


 Ministério da Educação
 Universidade Federal do Paraná
 Setor de Tecnologia
 Departamento de Construção Civil

**Materiais de Construção
 (TC-030)
 A ESTRUTURA DO CONCRETO**

Professores
 José de Almendra Freitas Jr. - freitasjose@terra.com.br
 Laila Valduga Artigas - artigas@ufpr.br

Versão 2019


 A estrutura do concreto
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ESTRUTURA DO CONCRETO

Concreto { Estrutura Heterogênea
 Complexa
 Composição depende de Inúmeros Fatores

Macro Estrutura { Agregados
 Pasta

Micro Estrutura { Agregados
 Pasta
 Vazios + Água
 Zona de Transição



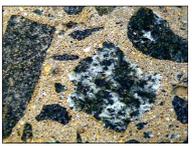

 A estrutura do concreto
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ESTRUTURA DO CONCRETO

- Concreto - estrutura heterogênea e complexa
- Macroestrutura:
 - Agregados
 - Pasta de cimento
 - Interface agregados/pasta = zona de transição



Estrutura macroscópica do concreto são bem visíveis os agregados e a pasta.
 ZT = +/- 20 mm



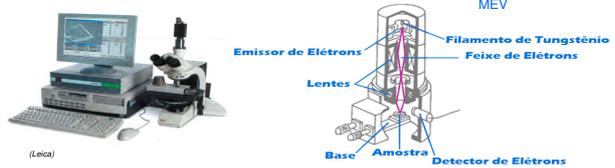

 A estrutura do concreto
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ESTRUTURA DO CONCRETO - Microestrutura

Microestrutura
 Estudo através de microscopia ótica e eletrônica



Microscópio Eletrônico de Varredura MEV



Emissor de Elétrons Filamento de Tungstênio
 Lentes Feixe de Elétrons
 Base Amostra Detector de Elétrons

(Leica)


 A estrutura do concreto
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ESTRUTURA DO CONCRETO

Microscópio Eletrônico de Varredura MEV

Aumentos de até 900.000 x
 Imagens tridimensionais



Detectores Microsonda Coluna Ótico-eletrônica
 Monitor para visualização de imagens Câmara de Amostra

EDS - Espectroscopia por Energia Dispersiva por feixes de raios X, permite identificar qualitativa e quantitativamente a composição de uma região da amostra


 A estrutura do concreto
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Microscópio Eletrônico de Varredura MEV



Arquivo: Filmes concreto/ Microestrutura / SEM

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ESTRUTURA DO CONCRETO

Importância do Estudo:

- O estudo da Microestrutura permite entender o comportamento do concreto;
- Ferramenta para análise de patologias do concreto e análise de durabilidade;
- Desenvolvimento de novos aditivos e suas conseqüências;
 - Ensaio não-destrutivo e eficiente.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "AGREGADO"

Características físicas:

Agregados representam 80 a 90 % do volume do concreto

Determinam:

- Massa Específica (ME) do concreto;
- E - Módulo de elasticidade;
- Condutibilidade térmica.



Agregados miúdos e graúdos

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "AGREGADO"

Efeitos da geometria dos grãos:

Porosidade:

Grão do agregado absorve água, pode faltar água na região de aderência do agregado com a pasta;

Agregados leves - argila expandida, ...



Agregados naturais como a areia e os seixos tem superfície polida com pouca porosidade.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "AGREGADO"

Efeitos da geometria dos grãos:

Rugosidade:

Aumenta superfície específica (SE) e aderência c/ pasta, altera a trabalhabilidade do concreto

Superfícies de agregados naturais como a areia e os seixos são menos rugosas.



Britas tem superfície mais rugosa

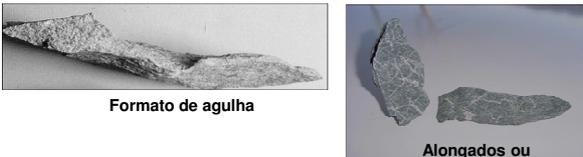
A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "AGREGADO"

Efeitos da geometria dos grãos:

Forma dos grãos:

Grãos lamelares ou em formato de agulha prejudicam a trabalhabilidade do concreto.



Formato de agulha

Alongados ou lamelares

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "AGREGADO"

Grãos lamelares

Maior quantidade de vazios

Maior consumo de pasta de cimento

Concreto com maior custo

Aumenta retração

Aumenta calor

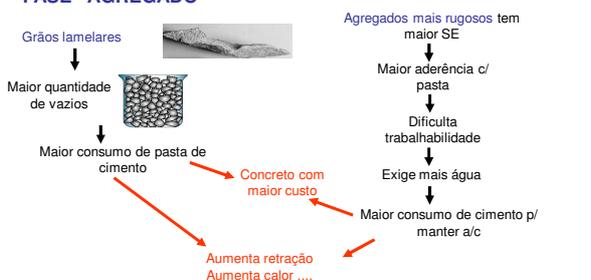
Agregados mais rugosos tem maior SE

Maior aderência c/ pasta

Dificulta trabalhabilidade

Exige mais água

Maior consumo de cimento p/ manter a/c



A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

Estágios da hidratação do cimento:

Estágio I: Em contato com a água ocorre uma rápida dissolução dos grãos de cimento. Sobem as concentrações de álcalis solúveis, Ca^{2+} , SO_4^{2-} e íons OH em solução, resultando em um pH de 12 a 13.

Estágio II: Os íons Ca^{2+} , SO_4^{2-} e íons OH reagem com os silicatos e aluminatos para formar gel de C-S-H e etringita, formando uma barreira em torno dos grãos de cimento não hidratados, retardando novas hidratações, permitindo um período de trabalhabilidade durante o qual o concreto deve ser lançado e assentado.

(K. Luke)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

Estágios da hidratação do cimento:

Estágio III: Durante o Estágio II a concentração de íons Ca^{2+} continua a aumentar, reiniciando lentamente a hidratação dos grãos de cimento atrás da barreira.

Com a supersaturação de Ca^{2+} , seguida da precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ocorre uma rápida hidratação dos grãos de cimento gerando gel de C-S-H e etringita.

A formação de gel de C-S-H e o intertravamento das partículas promovem a pega e o endurecimento.

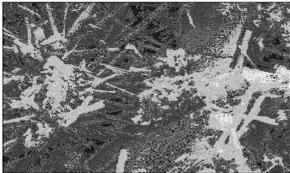
(K. Luke)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

Diversos cristais são observados na pasta de cimento Portland hidratada:

- Estruturas Fibrilares: **C-S-H**
- Estruturas Prismáticas: **C-H**
- Etringita: **$\text{C}_6\text{A}\overline{\text{S}}\text{H}_{32}$**
- Monossulfato: **$\text{C}_4\overline{\text{A}}\text{S}\cdot\text{H}_{18}$**

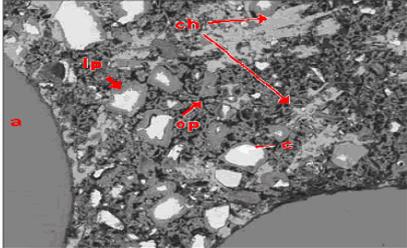


(Jim Margeson, NRC-IRC)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

a = agregado, **c** = cimento residual, **ch** = hidróxido de cálcio, **ip** = C-S-H dentro do gel, e **op** = C-S-H, externo ao gel



A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Estruturas Fibrilares: C-S-H**
- Cristais de C_3S e C_2S hidratados

$$2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + 3\text{CH} + 120 \text{ cal/g}$$

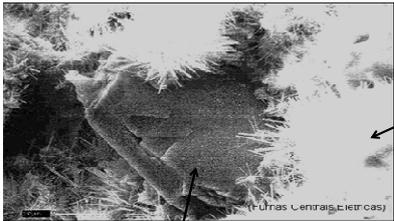
$$2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + \text{CH} + 62 \text{ cal/g}$$

- 50 % a 60% do volume da pasta
- São as estruturas **C-S-H** - **C**=CaO, **S**= SiO_2 , **H**= H_2O
- Estruturas unidas através de ligações de *van der Waals*
- Excelente resistência mecânica e química

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Estruturas Fibrilares: C-S-H**



Estruturas C-S-H (C_3S e C_2S hidratados)

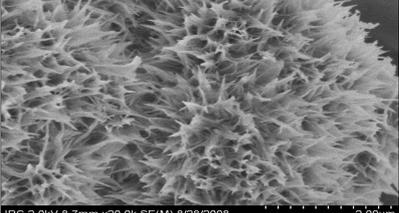
Agregado

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Estruturas Fibrilares: C-S-H**

Cristais de C-S-H crescendo depois de duas semanas de hidratação (A/C=0,8). A morfologia dos cristais depende das condições de cura.



IRC 2.0kV 8.7mm x20.0k SE(M) 8/28/2008 2.00um

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Estruturas Prismáticas: C-H (Portlandita)**

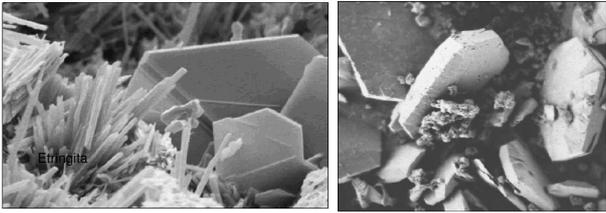
- Cristais de grande tamanho
- Cristais com formas hexagonais;
- Formados p/ hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 ;
- 20 a 25% do volume de sólidos;
- Formam estruturas C-H;
- Responsáveis pH elevado da pasta (pH \approx 13);
- Ca(OH)_2 é muito solúvel em água;
- Ca(OH)_2 é quimicamente muito reativo;
- Cristais porosos com baixa resistência mecânica.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Estruturas Prismáticas: C-H (Portlandita)**

Cristais hexagonais de hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2



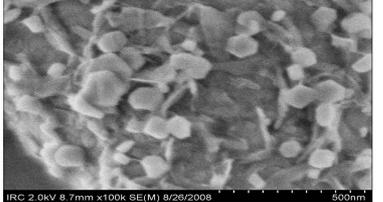
Etringita

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Estruturas Prismáticas: C-H (Portlandita)**

Cristais hexagonais de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2



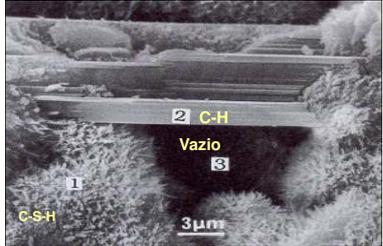
Pequenos cristais de formato hexagonal (100nm) de Ca(OH)_2 na superfície de C_3S depois de 2,5 horas de hidratação (a/c=0,8).

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Estruturas Prismáticas: C-H (Portlandita)**

- C-S-H
- Ca(OH)_2 ou (C-H)
- Vazio Capilar



3µm

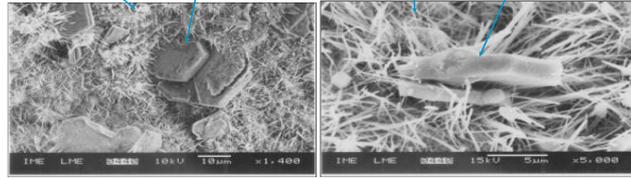
(Moranville, 1992)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Estruturas Prismáticas: C-H (Portlandita)**

C-S-H C-H Etringita C-H



Micrografias (MEV)

(Silva, F.J. da, IME)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

Etringita: Produto da hidratação dos Aluminatos
Cristais grandes e volumosos
Formados por C_3A + gesso hidratados

$C_3A + 3\overline{CSH}_x + 32H \rightarrow C_3A \cdot 3\overline{CSH}_{32}$ **Etringita primária**

Com a redução na concentração de sulfato, a etringita se decompõe, formando monossulfato:

$C_3A + \overline{CSH}_x + 12H \rightarrow C_3A \cdot \overline{CSH}_{18}$ **Monossulfato**

- Cristais muito porosos com baixa resistência mecânica;
- São os primeiros cristais da pasta a se formar;
- Podem causar falsa pega;
- Representam 15 a 20 % do volume de sólidos.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Etringita:**

Monossulfato hidratado
 $C_3A \cdot \overline{CSH}_{18}$

C-S-H

Etringita
 $C_3A \cdot 3\overline{CSH}_{32}$

(Matta e Monteiro, 1984)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

Etringita: Produto da hidratação dos Aluminatos

Hidróxido de cálcio
 $Ca(OH)_2$

Etringita
 $C_3A \cdot 3\overline{CSH}_{32}$

Calcium Hydroxide

Etringite

15 µm

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Etringita:**

Reação do C_3A em solução de gesso.

20 µm

Concrete.cce.frosilma.u.ac.pt/research_e.html

C_3A + gesso hidratados

$C_3A + 3\overline{CSH}_x + 32H \rightarrow C_3A \cdot 3\overline{CSH}_{32}$ **Etringita primária**

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Etringita:**

- Formam-se nas primeiras horas de hidratação;
- Cristais em formato de agulhas;
- Agulhas se intertravam e prendem muita água;
- Prejudicam a trabalhabilidade – causam falsa pega.

$C_3A \cdot 3\overline{CSH}_{32}$
Etringita, A_H

CENTRO TECNOLÓGICO DE ENGENHARIA CIVIL
FUNDOS CONSTRUTIVOS - ETN 030 - 000000000
img_3_28_8_4_000000000_001

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Etringita:**

Cristais em formato de agulhas;

20KV X3400 10U 189 00003 UDZ

(Blak, J.; Bolmann, K., Bauhaus University Weimar Germany.)
(Giesler, A. Swiss Federal Institute of Technology, 2002)

Prejudicam a trabalhabilidade – causam falsa pega.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ" **Etringita secundária:**
 Na presença de umidade no concreto já endurecido, a etringita recristaliza em cristais maiores dentro dos vazios.

Etringita secundária em vazio de ar Etringita secundária em microfissuras

(Maria Virginia Heumann e Fabiana Moraes)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ" **Etringita secundária:**
 Na presença de umidade no concreto já endurecido, a etringita recristaliza em cristais maiores dentro dos vazios.

Etringita secundária em vazio de ar

Depósitos secundários em um vazio de ar: Pequenas agulhas de etringita secundária.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ" • **Monossulfato:**
 A etringita é instável e se transforma em cristais de monossulfato.

$C_4AS.H_{18}$
 Monossulfato A_{1m}

•Cristais hexagonais organizados em forma de "rosas"
 •Vulnerável ao ataque de sulfatos

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ" • **Monossulfato:**
 A etringita é instável e se transforma em cristais de monossulfato.

$C_4AS.H_{18}$
 Monossulfato A_{1m}

Com a redução na concentração de sulfato, a etringita se decompõe, em monossulfato, se o sulfato volta a estar disponível, forma-se novamente a etringita.

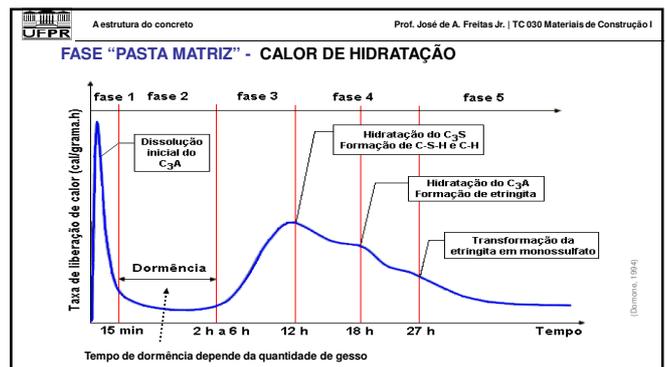
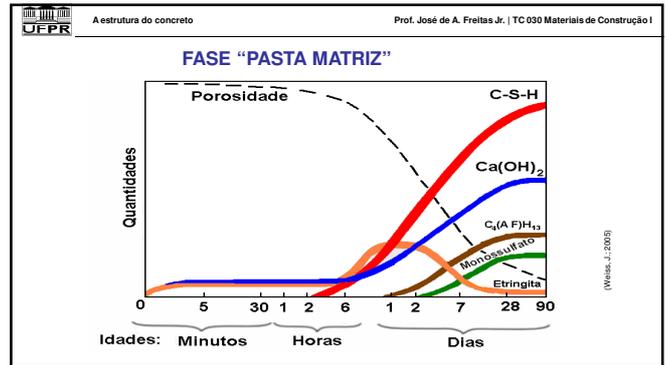
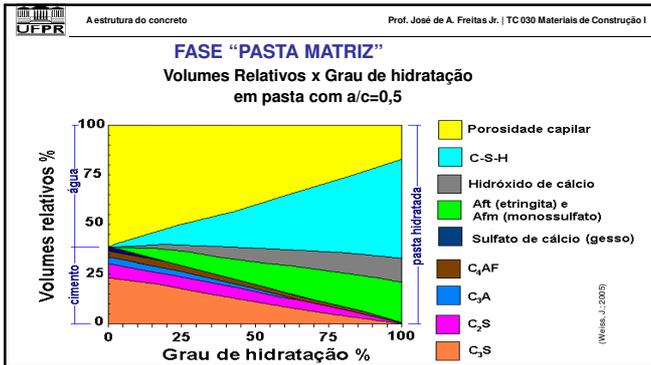
A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"
 • **Grãos de clínquer não hidratados:**

Grãos de clínquer não hidratados

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"
 • **Grãos de clínquer não hidratados:**
 Resíduos de grãos de clínquer não hidratado dentro de um anel de compostos hidratados.



UFPR A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ" CALOR DE HIDRATAÇÃO

Comportamento dos compostos			Contribuição para o cimento	
Composto	Velocidade da reação	Calor liberado	Resistência Mecânica	Liberação de calor
C ₃ S	Moderada	Moderado	Alta	Alta
C ₂ S	Lenta	Baixo	Inicial baixa, final alta	Baixa
C ₃ A + CSH ₂	Rápida	Muito alto	Baixa	Muito alta
C ₄ AF + CSH ₂	Moderada	Moderado	Baixa	Moderada

(Weiss, J., 2005)

- UFPR A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I
- ### FASE "PASTA MATRIZ"
- Vazios na pasta endurecida:**
- São de extrema importância
 - Maior quantidade de vazios e maiores diâmetros médios:
 - Maior porosidade;
 - Maior permeabilidade;
 - Menor resistências mecânica;
 - Menor resistência química;
 - Maior retração;
 - Maior fluência.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

Vazios - Espaço interlamelar das estruturas C-S-H:

Poros muito pequenos para afetar a resistência mecânica ou a permeabilidade.

Estruturas C-S-H formam lamelas muito próximas 5 a 25Å (1 Å = 10⁻¹⁰m)

Quando a água sai destes espaços a **retração** é significativa.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Vazios Capilares:**
 - Poros onde a água de amassamento fica aprisionada.
 - 20 a 22% peso de CP em água reage quimicamente
 - "água estequeométrica"
- Toda água além, sobra e fica dentro dos poros capilares
 - Concretos comuns:
 - a/c entre 0,40 a 0,65 para um concreto trabalhável
 - (boa plasticidade). Sobra 50 a 70% da água utilizada

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Vazios Capilares:**

100 cm³ de cimento, a/c constante=0,63 grau de hidratação varia como mostrado:

Dias de Hidratação	% de Hidratação	Cimento (cm³)	Produtos de Hidratação (cm³)	Poros Capilares (cm³)
Nada		100	0	0
7 d	50%	45	55	0
28d	75%	25	75	0
1 ano	100%	0	100	100

(Mehta e Monteiro, 2006)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Vazios Capilares:**

100 cm³ de cimento, com 100% de hidratação, variando o a/c conforme mostrado:

a/c	Cimento (cm³)	Produtos de Hidratação (cm³)	Poros Capilares (cm³)	Volume total (cm³)
0,7	100	120	0	220
0,6	100	88	0	188
0,5	100	57	0	157
0,4	100	26	0	126

(Mehta e Monteiro, 2006)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Vazios Capilares:**

(Mehta e Monteiro, 2006)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- Vazios Capilares:**

(Mehta e Monteiro, 2006)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Vazios Capilares:**

Poros com diâmetros de 0,01 μm a 1,0 μm .
($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$; $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)

Os diâmetros são relativos ao afastamento inicial dos grãos de cimento.
Quanto maior a relação a/c, maior a quantidade de poros capilares e maiores os seus diâmetros.

Poros com \varnothing inferiores a 500 \AA não afetam a resistência mecânica mas provocam forte retração com a saída da água.

Poros com \varnothing superiores a 500 \AA prejudicam a resistência mecânica mas não causam muita retração com a saída da água.

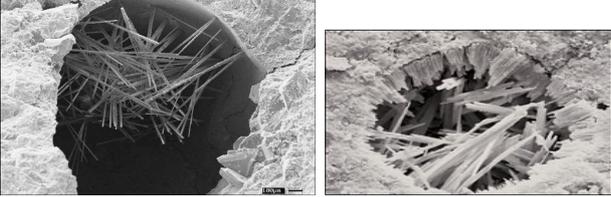
(Mehta e Monteiro, 2006)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Vazios Capilares:**

Micrografias eletrônicas (MEV) mostrando vazios capilares com alguns cristais de etringita secundária crescendo no seu interior.

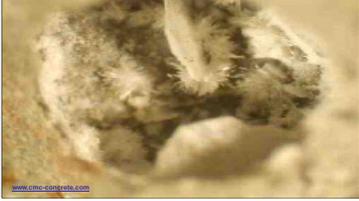


(Mehta e Monteiro, 2006) www.cement.org

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Vazios Capilares:**



Fotomicrografia de cristais de etringita secundária, (formato de agulhas), crescendo dentro de um vazio de ar. No mesmo vazio estão se formando cristais hexagonais secundários de hidróxido de cálcio.

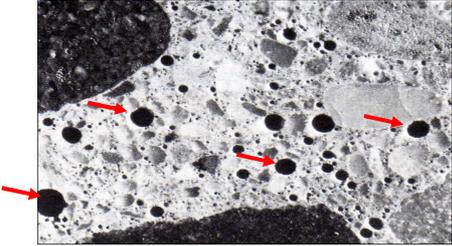
www.cmc-consulting.com

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Vazios Capilares:**

Fotografia ampliada de uma seção de concreto mostrando os poros provocados pela água que "sobra" da relação a/c.



(Henrió Neto, E., 2008)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Ar incorporado:**

Representa (1 a 2%) do volume total do concreto

Ar aprisionado:
Pequenas bolhas de ar (+ 5mm) ficam aprisionadas durante a mistura na betoneira.

Ar incorporado:
Bolhas de 50 a 200 μm ($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$), favorecem a trabalhabilidade, aumentam o abatimento sem água (não altera a relação a/c). Incorporadas através de aditivos IAR (incorporadores de ar).

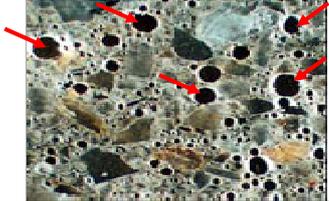
Incorporação de ar também é utilizada para melhorar a resistência do concreto ao fenômeno gelo-degelo.

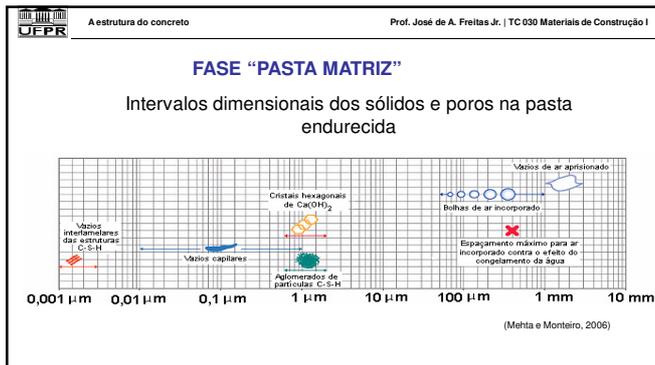
A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

FASE "PASTA MATRIZ"

- **Ar incorporado:**

Ar aprisionado: Bolhas de ar (+ 5mm) aprisionadas durante a mistura na betoneira.





A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ÁGUA NA PASTA ENDURECIDA:

Na pasta recém endurecida existe muita água, tanto livre (líquida) ou quimicamente combinada.

Estas "águas" são mais ou menos fáceis de sair do concreto, a pasta que é inicialmente saturada sofre uma perda contínua da água até o equilíbrio com a umidade do meio ambiente.

Sob calor 100 % da água pode sair.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

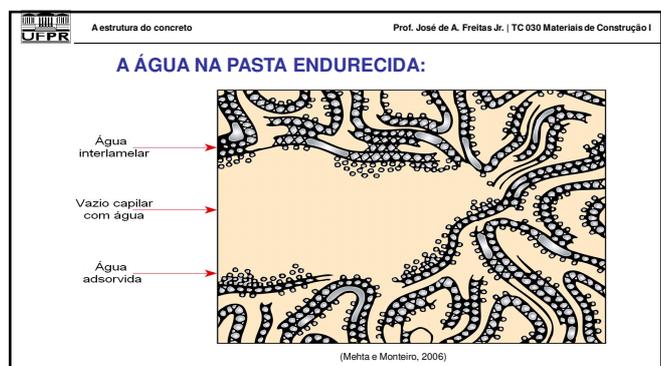
A ÁGUA NA PASTA ENDURECIDA:

Água capilar - no interior dos poros capilares.
 • Poros diâmetro superior a 500Å, saída causa pouca retração
 • Poros diâmetro inferiores a 500Å, saída causa retração

Água adsorvida - aderida às superfícies sólidas, sob atração elétrica (pontes de hidrogênio). A sua saída é a principal causa da retração.

Água interlamelar - presa entre as lâminas das estruturas C-S-H. Saída causa forte retração, mas sob umidade do ar inferior a 11%.

Água quimicamente combinada - moléculas de H₂O combinadas aos silicatos e aluminatos do cimento formando cristais sólidos.
 500°C inicia a saída da água nos cristais Ca(OH)₂
 900°C sai a água das estruturas C-S-H



A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ÁGUA NA PASTA ENDURECIDA:

Só 20 a 22 % do peso do cimento em água reagem com os silicatos e aluminatos do cimento.

P/ uma relação a/c= 0,40 sobra ≈ 50 % da água na forma líquida
 P/ uma relação a/c= 0,60 sobra ≈ 60 % da água na forma líquida

```

    graph TD
        A[MAIOR CONSUMO DE ÁGUA] --> B[Quanto maior a/c]
        B --> C[MAIOR RETRAÇÃO (microfissuras)]
        C --> D[MAIOR CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND]
        B --> E[MAIS E MAIORES POROS]
        E --> F[Menor Resistência Mecânica]
        C --> G[MAIOR PERMEABILIDADE]
        G --> H[Menor Durabilidade]
    
```

(José Freitas Jr.)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ÁGUA NA PASTA ENDURECIDA:

Fissuras decorrentes da retração do concreto no estado plástico.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ÁGUA NA PASTA ENDURECIDA:

Fissuras decorrentes da retração do concreto no estado endurecido.

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ZONA DE TRANSIÇÃO:

A ZT é a interface entre o agregado e a pasta, tem espessura de aproximadamente 1/20 mm.

É o "elo" mais frágil do concreto.

As rupturas em concretos comuns iniciam na zona de transição.

Baixa resistência mecânica da ZT:

Concentração de "etringita" - cristais grandes, porosos c/ baixa resistência mecânica.

Filme de água - aumenta a/c (exsudação interna).

Os cristais de hidróxido de cálcio se posicionam paralelamente à superfície do agregado, favorecendo a existência de planos de clivagem. (Paulon, 1991)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ZONA DE TRANSIÇÃO:

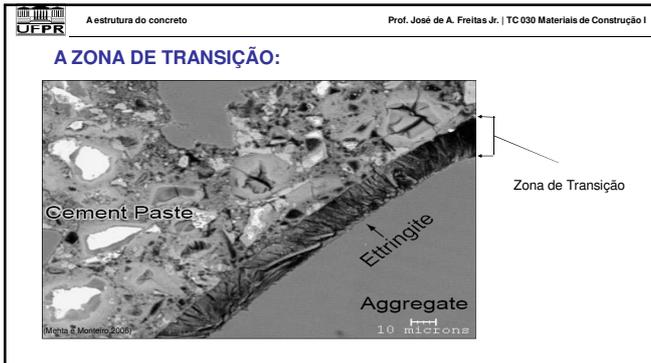
(Mehta e Monteiro, 1994)

Agregado ← Zona de Transição → Matriz de pasta de cimento

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ZONA DE TRANSIÇÃO:

Representação esquemática da zona de transição entre a pasta e o agregado. (MONTEIRO, 1995)



A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ZONA DE TRANSIÇÃO: **Exsudação interna**

Exsudação é a tendência da água de amassamento vir à superfície do concreto recém lançado, devido ao sua densidade (1g/cm^3) ser menor que a dos agregados ($\approx 2,4\text{g/cm}^3$) e a do cimento ($\approx 3,1\text{g/cm}^3$).

Fenômeno faz com que o fator a/c da superfície fique enorme, reduzindo a resistência mecânica na região.

Exsudação
Água de amassamento
surgindo na superfície do concreto

(Granato, Bass)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ZONA DE TRANSIÇÃO: **Exsudação interna**

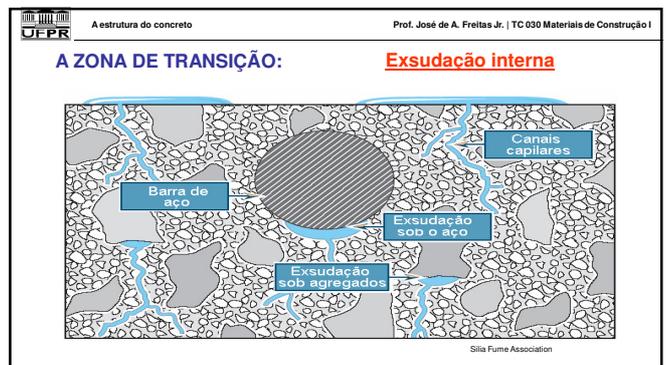
Exsudação interna é a não visível.
É a água que ao subir fica presa sob os agregados e vergalhões de aço.

Exsudação visível

Exsudação interna

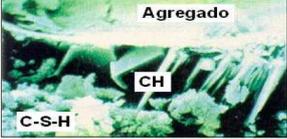
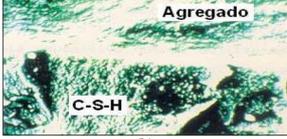
A exsudação interna prejudica a aderência da pasta de cimento aos agregados e vergalhões de aço.

(Mehra e Monteiro, 2006)



A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

A ZONA DE TRANSIÇÃO:

Concreto convencional	Concreto de alta resistência - CAR
 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>

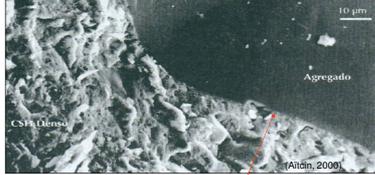
(a) Zona de transição pasta / agregado de um concreto convencional típico (b) Zona de transição pasta / agregado de um concreto de alta resistência, obtidas por microscopia eletrônica (DAL MOLIN, 1995)

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

CAD

MICROESTRUTURA



FASE AGREGADO
Rocha c/ alta resistência
Lamelaridade prejudica

FASE PASTA MATRIZ
Baixas relações Água/Aglomerante minimizam vazios
Sílica ativa, mais C-S-H e efeito microfíler

ZONA DE TRANSIÇÃO
Baixas relações A/A e a Sílica Ativa melhoram ZT

ZT "perfeita"

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Enquanto isso, na obra, no intervalo do almoço.....



Imagem: Filmes concreto / Filme exposto / Envolv na obra

A estrutura do concreto Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Materiais de Construção I

A ESTRUTURA DO CONCRETO

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- CONCRETO: Estrutura, Propriedades e Materiais, P. Kumar Mehta e Paulo J. M. Monteiro, São Paulo: Pini, 1994.
- CONCRETE, Microstructure, Properties and Materials, P. Kumar Mehta e Paulo J. M. Monteiro, McGraw-Hill, 2006
- Aulas Prof. José Marques Filho
- A microestrutura do concreto convencional – Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações – IBRACON, Capítulo 19, Vladimir A. Paulon.
- Considerações sobre a microestrutura do concreto, Luis Fernando Kaefer