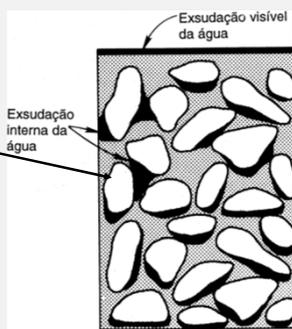
• ÁGUAS

- capilar ou livre
- interlamelar ou adsorvida, ou zeolítica ou de gel
- quimicamente combinada ou de cristalização

direitos reservados 2010

Microestrutura - concreto

• Heterogeneidades:



direitos reservados 2010

Fases Constituintes da Pasta

• Fase 1 - SÓLIDOS

principais produtos da hidratação do cimento Portland;

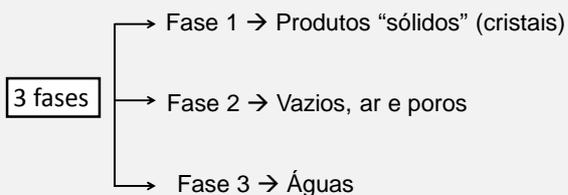
- Gel C-S-H;
- Hidróxido de cálcio;
- Sulfoaluminatos.



Obs.: aluminatos e ferritos estáveis; CaO livre; MgO livre; etc.

direitos reservados 2010

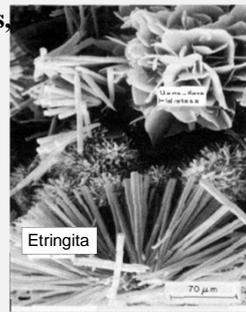
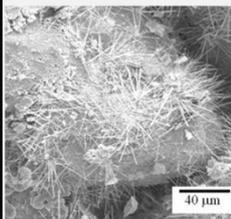
Fases constituintes da Pasta



direitos reservados 2010

Fases constituintes Pasta

• Fase 1. Produtos Sólidos, cristais aciculares



direitos reservados 2010

Fases constituintes Pasta

- Fase 2. Vazios, Ar & Poros
 - espaço interlamelar no gel de C-S-H
 - vazios capilares;
 - vazios de ar aprisionado / incorporado
 - micro-poros decorrentes da contração química (retração autógena, auto-dessecação)

direitos reservados 2010

Fases constituintes Pasta

- Fase 3 - ÁGUA
 - de cristalização ou quimicamente combinada
 - de gel, zeolítica, adsorvida ou interlamelar
 - capilar ou livre



poros

direitos reservados 2010

Poros da Pasta

- Espaço interlamelar no C-S-H 0,5 a 2,5 nm
- Micro-poros e poros de gel 0,5 a 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 \rightarrow 10⁻⁹ m

direitos reservados 2010

Água na pasta hidratada e seus efeitos

- Água de cristalização ou quimicamente combinada
 - integra a estrutura física do gel de C-S-H
 - varia de 0,20 a 0,28 kg / kg cimento anidro (para 100 % de grau de hidratação)
 - remoção apenas acima de 200°C

direitos reservados 2010

Poros da pasta e efeitos

- Poros e Vazios capilares

Certos pesquisadores entendem que a **resistência** mecânica é explicada preponderantemente pelos vazios capilares, ou seja, poros acima de 100 nm;

Certos pesquisadores explicam a **retração e a fluência** a partir do movimento lento da água nos microporos abaixo de < 50 nm.

direitos reservados 2010

Água na pasta hidratada e seus efeitos

- Água de gel, zeolítica, interlamelar ou adsorvida
 - “monomolecular”, fixada ao C-S-H por pontes de H
 - apenas se movimenta p/ U. R. < 11% e temp. > 120 °C;
 - pode explicar a fluência e retração
 - para porosidade de 28% (Powers) \rightarrow água de gel de 0,15 a 0,22 kg/kg cimento

direitos reservados 2010

Água na pasta hidratada e seus efeitos

- **Água capilar ou livre**

Sofre forte efeitos de tensão capilar e pode explicar → **retração hidráulica ou de secagem**

É a água que sobra depois da parcela quimicamente combinada (cristais) e da água adsorvida (gel). Admite-se como aquela acima de 0,40 kg/kg cimento para grau de hidratação de 100%

direitos reservados 2010



Qual a água necessária para hidratar o cimento?

direitos reservados 2010

Quais as águas da pasta hidratada?



direitos reservados 2010

Química do cimento Portland



+ compostos menores

Água na pasta hidratada:

Água → Quimicamente combinada

Água → Gel, adsorvida ou interlamelar

Água → Capilar ou livre

direitos reservados 2010

Cálculo da água quimicamente combinada

EXEMPLO: Cimento X

$C_3S = 51\%$ / $C_2S = 23\%$ / $C_3A = 8\%$

$C_4AF = 9\%$ / $CaO \text{ livre} = 1\%$ / $CaSO_4 \cdot 2H_2O = 5\%$

Compostos menores = 3 %

Água quimicamente combinada

$$\begin{aligned} C_3S &\rightarrow 51 \times 0,24 = 12 \\ C_2S &\rightarrow 23 \times 0,21 = 4 \\ C_3A &\rightarrow 8 \times 0,80 = 6 \\ C_4AF &\rightarrow 9 \times 0,37 = 3 \end{aligned}$$

H_2O total = 20 a 25 % da massa de cimento

direitos reservados 2010

Composição típica:

$C_3S \rightarrow 27,6\%$ C-S-H / $18,4\%$ $Ca(OH)_2$
 $C_2S \rightarrow 20,8\%$ C-S-H / $4,3\%$ $Ca(OH)_2$
 $C_3A \rightarrow$ estável = $3,7\%$ / instável = $5,3\%$
 $C_4AF \rightarrow$ estável = 10%

TOTAL num concreto típico:

C-S-H = $48,4\%$
 $Ca(OH)_2 = 22,7\%$
 Estáveis = $13,7\%$
 Instáveis = $5,3\%$

Modelo de Powers

EXEMPLO 1:

Concreto – 1 : 2 : 3 : 0,55

Cimento

$C_3S = 50\%$ / $C_2S = 22\%$ / $C_3A = 13\%$
 $C_4AF = 9\%$ / Outros = 6% / H_2O quim. comb. = $0,22$

Produto sólido:

Em massa $\rightarrow 1 + 0,22 = 1,22$

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

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

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... (Powers)

Cimento = 1 kg
 H_2O quimicamente combinada = $0,22\text{ kg}$

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

Obs.: portanto aparece $0,54 - 0,48 = 0,06\text{ dm}^3$ de micro-poros...

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? $\Rightarrow 361\text{ kg/m}^3$

Modelo de Powers

Gel 100% hidratado tem 28% de vazios

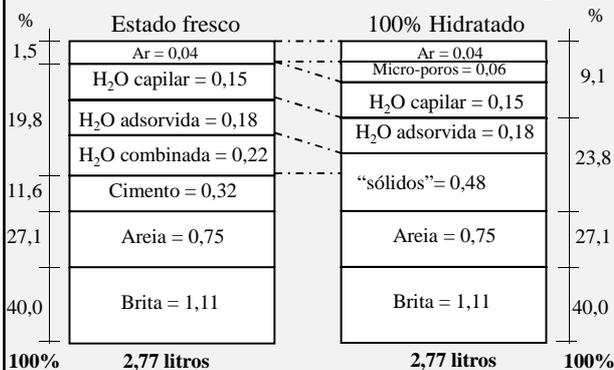
Para: Água quimicamente combinada = $0,22$
 Água adsorvida = $0,18$ da massa de cimento

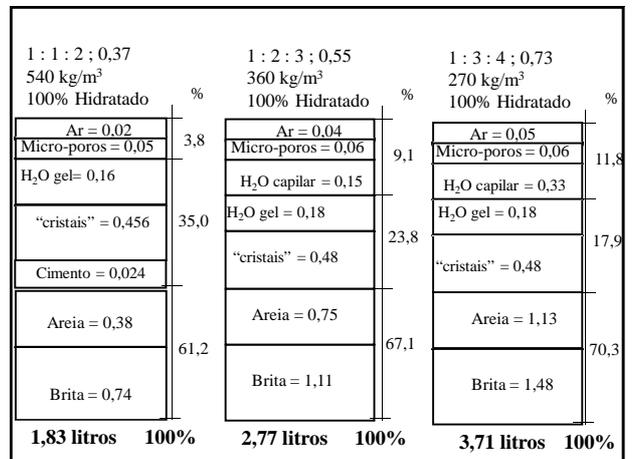
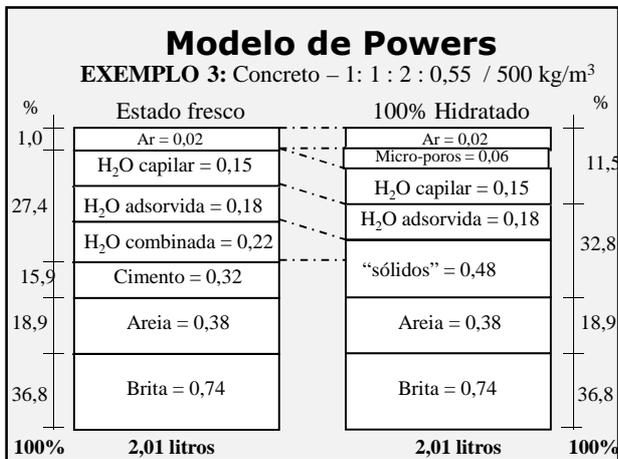
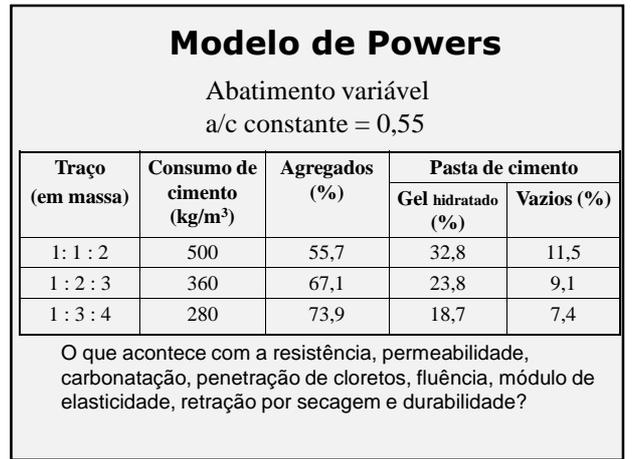
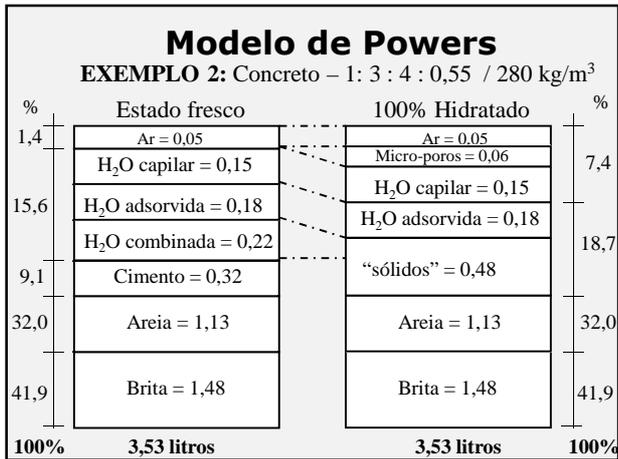
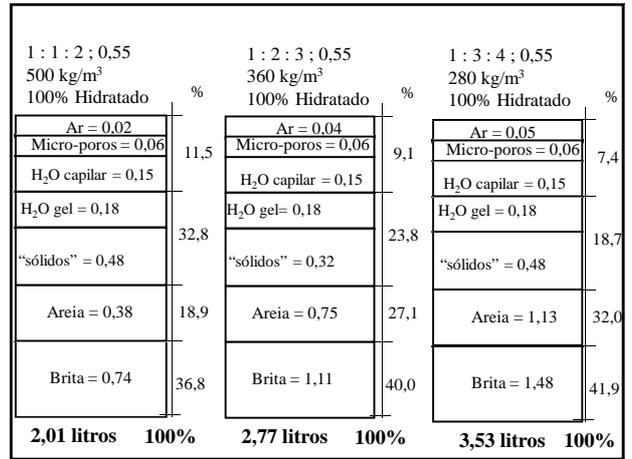
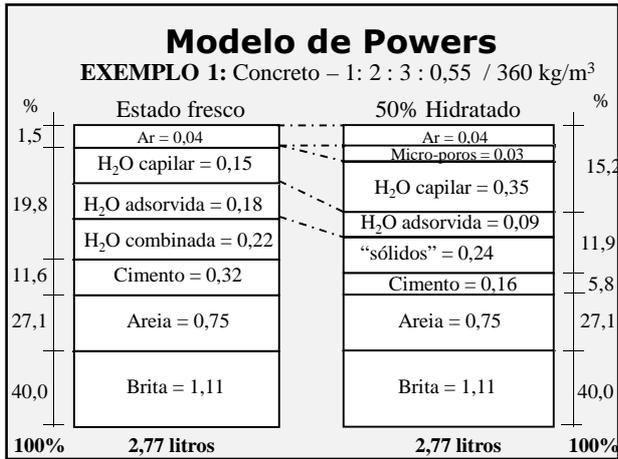
TOTAL = $0,40$

Água mínima para hidratação a 100%

Modelo de Powers

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



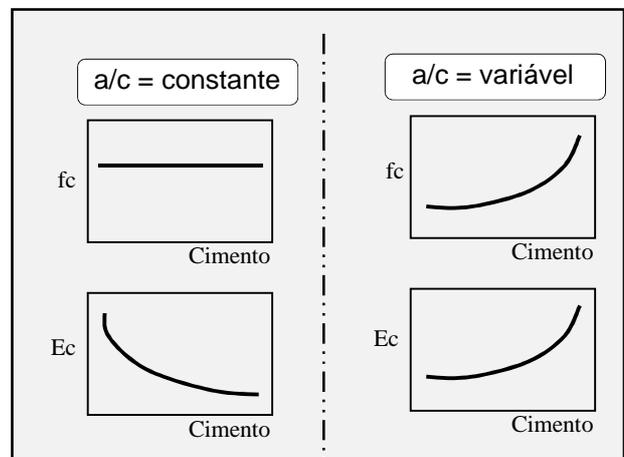
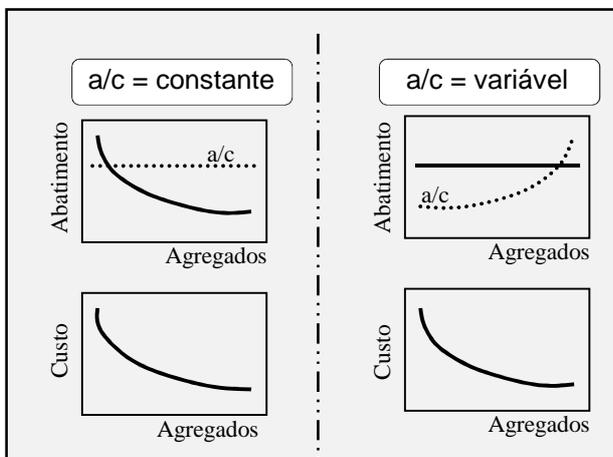
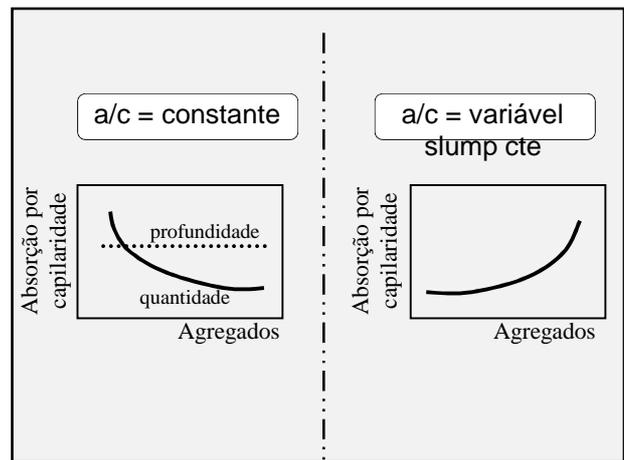
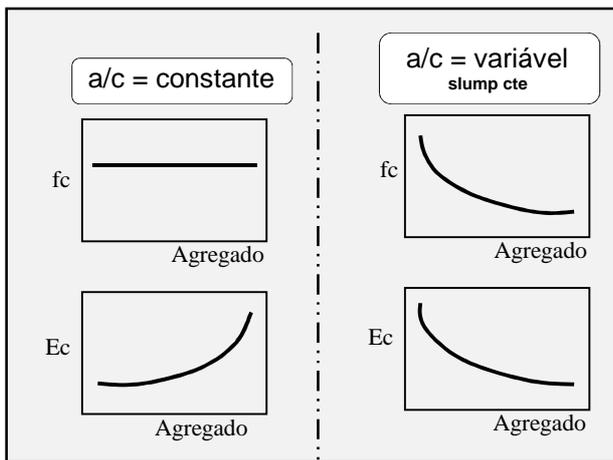
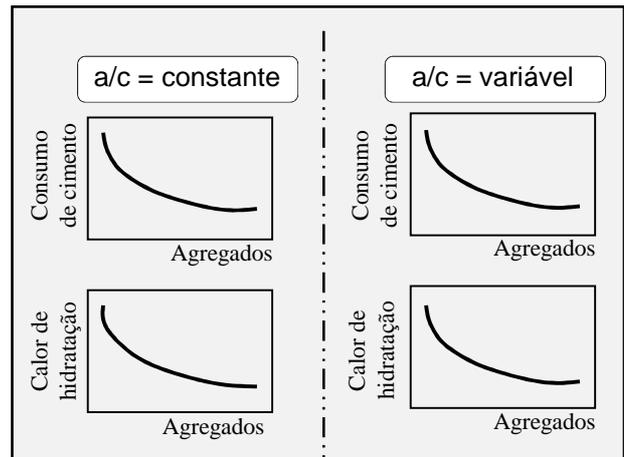


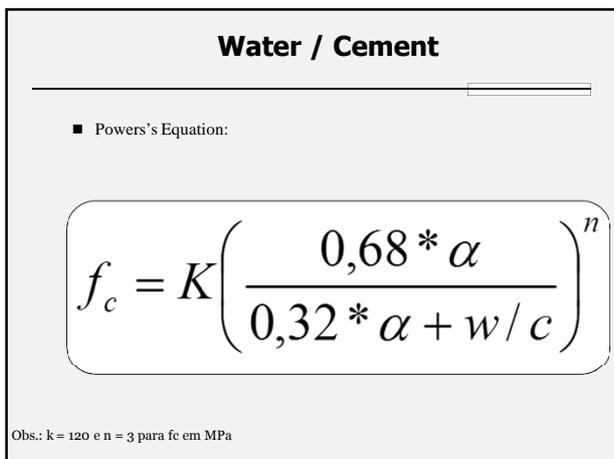
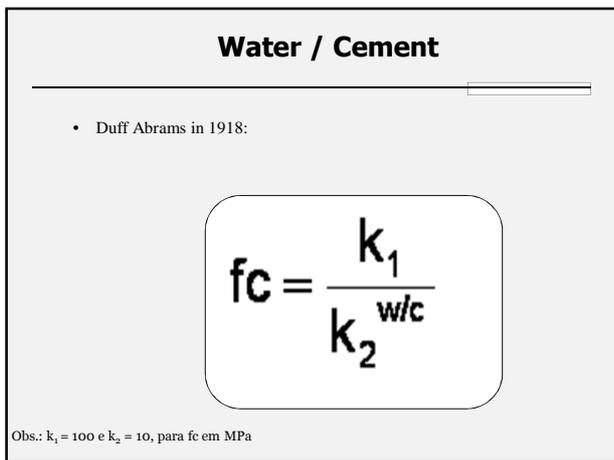
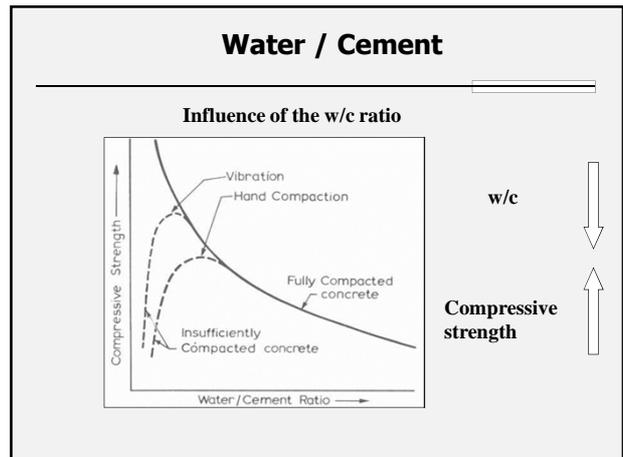
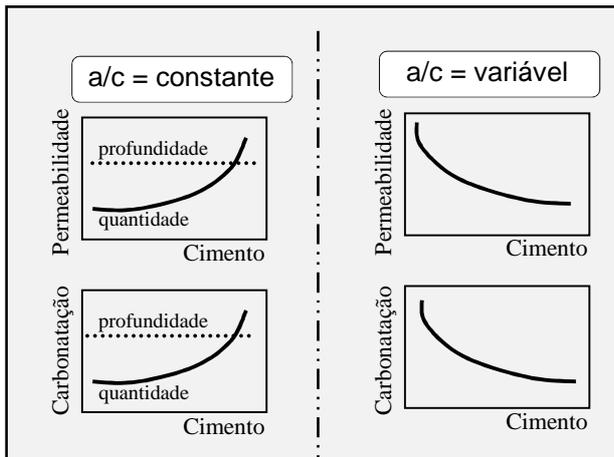
Modelo de Powers

Abatimento Constante
a/c variável

Traço (em massa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Agregados (%)	Pasta de cimento	
			Gel hidratado (%)	Vazios (%)
1 : 1 : 2 ; 0,37	540	61,2	35,0	3,8
1 : 2 : 3 ; 0,55	360	67,1	23,8	9,1
1 : 3 : 4 ; 0,73	270	70,3	17,9	11,8

O que acontece com a resistência, permeabilidade, carbonatação, penetração de cloretos, fluência, módulo de elasticidade, retração por secagem e durabilidade?





**POROSIDADE NO CONCRETO
POROS EXISTENTES / DIMENSÕES**

Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida
Fonte: Mehta - 1994

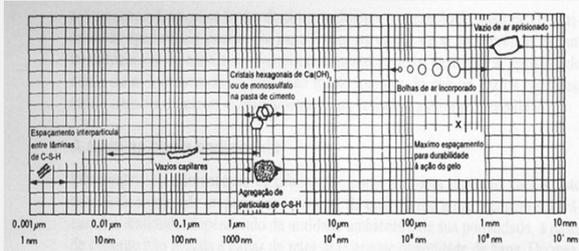


Figura 2-7 Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida.

Influência da relação a/c e do grau de hidratação sobre a resistência e a permeabilidade / Fonte: Mehta - 1994

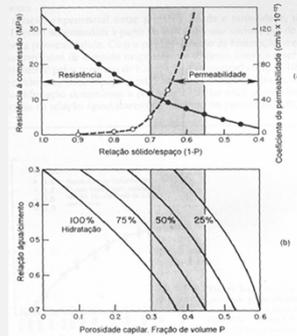


Figura 2-11 Influência da relação água/cimento e do grau de hidratação sobre a resistência e a permeabilidade.

**POROS QUE INTERFEREM NA ABSORÇÃO
E CAPILARIDADE DO CONCRETO**

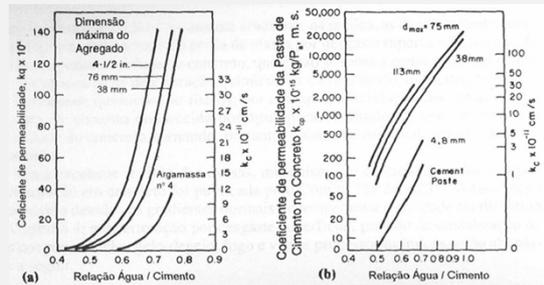
Segundo Mehta, 1994 – Poros > 50 nm
Segundo Neville, 1997 – Poros > 120 nm

Portanto:

Poros de gel não interferem na absorção do concreto.

Poros capilares, poros de ar incorporado e poros de ar aprisionado interferem na absorção.

**Influência da relação água/cimento e dimensão máxima do agregado permeabilidade do concreto
Fonte: Mehta - 1994**



**INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C
E DO GRAU DE HIDRATAÇÃO NA
PERMEABILIDADE DO CONCRETO**