



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
Escola Politécnica  
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais  
PPEC – Programa de Pós em Engenharia Civil

## ENG M39 - Durabilidade e Degradação das Estruturas de Concreto

**UNIDADE I** - Introdução, Conceitos de Durabilidade e Vida Útil, Efeitos do Ambiente e da Temperatura, Mecanismos de Transporte, Corrosão as Armaduras, Migração de Cloretos, Carbonatação

Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro  
verasribeiro@hotmail.com



1



## Introdução



2

### ● Calendário Oficial

- Curso: 51 horas (17 dias de aulas)
- Horário: Sex, 08h50 - 11h35;
- Faltas permitidas (25%): 12 (4 dias);
- 2 Avaliações;
- 2ª Chamada: Assunto integral.

3

### ● Avaliações

- Unidade I  
Prova (8,0)  
Trabalho (2,0)
- Unidade II  
Prova (8,0)  
Trabalho (2,0)

4

### ● Programa

- TÓPICO I: CONCEITOS DE DURABILIDADE E CICLO DE VIDA ÚTIL
- TÓPICO II: EFEITOS DA AÇÃO DO MEIO AMBIENTE E DA TEMPERATURA SOBRE AS ESTRUTURAS DE CONCRETO
- TÓPICO III: CAUSAS E MECANISMOS DA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO
- TÓPICO IV: CORROSÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO
- TÓPICO V: PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS:

5

### ● Bibliografia

Elsevier convida para o lançamento e sessão de autógrafos do livro Corrosão e degradação de estruturas de concreto armado no 60º Congresso Brasileiro do Concreto.

19 de setembro, de 10h às 10h30, no estande da IBRACON.




6


 **Introdução**

**INSCRIÇÕES ABERTAS !!!**




**www.baducon.com.br**

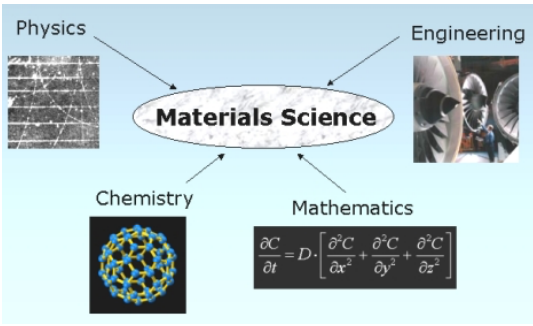
7

 **Objetivos**


- **Geral:**
- Transferir os conhecimentos sobre os processos que levam à degradação da estrutura de concreto, buscando seu entendimento e incremento da vida útil das edificações.

8

 **Introdução**



9

 **Introdução**

**Estrutura**


Atômica ? Interatômica ? Microestrutura ? Macroestrutura ?

**X**

Físicas ? Mecânicas ? Térmicas ? Elétricas ? Ópticas ? Magnéticas ?


**Propriedades**

10

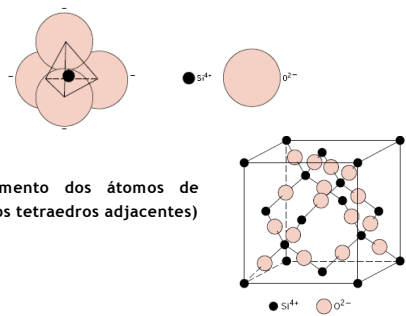
 **Introdução**

- **Propriedade:**
- Tipo e intensidade da resposta a um estímulo que é imposto ao material.
- **Classes de Propriedades:**
- Mecânicas;
- Elétricas;
- Térmicas;
- Magnéticas;
- Ópticas;
- Químicas;
- de Degradação (corrosão, oxidação, desgaste).

11

 **Silicatos**

- **Unidades silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>) ao invés de células unitárias**



- **Sílicas**  
(compartilhamento dos átomos de oxigênio pelos tetraedros adjacentes)

12



## Silicatos

- Diferentes tipos de estruturas dos silicatos.

13

## Silicatos

- Em camadas.

- Estrutura bidimensional formada pelo compartilhamento de 3 átomos de oxigênio em cada um dos tetraedros  $(Si_2O_5)^{2-}$ ;
- A eletroneutralidade é estabelecida normalmente por uma segunda estrutura laminar planar que possui excesso de cátions, a qual se liga ao O não-compartilhado (fora do plano)

Ex.: argilas e outros minerais.

14

## Sólidos Não-Cristalinos

- Também conhecidos como amorfos ou líquidos super-resfriados;
- Estruturas relativamente complexas.

● Silicon atom  
● Oxygen atom

Estrutura não-cristalina:  
Pequenas variações em comprimentos e ângulos de ligação que implicam em ausência de ordem a longo alcance

15

## Polimorfismo e Alotropia

- Polimorfismo: A habilidade de um material em existir em mais do que uma forma ou estrutura cristalina.
- Alotropia: Possibilidade de existência de duas ou mais estruturas cristalinas diferentes para uma substância (geralmente em sólido elementar).

- Fe: CCC (T ambiente) ou CFC (T= 912 °C)

16

## A Sílica (SiO<sub>2</sub>)

- Formas Cristalinas.
- Natural: β-quartzo, β1, β2, tridimita, cristobalita; coesita; stishovita; moganita, keatita;
- Sintética: Keatita, sílica W, porosils.
- “Formas” Amorfas
- Natural: Opala, sílica biogênica, terras diatomácias, fibras de sílica, sílica vitrea;
- Sintética: Sílica fundida, microsílica, pirogênica ou sílica evaporada, sílica precipitada, sílica coloidal, sílica gel.

17

## Fases Comuns do Cimento

- Alita -  $3CaO \cdot SiO_2 - C_3S$ .

18

## Fases Comuns do Cimento

- **Belita** -  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  -  $\text{C}_2\text{S}$ .

19

## Fases Comuns do Cimento

- $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot(\text{H}_2\text{O})_4$  - **C-S-H**.

20

## Fases Comuns do Cimento

- $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{C}_3\text{A}$ .

**CÚBICO**      **ORTORRÔMBICO (+ estável)**

21

## A microestrutura do cimento

22

## Ligantes Hidráulicos

- **Cimento Portland**

- Tipos \* RS

Sigla	Nome
CP I (25, 32 e 40)	Cimento Portland Comum
CP I-S (25, 32 e 40)	Cimento Portland Comum com Adição
CP II - E (25, 32 e 40)*	Cimento Portland Composto com Escória
CP II - Z (25, 32 e 40)	Cimento Portland Composto com Pozolana
CP II - F (25, 32 e 40)	Cimento Portland Composto com Filler
CP III (25, 32 e 40)	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV (25 e 32)	Cimento Portland Pozolânico
CP V - ARI (7d - 34)*	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP B (não estrutural)	Cimento Portland Branco

23

## Ligantes Hidráulicos

- **Cimento Portland**

- Tipos

Tipo de Cimento	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana ou filler (até 5%)	CP I-S 32 CP I-S 40	5732
	Escória (6-34%)	CP II-E 32 CP II-E 40	
Cimento Portland Composto	Pozolana (6-14%)	CP II-Z 32	11578
	Filler (6-10%)	CP II-F 32 CP II-F 40	
Cimento Portland de Alto-Forno	Escória (35-70%)	CP III 32	5735
		CP III 40	
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV 32	5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP III-40 RS, CP V-ARI RS		5737

24

## Hidratação do Cimento

• **Processo de Hidratação**

Compostos: C<sub>3</sub>S - silicato tricálcico; C<sub>2</sub>S - silicato dicálcico; C<sub>3</sub>A - aluminato tricálcico; C<sub>4</sub>AF - aluminoferrato tetracálcico; C-S-H - silicato de cálcio hidratado; AFt - tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado; AFm - mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado.

Dimensões: partícula de cimento - 1 a 90 µm; C<sub>2</sub>S - 25 a 65 µm; C<sub>3</sub>S - 20 a 40 µm; C<sub>3</sub>A - 1 a 60 µm.

25

## Hidratação do Cimento

• **Processo de Hidratação**

Até o estado endurecido  
Aglútuas se aglomeram mais  
Através da Hidratação

26

## Hidratação do Cimento

• **Processo de Hidratação**

- 1ª Etapa (Hidratação)

- Mecanismo de dissolução-precipitação dos compostos de Ca;
- Liberação de calor;
- Aluminatos (enrijecimento e pega) hidratam mais rapidamente que os silicatos (endurecimento → resistência);
- Obs: Adição da gipsita (desacelerar a taxa de hidratação do C<sub>3</sub>A).

- 2ª Etapa

- Mobilidade iônica restrita → Reações no estado sólido;
- Perda de Consistência e solidificação da pasta;
- Hidratação do C<sub>3</sub>A e do C<sub>4</sub>AF → instabilidade da etringita e conversão em monossulfato (fase final).

- 3ª Etapa

- Hidratação dos silicatos (resistência final).

27

## Hidratação do Cimento

• **Processo de Hidratação**

Minutos → ETRINGITA  
(Trissulfoaluminato ou Sulfoaluminato de cálcio hidratado)

Mecanismo topoquímico ou hidratação no estado sólido

$$2[AlO_2] + 3[SO_4]^{2-} + 6[Ca]^{2+} + aq. \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3(CaSO_4) \cdot 32H_2O$$

$$2[AlO_2] + [SO_4]^{2-} + 4[Ca]^{2+} + aq. \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (CaSO_4) \cdot 18H_2O$$

28

## Hidratação do Cimento

• **Processo de Hidratação**

Após algumas horas

1- Silicatos de cálcio hidratado  
 $CaO \cdot SiO_2 \cdot (H_2O)_x$  (ou C-S-H)

2- Portlandita  
(hidróxido de cálcio cristalino,  $Ca(OH)_2$ )

Preenchimento de vazios, densificação

29

## Hidratação do Cimento

• **Processo de Hidratação**

Após alguns dias

1. Aumenta a hidratação dos aluminatos C<sub>3</sub>A;
2. Etringita se torna instável;
3. Decomposição da etringita e formação do monossulfato.

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3(CaSO_4) \cdot 32H_2O + 3CaO \cdot Al_2O_3 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (CaSO_4) \cdot 18H_2O$$

30

## Hidratação do Cimento

- Processo de Hidratação

Após alguns meses

- 1) Hidratação dos silicatos;
- 2) Aumento da resistência.



"Gel de Tobermorita"

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$$

$$C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$

31

## Cimento Portland

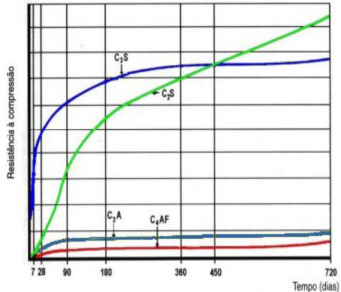
- Principais Fases Presentes

Nome	Composto	Abreviação	Variação
Silicato Tricálcico (Alita)	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$	40 - 70 %
Silicato Dicálcico (Belita)	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$	5 - 35 %
Aluminato Tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$	4 - 15 %
Ferro Aluminato Tetracálcico (Ferrita)	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$	5 - 15 %

32

## Cimento Portland

- Principais Fases Presentes



33

## Estrutura do concreto

- Macroscopicamente
- Duas fases (pasta e agregados graúdos), heterogeneamente distribuídas (podem ser vistas até 3);



34

## Estrutura do concreto

- Microscopicamente
- Microscopia ótica (até 200x): 3 ou 4 fases;



CONCRETO = PASTA + AGREGADOS + (zona de transição)<sub>35</sub>

35

## Estrutura do concreto

- Microscopicamente
- MEV ou MET (até 50.000x): diversas fases.



36

## Cimento Portland

- Aspecto Geral

37

## Cimento Portland

- Compostos Presentes

Cristais de etringita (centro) circundados pelo gel C-S-H
Placas de Portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>)

38

## Cimento Portland

- Compostos Presentes

Fase C-S-H cristalina observada após 180 dias

39

## Cimento Portland

- Principais Fases Presentes (DRX)

Cimento CP V - ARI

C - Calcita  
 B - Beta  
 A - Alita  
 F - Ferroaluminato tetra-cálcico  
 T - Aluminato tri-cálcico  
 W - Wollastonita  
 G - Gipsita  
 S - Bassanita

40

## Cimento Portland

- Principais Fases Presentes (DRX)

Cimento CP II - F -32

Mineral	Nome do composto	Fórmula	(%)
Calcita	Carbonato de cálcio	CaCO <sub>3</sub>	5,4
Alita	Silicato tri-cálcico	C <sub>3</sub> S	48
Beta	Silicato di-cálcico	C <sub>2</sub> S	9,6
Ferroaluminato tetra-cálcico	Ferroaluminato tetra-cálcico	C <sub>4</sub> AF	6,2
Aluminato tri-cálcico	Aluminato tri-cálcico	Ca <sub>3</sub> A	2,1
Wollastonita	Sulfato de cálcio	CaSO <sub>3</sub>	<1
Gipsita	Sulfato de cálcio	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	<1
Cal livre	Óxido de cálcio	CaO	<1
Bassanita	Hemidrato	CaSO <sub>4</sub> ·0,5H <sub>2</sub> O	<1
Amorfo	---	---	25%

41

## Estrutura do Concreto

- Fase Pasta (Sólidos + Vazios + Água)

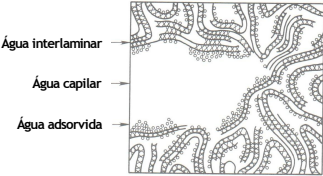
- Sólidos
- C-S-H : 50 - 60%;
- Ca(OH)<sub>2</sub> : 20 - 25%;
- C<sub>6</sub>A<sub>3</sub>H<sub>32</sub> (etringita) e C<sub>6</sub>A<sub>3</sub>H<sub>18</sub> (monossulfato): 15 - 20%;
- Grãos de clínquer não hidratados.
- Vazios
- Interlaminar ou Interpartícula (1nm);
- Capilares;
- Microporos (< 50 nm) - Retração por secagem e fluência;
- Macroporos (>50nm) - Resistência e à Impermeabilidade.

42



## Estrutura da Pasta Endurecida

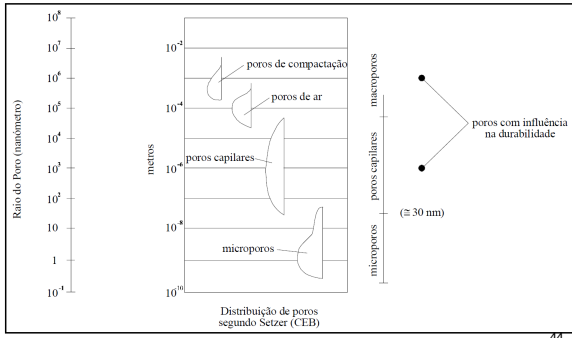
- Fase Pasta (Sólidos + Vazios + Água)
- Água
  - Capilar (livre, > 50 Å);
  - Adsorvida (atração - envolve os sólidos);
  - Interlaminar (estrutura C-S-H);
  - Quimicamente Combinada (produtos hidratados).



43

43

## Estrutura da Pasta Endurecida

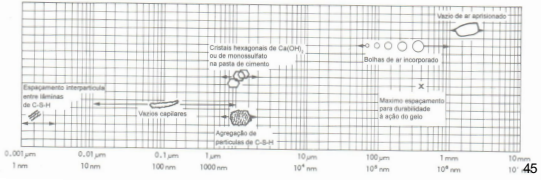


44

44

## Estrutura da Pasta Endurecida

- Fase Agregado
- Responsável pela massa específica, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto;
- Pode influir na resistência e durabilidade do concreto;
- Redutor de custos.

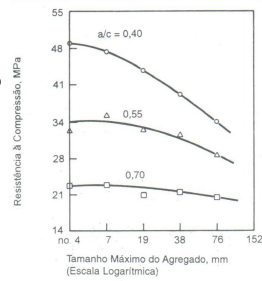


45

45

## Estrutura do Concreto

- Tamanho do agregado x resistência (a/c etc.) ????
- Agregado maior:
  - (+) Menor área superficial, menos zonas de transição.
  - (-) Maior exsudação, formação de filmes mais espessos.



46

46

## Estrutura do Concreto

- Fase (ou Zona) de Transição
- Zona entre as partículas de agregado e a pasta de cimento;
- Estrutura mais porosa, grande volume de vazios capilares e de cristais orientados de hidróxido de cálcio e presença de microfissuras;
- Elo mais fraco da corrente (Resistência Limite no Concreto);
- Influência sobre a permeabilidade e durabilidade;
- Influência sobre a rigidez ou o módulo de elasticidade do concreto.

47

47

## Estrutura do Concreto

- Fase (ou Zona) de Transição - FORMAÇÃO
- Após a moldagem, há a formação de um filme de água ao redor das partículas dos agregados;
- Formação das fases hidratadas;
- Maior a/c nos produtos de reação próximos ao agregado;
- Cristais grandes de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formam-se em camadas orientadas (Forças de Van der Waals);
- C-S-H pouco cristalizado e uma segunda geração de cristais de etringita preenchem os vazios.
- Formação do elo mais fraco, com baixa resistência à flexão (fase de resistência limite no concreto).

48

48

## Estrutura do Concreto

- Fase (ou Zona) de Transição

Diagram illustrating the structure of concrete, showing the transition zone (Zona de Transição) between the aggregate (Agregado) and the matrix (Matriz de pasta de cimento). The diagram includes labels for C-S-H, CH, and C-A-S-H (Etringita).

49

## Estado Endurecido

- Permeabilidade - Mecanismos de Transporte

- Permeabilidade;
- Absorção Capilar;
- Difusão;
- Migração Iônica.

Diagram illustrating the pore structure of concrete and the mechanisms of transport. The diagram shows the pore structure with labels for DCP, ICP, and CCP. The transport mechanisms are categorized by pore size (Dimensão dos Poros) on a logarithmic scale from  $10^9$  to  $10^{-2}$  μm:

- Permeabilidade
- Difusão Gasosa
- Difusão e Migração Iônica
- Capilaridade

49

## Porosidade

- Critérios de avaliação da permeabilidade do concreto à água (CEB 192)

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade do concreto	Qualidade do concreto
$< 10^{-12}$	Baixa	Boa
$10^{-12}$ a $10^{-10}$	Média	Média
$> 10^{-10}$	Alta	Pobre

(CEB 192 apud SILVA)

51

## Porosidade

- Distribuição de Tamanho de Poros

Graph showing the distribution of pore size (Diâmetro (μm)) versus Log Invasão Diferencial (mL/g) for concrete grades 0%, 10%, 20%, and 30%. The x-axis ranges from 0,01 to 10 μm, and the y-axis ranges from 0,00 to 0,09 mL/g.

52

## Conceitos de Durabilidade e Ciclo de Vida Útil

53

## Introdução

54



## Tragédia. Marquise desaba e mata nove

**Perícia deverá apontar causa deste acidente**

Após o acidente, a perícia deverá apontar a causa deste acidente. O acidente ocorreu em Porto Alegre, Brasil, em 1989. A marquise desabou, matando nove pessoas.

**Colapso de marquise em Porto Alegre, Brasil, 1989.**

55

## Introdução

Advanced corrosion process in the column of the bridge in Norway

56

## Porteiro morre em desabamento

TRÊS FICARAM FERIDOS E OUTROS TRÊS ESTAVAM SOTERRADOS ATÉ A NOITE DE ONTEM. DEFESA CIVIL INDICOU QUE EDIFÍCIO NÃO OFERECIA RISCOS

**Colapso de edifício em Recife, Brasil, 2004, devido à RAA nos blocos de fundação**

57

## Introdução

RAA

58

## Ponte cai e interrompe tráfego na BR-101

O acidente matou um caminhoneiro gaúcho e enviou outros quatro veículos, dois deles do Rio Grande do Sul

**Colapso de ponte em Santa Catarina, Brasil, 2001**

59

## Colapso de edifício de 22 pavimentos, devido à má qualidade dos materiais, Rio e Janeiro, Brasil.

60



## Introdução

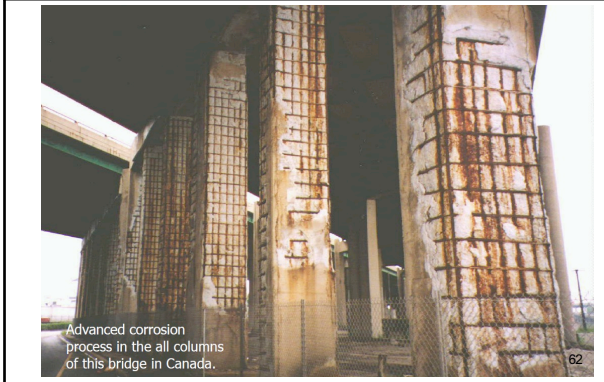


Pear harbor structures in Canada presenting several corrosion problems.

61



## Introdução



Advanced corrosion process in the all columns of this bridge in Canada.

62

62



## Concreto Armado

- **Concreto Armado: Concreto + Armadura**
- Material mais manufaturado no mundo;
- Resistência à tração e flexão + elevada resistência à compressão axial;
- Compatibilidade (dilatação, adesão, química, etc.)
- Boa Execução = Proteção
- Anti-oxidantes Fosfatizantes ⇒ ~~Custo~~

63

63



## Concreto Armado

- **Concreto Armado: Concreto + Armadura**
- Material mais manufaturado no mundo;
- Resistência à tração e flexão + elevada resistência à compressão axial;
- Compatibilidade (dilatação, adesão, química, etc.)
- Boa Execução = Proteção
- Anti-oxidantes Fosfatizantes ⇒ ~~Custo~~

64

64



## Requisitos de Qualidade

- **Capacidade resistente**
- Segurança a ruptura.
- **Desempenho em serviço**
- Fissuração excessiva, deformações inconvenientes e vibrações indesejáveis.
- **Durabilidade**
- Necessidade de reparos de alto custo, ao longo de sua vida útil.

65

65



## Requisitos de Qualidade

- **Condições impostas ao projeto**
- Condições arquitetônicas
- Estética, dimensões de pilares, vãos;
- Condições funcionais
- Finalidades e uso previsto para a estrutura - rigidez, deformabilidade das peças, estanqueidade, isolamento térmico e acústico, juntas de movimento;
- Condições construtivas
- Compatibilização do projeto com os métodos e processos construtivos;

66

66



## Durabilidade

*“capacidade da estrutura em oferecer o desempenho requerido durante um período de vida útil desejado, de acordo com a influência dos fatores de degradação”*

Código FIP-CEB (Comité Euro-international du Béton)

*“capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração”*

Comité 201 do American Concrete Institute (ACI) **TEMPO????**

*“capacidade de um edifício, componente ou estrutura manter um desempenho mínimo em um determinado tempo, sob a influência de agentes agressivos”*

Sarja & Vesikari (1996)

67

67



## Vida Útil

*“A vida útil de uma estrutura é definida pelo código FIP-CEB como o tempo que a estrutura mantém um limite mínimo de comportamento em serviço, para o qual foi projetada, sem elevados custos de manutenção e reparo”*

Código FIP-CEB (Comité Euro-international du Béton)

*“Período de tempo durante o qual a estrutura mantém as características, sem exigir em relação às prescrições de manutenção previstas, medidas extras de manutenção e reparo”*

NBR 6118 (vida útil de 50 anos)

Produtos de corrosão da armadura;  
Desagregação do concreto;  
Fissuras, etc.

68

68

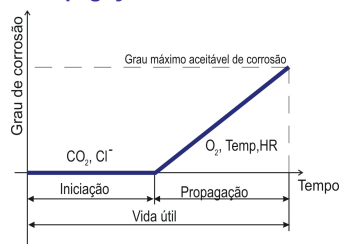


## Vida Útil

### • Modelo Simplificado - TUUTTI

- Período de Iniciação;

- Período de Propagação.



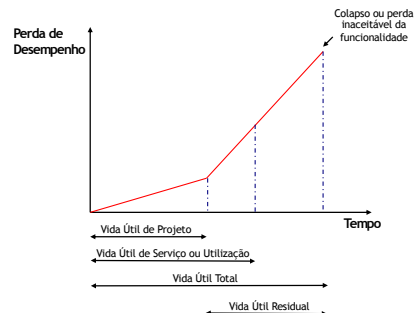
69

69



## Vida Útil

### • Modelo proposto por (HELENE, 1993)



70

70



## Vida Útil

(Fonte: Anexo C, Tabela C.5, pág 54 da NBR 15575-1)

Sistema	VUP anos		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30

\* Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.

71

71



## Vida Útil

### • Norma inglesa

BS 7543 (2015) - Guide to Durability of Buildings and Buildings Elements, Products and Components

Tipo de Estrutura	Vida Útil Nominal
Temporárias	≥ 10 anos
Substituíveis	≥ 10 anos
Edifícios Industriais e reformas	≥ 30 anos
Edifícios Novos e reformas de prédios públicos	≥ 60 anos
Obras de Arte e Edifícios Públicos Novos	≥ 120 anos

72

72





## Vida Útil

### • Norma Europeia

EM 2016-1 (2007) - Concreto: Especificação, desempenho, produção e conformidade

Tipo de Estrutura	Vida Útil Nominal
Temporárias	≥ 10 anos
Partes Substituíveis (ex. apoios)	10 a 25 anos
Estruturas para Agricultura e semelhantes	15 a 30 anos
Edifícios e outras estruturas comuns	≥ 50 anos
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de grande porte	≥ 100 anos

73

73



## Vida Útil

Proposta de tabela de dimensionamento estrutural à durabilidade para uma VUP de 50, 63 e 75 anos.

VIDA ÚTIL	50 Anos				63 Anos				75 Anos			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
CAA	Cobrimento (mm) / Classe concreto				Cobrimento (mm) / Classe concreto				Cobrimento (mm) / Classe concreto			
ELEMENTO	Relação ac / Consumo cimento (kg/m³)				Relação ac / Consumo cimento (kg/m³)				Relação ac / Consumo cimento (kg/m³)			
Laje	20/C20	25/C25	35/C30	45/C40	25/C25	35/C35	45/C40	55/C50	30/C30	40/C40	50/C40	65/C50
Viga/pilar	25/C20	30/C25	40/C30	50/C40	30/C25	40/C35	50/C40	60/C50	35/C30	45/C40	55/C40	70/C50
Elementos em contato com sala	30/C20	30/C25	40/C30	50/C40	30/C25	40/C35	50/C40	60/C50	40/C30	45/C40	55/C40	70/C50

BOLINA E TUTIKIAN, 2014

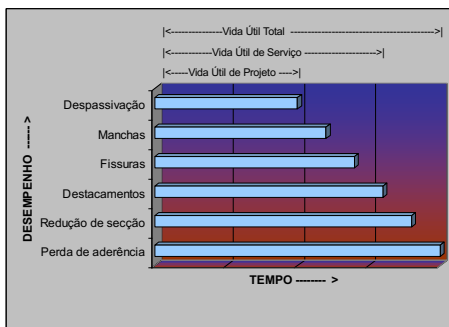
74

74



## Vida Útil – NBR 6118

### • Vida Útil de projeto



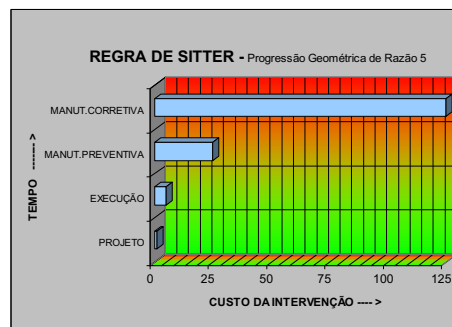
75

75



## Vida Útil

### • Custo de Intervenção



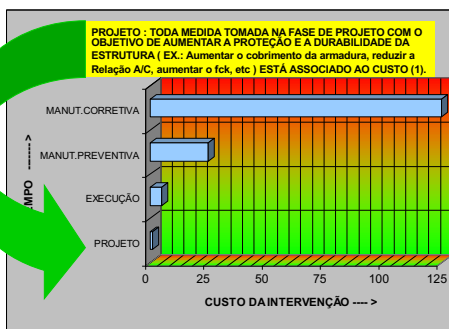
76

76



## Vida Útil

### • Custo de Intervenção



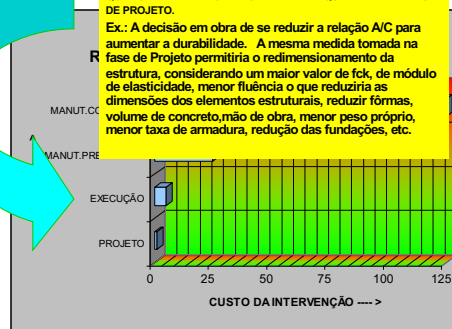
77

77



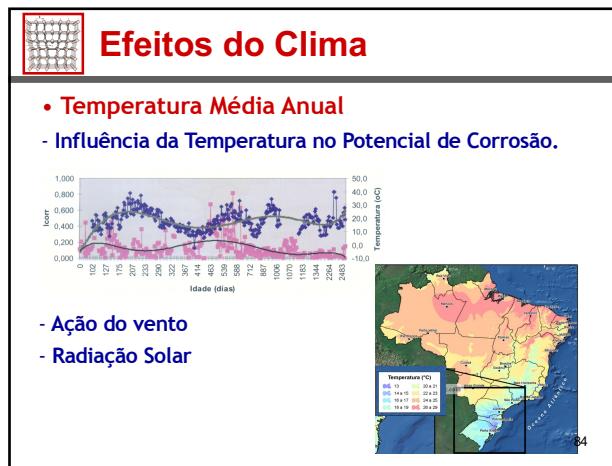
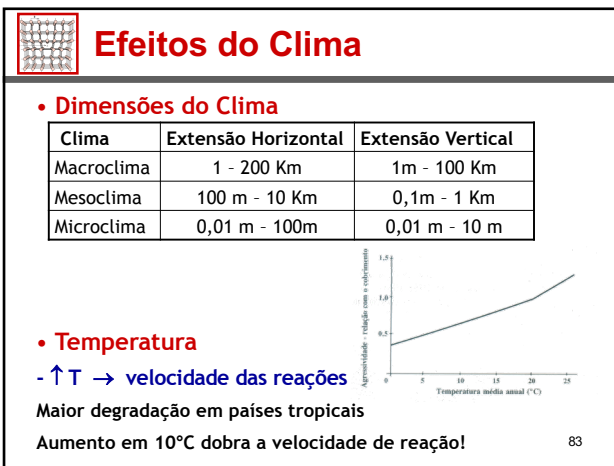
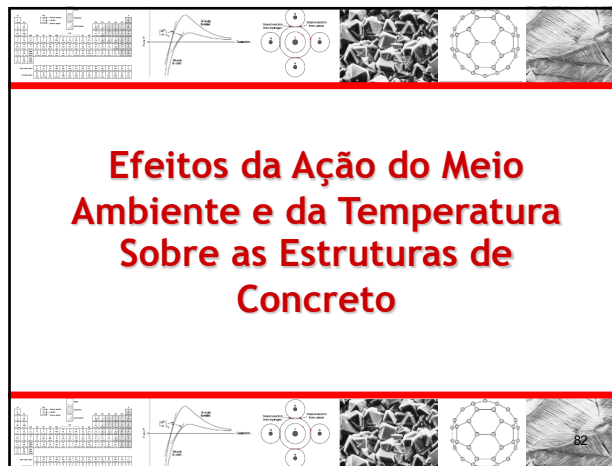
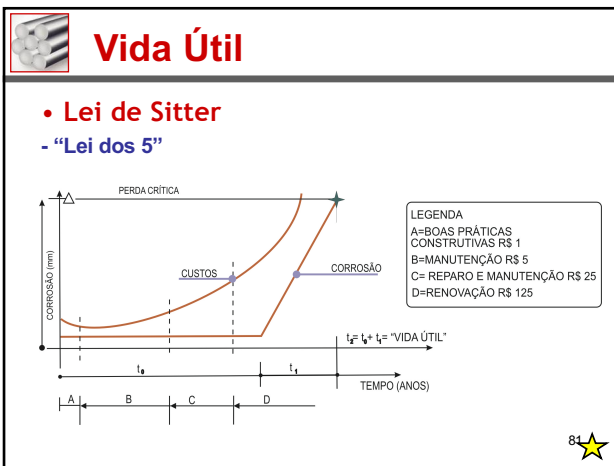
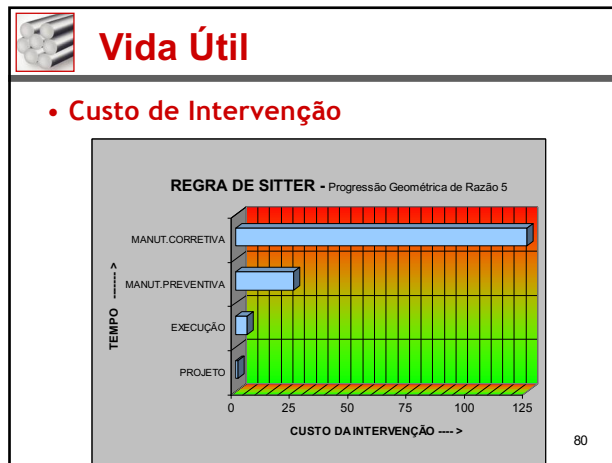
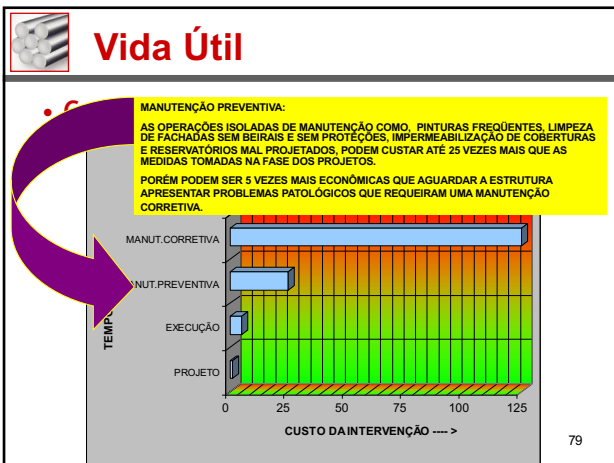
## Vida Útil

### • Custo de Intervenção



78

78



## Efeitos do Clima

- Chuvas e Umidade Relativa
- ↑ chuva → água disponível para reações
- Umidade x Taxa de Corrosão

85

## Efeitos do Clima

- Chuva Ácida
- Poluição
- pH: 2,2 - 4,5
- Efeitos
- Dissolução da matriz
- Redução de pH do meio
- Poluentes
- CO<sub>2</sub> → carbonatação
- H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

86

## Efeitos do Clima

- Ambientes
- Urbano (CO<sub>2</sub>)
- Rural
- Marinho
- Outros Ambientes
- Industrial
- Rede de Esgoto

87

## Agressividade Ambiental

- Classes (NBR 6118)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1),2)</sup>	Pequeno
		Marinha <sup>1)</sup>	
III	Forte	Industrial <sup>1),2)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1),3)</sup>	
IV	Muito forte	Respingo de maré	Elevado

Classe de Agressividade	pH	CO <sub>2</sub> mg/litro	Amônia NH <sub>4</sub> mg/litro	Magnésia Mg <sub>2</sub> mg/litro	Sulfato SO <sub>4</sub> mg/l
I	> 5,9	< 20	< 100	< 150	< 400
II	5,9 - 5,0	20 - 30	100 - 150	150 - 250	400 - 700
III	5,0 - 4,5	30 - 100	150 - 250	250 - 500	700 - 1500
IV	< 4,5	> 100	> 250	> 500	> 1500

88

## Agressividade Ambiental

- Classes (NBR 6118)

Macro-clima	Micro-clima			
	Ambientes internos		Ambientes externos e obras em geral	
	Seno <sup>1)</sup> UR ≤ 65%	Fora do risco <sup>2)</sup> de molhagem e secagem UR ≤ 65%	Seno <sup>1)</sup> UR ≤ 65%	Fora do risco <sup>2)</sup> de molhagem e secagem UR ≤ 65%
Rural	I	I	I	II
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	----	III
Industrial	II	III	II	III
Especial <sup>3)</sup>	II	III ou IV	III	III ou IV
Respingo de maré	----	----	----	IV
Submersa ≥ 3m	----	----	----	I
Solo	----	----	não agressivo I	úmido e agressivo II, III ou IV

89

## Agressividade Ambiental

Fábrica de couros - RS

90

## Agressividade Ambiental

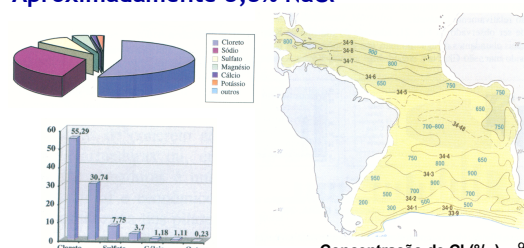


**Piso corroído por Ácido Sulfúrico: pH < 4 e temperatura 40 °C**  
**Idade do concreto: 1 ano**

91

## Ambiente Marinho

- **Composição da água do mar**
  - **Cl, Na, S, Mg, Ca, K.**
  - **Aproximadamente 3,3% NaCl**



**Concentração de Cl (g/l) 92**

92

## Ambiente Marinho

- **Zonas de Agressividade**



93

93

## Ambiente Marinho

- **Zonas de Agressividade**
  - **Zona Atmosférica.**
  - Transporte de sais (névoa) pelo vento
  - Concentração: f(distância do mar + velocidade dos ventos)
  - Mecanismo: ação de cloretos

Faixa de Agressividade		Distâncias Aproximadas (m)
Agressividade	Vida Útil (anos)	
Elevada	3 (cob. 10mm) a 17 (cob. 20mm)	Até 130
Moderada	24 (cob. 10mm) a 50 (cob. 20mm)	130 - 700
Mínima	24 (cob. 10mm) a 50 (cob. 20mm)	Acima de 700

94

94

## Ambiente Marinho

- **Zonas de Agressividade**
  - **Zona de Respingos**
  - Ação direta do mar (ondas e respingos)
  - Mecanismo: ação de cloretos + erosão (ondas)
  - **Zona de Variação de Marés**
  - Concreto encontra-se sempre saturado
  - Concentração crescente de sais
  - Mecanismo: Ataque Químico (sais agressivos) + erosão (ondas) + microorganismos

95

95

## Ambiente Marinho

- **Zonas de Agressividade**
  - **Zona Submersa**
  - Corrosão eletroquímica menos acentuada (ausência de oxigênio e condição sempre supersaturada);
  - Ação de sais expansivos (sulfato e magnésio);
  - Ação de microorganismos e vegetação marinha.

96

96



## Ambiente Marinho

- **Zonas de Agressividade x Durabilidade**
- Carbonatação
- Significativa: Zona Atmosférica (Névoa)
- **Penetração de Cloretos**
- Significativa: Zonas de Respingos e de Variações de Marés
- **Ataque por Sulfatos**
- Significativa: Zonas de Respingos e de Variações de Marés (reduz com o aumento da cota)

97

97

## Outros Ambientes

- **Esgoto**
- **Degradação por Ação do Enxofre**
- Ataque da matriz hidratada de cimento, quanto as armaduras;
- Formação do Sulfato de Cálcio (reação expansiva);
- Formação de ácido sulfúrico (processo cíclico).
- **Ação de Bactérias**
- Despolarização catódica

98

98

## Outros Ambientes

- **Meio Industrial**
- **Microclimas Específicos**
- Pode ter concentração de cloretos até superior ao meio marinho (indústrias de papel e celulose);
- Elevada concentração de sulfatos, CO, CO<sub>2</sub>;
- Chuvas Ácidas;
- Mecanismos: carbonatação e acidificação da superfície do concreto.

99

99

## Causas e Mecanismos da Deterioração do Concreto Armado

100

100

## Deterioração do Concreto

- **Fatores**
- **Mecânicos**
- Vibração e erosão
- **Físicos**
- Variações de temperatura
- **Biológicos**
- Bactérias
- **Químicos**
- Produtos químicos como ácidos e sais.

101

101

## Deterioração do Concreto

- **Fatores**
- **Físicos**

Causas Físicas da Deterioração do Concreto

Desgaste da Superfície

Fissuração

Abrasão

Erosão

Cavitação

Mudanças de Volume devidas a:

1. Gradientes normais de temperatura e umidade
2. Pressão de cristalização de sais nos poros

Carga Estrutural:

1. Sobre carga e impacto
2. Carga Cíclica

Exposição a Extremos de Temperatura:

1. Ação do gelo-degelo
2. Fogo

102

102

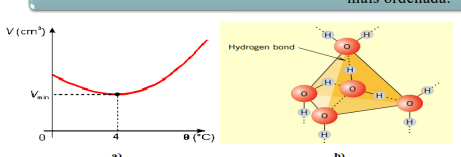
**Deterioração do Concreto (NBR 6118)**

• **Gelo-degelo** (Nilson Amorim, 2015)

A Água apresenta um fenômeno inverso ao natural e esperado quando está prestes a congelar.

Na faixa de 4 °C à 0 °C, ocorre uma expansão de cerca de 9% de seu volume.

Esta particularidade ocorre devido à formação do retículo cristalino do gelo, onde as moléculas assumem uma forma mais ordenada.



The graph shows volume  $V$  (cm<sup>3</sup>) on the y-axis and temperature  $\theta$  (°C) on the x-axis. The curve shows a minimum at 4°C, where the volume is  $V_{min}$ . To the right, a diagram labeled 'Hydrogen bond' shows water molecules forming a crystalline network.

103

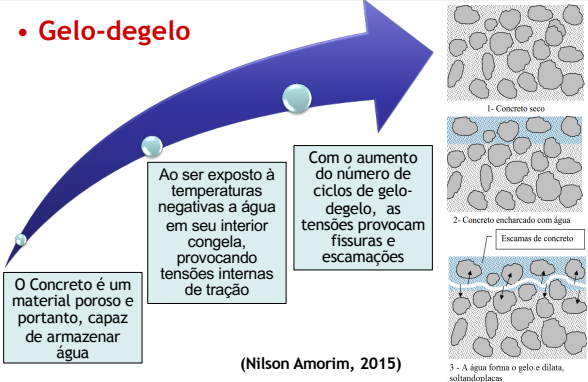
**Deterioração do Concreto (NBR 6118)**

• **Gelo-degelo**

O Concreto é um material poroso e portanto, capaz de armazenar água

Ao ser exposto à temperaturas negativas a água em seu interior congela, provocando tensões internas de tração

Com o aumento do número de ciclos de gelo-degelo, as tensões provocam fissuras e escamações



The diagram shows three stages of concrete deterioration: 1- Concrete seco (dry concrete), 2- Concrete encharcado com água (concrete saturated with water), and 3- A água forma o gelo e dilata, soltando placas (water forms ice and expands, loosening plates). A large blue arrow points from stage 1 to stage 3.


(Nilson Amorim, 2015)

104

**Deterioração do Concreto (NBR 6118)**

• **Gelo-degelo - Pressão hidráulica**

A água ao congelar, aumenta de volume, e obriga a movimentação da quantidade excedente para as capilaridades ou cavidades mais próximas. Este movimento migratório é como uma bomba e causa uma pressão nas paredes dos capilares.



The diagram shows three interlocking gears labeled 'Taxa de congelamento' (freezing rate), 'Distância percorrida pela água' (distance traveled by water), and 'Permeabilidade do material' (material permeability).

(Nilson Amorim, 2015)

105

**Deterioração do Concreto (NBR 6118)**

• **Gelo-degelo - Pressão osmótica**

A água nos capilares está sob forma de soluções e contém substâncias como álcalis, cloretos e hidróxido de cálcio.

Congelamento => Concentração de íons => gradientes de concentrações.

Na busca por alcançar o equilíbrio, ocorre a pressão osmótica;

(Nilson Amorim, 2015)

106

**Deterioração do Concreto (NBR 6118)**

• **Gelo-degelo - Efeito capilar**

A água presa pelo poro gel não pode rearranjar-se para formar gelo no ponto de congelamento normal da água.

Logo, ela continua a existir na fase líquida, porém, em um estado super-resfriado, criando um desequilíbrio termodinâmico.

A diferença de entropia entre o gelo e a água super-resfriada força esta última a migrar aos locais de energia mais baixa (grandes cavidades), onde ela possa congelar.

(Nilson Amorim, 2015)

107

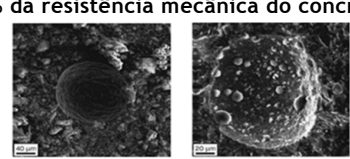
**Deterioração do Concreto (NBR 6118)**

• **Gelo-degelo** (Nilson Amorim, 2015)

- **Alternativa: Incorporação de ar**

Os poros cheios de ar podem recolher água jogada para fora dos capilares por causa da formação do gelo e portanto, reduzem a pressão hidráulica.

Porém, a cada 1% de ar incorporado, reduz-se em média 5% da resistência mecânica do concreto.



Two micrographs showing the effect of air incorporation in concrete, showing air bubbles within the matrix.

108



## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

### • Gelo-degelo

(Nilson Amorim, 2015)

#### - Alternativa: Incorporação de ar

Os poros cheios de ar podem recolher água jogada para fora dos capilares por causa da formação do gelo e portanto, reduzem a pressão hidráulica.

Porém, a cada 1% de ar incorporado, reduz-se em média 5% da resistência mecânica do concreto.

109

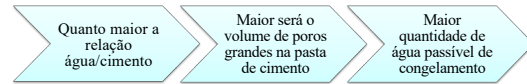


## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

### • Gelo-degelo

(Nilson Amorim, 2015)

#### - Relação água/cimento e cura



A ACI 318-14 exige que concretos sujeitos a congelamento e sob umidade devam ter uma relação água/cimento máxima de 0,45.

Além disso, uma cura prolongada, antes de ser submetido à ação do gelo, é benéfica, pois melhora a resistência mecânica do concreto.

110



## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

### • Gelo-degelo

(Nilson Amorim, 2015)

#### Fator de durabilidade - ASTM C666

$$F_D = \frac{E_d \times N}{M}$$

Onde:

- $F_d$  = fator de durabilidade, em %
- $E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico relativo para N ciclos
  - N = número de ciclos
- M = número total de ciclos de gelo/degelo propostos de gelo/degelo, no caso, 300.

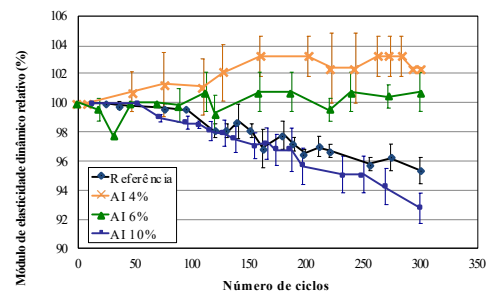
111



## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

### • Gelo-degelo

(Nilson Amorim, 2015)



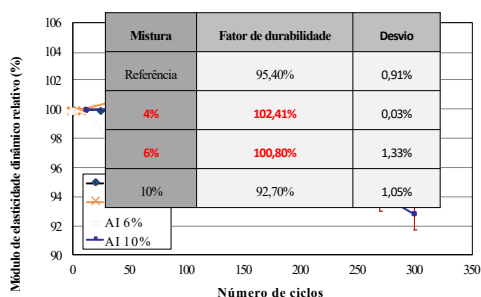
112



## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

### • Gelo-degelo

(Nilson Amorim, 2015)



113



## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

### • Gelo-degelo

(Nilson Amorim, 2015)

- A incorporação de 6% de ar se mostrou eficiente em relação às tensões de expansão da água, apresentando maior fator de durabilidade, não sofrendo perda de rigidez ou desgaste físico.
- A incorporação de ar é benéfica à durabilidade do concreto submetido ao gelo-degelo até certo limite, visto que a incorporação de 10% apresentou menor resistência aos ciclos frios.
- A baixa relação água/cimento assegurou um comportamento satisfatório ( $F_d > 80\%$ ) para todos os concretos ensaiados, segundo a norma ASTM C 666.

114

## Deterioração do Concreto

- Fatores
  - Químicos
    - Deterioração do Concreto por Reações Químicas
      - Reações de troca entre um fluido agressivo e componentes da pasta de cimento endurecida
        - Remoção de ions  $Ca^{2+}$  como produtos solúveis
        - Remoção de ions  $Ca^{2+}$  como produtos insolúveis não expansivos
        - Reações de substituição do  $Ca^{2+}$  no C-S-H
      - Reações envolvendo hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta de cimento endurecida
        - Aumento na porosidade e permeabilidade
      - Reações envolvendo formação de produtos expansivos
        - Aumento nas tensões internas

Perda de Alcalinidade, Perda de massa, Aumento do Processo de deterioração, Perda de resistência e rigidez, Fisuração, lançamento e pipocamento, Deformação

115

## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

- Lixiviação
  - Ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas, que dissolvem e carreiam os compostos hidratados da pasta de cimento.

116

## Deterioração do Concreto (NBR 6118)

- Lixiviação
  - Ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas, que dissolvem e carreiam os compostos hidratados da pasta de cimento.
- Expansão da pasta de cimento
  - Ação de águas e solos contaminados com sulfatos.
- Expansão de agregados reativos
  - Álcalis do cimento e transformações de produtos ferruginosos presentes na constituição mineralógica

117

## Deterioração do Concreto

< -- Reação Álcali-silica : Fonte Catálogo Lifetime Admixture

Lixiviação do  $Ca(OH)_2$

118

## Degradação

119

## Degradação

120



## Degradação



121

121



## Bioterioração

### • Bioreceptividade

- Capacidade de ser colonizado por organismos vivos (rugosidade, porosidade, umidade e composição);

### • Tipos

- Bioterioração Física ou Mecânica;
- Bioterioração Estética;
- Bioterioração Química Assimilatória;
- Bioterioração Química não Assimilatória.

122

122



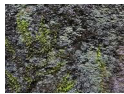
## Bioterioração

### • Bioterioração Física ou Mecânica

- Rompimento do material devido à pressão exercida (locomoção ou crescimento);

### • Bioterioração Estética

- Mudança de coloração, colônias e manchas escuras



### • Bioterioração Química

- Assimilatória: reação com mudança da microestrutura  
 - Não Assimilatória: Formação de constituintes sobre a superfície.

123

123



## Trabalho 1

### • Valor: 2,0 pontos

- 2 Equipes:

1) Causas Físicas da Deterioração

2) Causas Químicas da Deterioração

Parte escrita: 1,0 ponto

Apresentação Oral: 1,0 ponto



124



## Mecanismos de Transporte

- Permeabilidade
- Absorção Capilar
- Difusão
- Migração Iônica
- Convecção (raro)

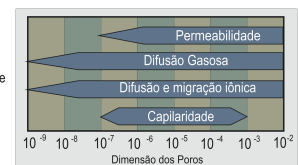
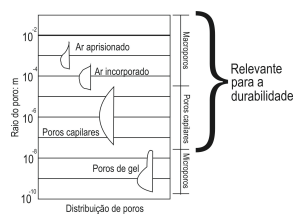
125

125



## Mecanismos de Transporte

### • Mecanismos ↔ Porosidade



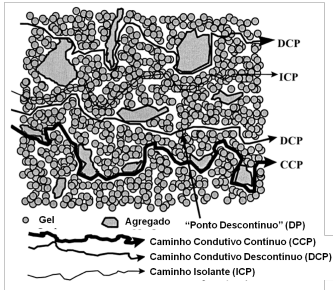
126

126



## Mecanismos de Transporte

### • Mecanismos ↔ Porosidade



127

127



## Mecanismos de Transporte

### • Permeabilidade

- Fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão, sendo caracterizada pela facilidade com que um fluido atravessa um sólido poroso sob uma diferença de pressão;
- Permeabilidade do concreto ⇒ Permeabilidade da pasta (a/c, hidratação);
- Permeabilidade gasosa desprezível (O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>).

Lei de Darcy

$$V_f = \frac{K_p \Delta H}{L}$$

H = pressão manométrica

128

128



## Mecanismos de Transporte

### • Permeabilidade

- Critérios de avaliação da permeabilidade do concreto à água (CEB 192)

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade do concreto	Qualidade do concreto
< 10 <sup>-12</sup>	Baixa	Boa
10 <sup>-12</sup> a 10 <sup>-10</sup>	Média	Média
> 10 <sup>-10</sup>	Alta	Pobre

129

129

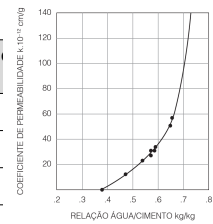


## Mecanismos de Transporte

### • Permeabilidade

- Critérios de avaliação da permeabilidade do concreto à água (CEB 192)

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade do concreto
< 10 <sup>-12</sup>	Baixa
10 <sup>-12</sup> a 10 <sup>-10</sup>	Média
> 10 <sup>-10</sup>	Alta



130

130



## Mecanismos de Transporte

### • Absorção Capilar

- Fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade ou transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto;
- ↓Φ capilares, ↑ pressões capilares, ↑ absorção;
- a/c (??);
- Absortividade (S, Coeficiente de Absorção Capilar);
- Grau de Saturação.

Lei de Young

$$\gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos\theta - \gamma_{sg} = 0$$

$$i = A + S.t^{0.5}$$

$$h_c = \frac{2\sigma_s \cdot \cos\theta}{\gamma_w \cdot r}$$

131

131



## Mecanismos de Transporte

### • Difusão

- Processo de transporte de substâncias de um meio para outro devido a uma diferença de concentração (processo espontâneo);
- Meios líquidos (Cl<sup>-</sup>) e gasosos (CO<sub>2</sub>);
- Mecanismo predominante;
- f(concentração superficial, temperatura, microestrutura, interações com o cimento e produtos de hidratação);

132

132

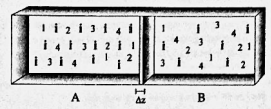


## Mecanismos de Transporte

- Difusão**
- Termodinâmica clássica
 

Energia interna (S)  
 Entropia (U)  
 Potencial Químico ( $\mu$ )

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i \therefore dS = \frac{1}{T} \left[ dU + PdV - \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i \right]$$
- Sistema Isolado
 

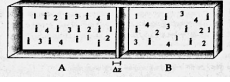
$$dS = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (\mu_i^A - \mu_i^B)$$


133

133

## Mecanismos de Transporte

- Difusão**
- Termodinâmica clássica
 



$$dS = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (\mu_i^A - \mu_i^B)$$

$$\vec{N}_i = \vec{J}_i^D + \vec{J}_i^C = C_i(\vec{v}_i - \vec{V}_i) + C_i \vec{V}_i \therefore \vec{N}_i = C_i \vec{v}_i$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [C_i \vec{v}] = \vec{\nabla}^2 \cdot [D_{i,M} C_i] + R_i'''$$

$$\vec{v} = \frac{\sum \rho_i \vec{v}_i}{\sum \rho_i} = \frac{\sum \rho_i \vec{v}_i}{\rho}$$

$$\vec{V} = \frac{\sum C_i \vec{v}_i}{\sum C_i} = \frac{\sum C_i \vec{v}_i}{C}$$

Velocidades molar e mássica

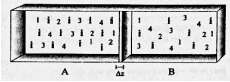
**Difusão**

134

134

## Mecanismos de Transporte

- Difusão**
- Termodinâmica clássica
 



$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [C_i \vec{v}] = \vec{\nabla}^2 \cdot [D_{i,M} C_i] + R_i'''$$

**Difusão**

  - Regime estacionário, temperatura e pressão constantes
  - Regime estacionário, velocidade do meio nula, temperatura e pressão constantes
  - Regime transiente (não estacionário), temperatura e pressão constantes
  - Regime transiente (não estacionário), velocidade do meio nula, temperatura e pressão constantes.

135

135

## Mecanismos de Transporte

- Difusão**
- 1ª. Lei de Fick
  - Regime estacionário, temperatura e pressão constantes
 

$$J = -D_s \frac{dC}{dx}$$
- 2ª. Lei de Fick;
  - Regime transiente (não estacionário), temperatura e pressão constantes
 

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D_{ns} \left( \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} \right)$$

$$C(x,t) = C_s \left( 1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right)$$

136

136

## Mecanismos de Transporte

- Difusão**
- Estágio não estacionário (tempo e profundidade);  
Transporte dos íons através do concreto ocorre de forma combinada com a sua fixação às fases do cimento.
- Estágio estacionário (fluxo constante);  
Fixação não ocorre mais e o fluxo dos íons cloreto (uma taxa constante)
- Coeficientes de Difusão: f(porosidade, a/c, teor e composição química do cimento, umidade relativa, temperatura).

137

137

## Mecanismos de Transporte

- Migração Iônica**
- Processo de transporte que ocorre quando existe um potencial elétrico que possibilita o deslocamento dos íons presentes para que se neutralize o efeito da diferença de potencial;
- Equação de Nernst-Planck (fluxo unidirecional)
 
$$J_{i,z} = -D_{\text{eff}} \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D_{\text{eff}} C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i \vec{V}_z$$

(limitação das Leis de Fick)

138

138





## Mecanismos de Transporte

### • Migração iônica

- Equação de Nernst-Planck (fluxo unidirecional)

$$J_{i,z} = -D_{\text{eff}} \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D_{\text{eff}} C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i \bar{V}_z$$

- Andrade (1993)

$$-J_i(x) = D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i V(x)$$

Fluxo = ~~difusão pura~~ + migração elétrica + ~~convecção~~

139

139



## Degradação na Estrutura de Concreto Armado



140



## Corrosão

### • Definição

- Ataque destrutivo e não intencional de um metal;  
- Deterioração e/ou perda de propriedades do material devido a ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliado ou não a esforços mecânicos.

### • Começa normalmente pela superfície;

### • Significativas perdas econômicas.

- ¼ do aço produzido mundialmente;  
- 3 - 5% do PIB de uma nação industrializada.

141

141



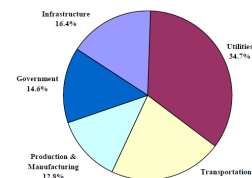
## Corrosão

### • Significativas perdas econômicas.

- NACE International (USA, 2013):

Custos Diretos : U\$D 276 bilhões (3,14 % do PIB)

Custos Indiretos : U\$D 552 bilhões (6,0 % do PIB)



142

<http://www.nace.org/home.aspx>

142

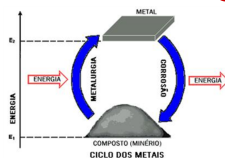


## Corrosão

### • Os compostos tendem a buscar o estado de menor energia.

- Para METAIS: o estado de menor energia → óxidos metálicos (ou sulfetos ou carbonatos);  
- Exceções: Ouro (Au) e Platina (Pt).

### • Corrosão: inverso da metalurgia extrativa;



143

143



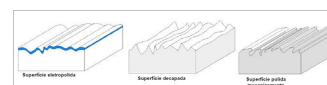
## Corrosão

### • Benefícios da corrosão.

- Baterias de pilhas secas: geração de energia elétrica pela ação do processo de corrosão;  
- Eletro-polimento.

Obtenção de superfícies lisas e polidas.

E no processo de preparação de amostras para a microscopia eletrônica de transmissão.



144

144

## Corrosão

- **Meios Corrosivos:**
  - **Atmosfera:** poeira, poluição, umidade, gases (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>,...);
  - **Água:** bactérias (corrosão microbiológica), chuva ácida, etc;
  - **Solo:** acidez, materiais orgânicos, umidade, sais;
  - **Produtos químicos:** HCl, NaOH, etc.

Um determinado meio pode ser extremamente agressivo, sob o ponto de vista da corrosão, para um determinado material e inofensivo para outro.

145

## Corrosão

- **Oxidação:** Aumento algébrico do NOX.
- **Redução:** Diminuição algébrica do NOX.

Numero de Oxidação

$\xleftarrow{\text{Redução}}$  ... -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5 ...  $\xrightarrow{\text{Oxidação}}$

- **Termos Elétricos**

Oxidação é a perda de elétrons por uma espécie química e **redução** é o ganho de elétrons. Exemplos:

Fe  $\rightarrow$  Fe<sup>+2</sup> + 2e (Oxidação do ferro)

Cl<sub>2</sub> + 2e  $\rightarrow$  2 Cl<sup>-</sup> (redução do Cloro)

146

## Potencial de Eletrodo

- Nem todos os metais oxidam com a mesma facilidade;
- **Pilha Eletroquímica (eletrodos de Fe e Zn);**

Fe eletrodeposita (catodo)      Zn corrói (anodo)

Solução de Fe<sup>2+</sup>, 1,0 M      Solução de Zn<sup>2+</sup>, 1,0 M

Membrana

Voltagem 0,322 V

- Par Galvânico;
- Diversos pares de eletrodos  $\rightarrow$  diferentes V.

147

## Potencial de Eletrodo

- Metais podem ser classificados de acordo com a sua tendência em sofrer oxidação quando acoplados a outros metais;
- Eletrodo de H  $\rightarrow$  adotado como referência;
- **Série de Potenciais de Eletrodo.**
  - Verificar a espontaneidade de uma reação;
  - Série gerada sob condições ideais;
  - Utilidade Limitada.

148

## Potencial de Eletrodo

- **Série de Potenciais de Eletrodo Padrão**

Reação do Eletrodo	Potencial de Eletrodo Padrão, V <sup>o</sup> (V)
Au <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Au	+1,420
O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup> $\rightarrow$ 2H <sub>2</sub> O	+1,229
Pt <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Pt	+1,2
Ag <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Ag	+0,800
Fe <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Fe <sup>2+</sup>	+0,771
O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup> $\rightarrow$ 4(OH <sup>-</sup> )	+0,401
Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Cu	+0,340
2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ H <sub>2</sub>	0,000
Pb <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Pb	-0,126
Sn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Sn	-0,136
Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Ni	-0,250
Co <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Co	-0,277
Cd <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Cd	-0,403
Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Fe	-0,440
Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Cr	-0,744
Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Zn	-0,763
Al <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Al	-1,662
Mg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Mg	-2,363
Na <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> $\rightarrow$ Na	-2,714
K <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> $\rightarrow$ K	-2,924

Progressivamente mais inerte (catódico)  $\uparrow$

Progressivamente mais ativo (anódico)  $\downarrow$

149

## Potencial de Eletrodo

- **Espontaneidade da Reação**

$M_1 \rightarrow M_1^{n+} + ne^-$   $-V_1^0$  (oxidação)

$M_2^{n+} + ne^- \rightarrow M_2$   $V_2^0$  (redução)

---

$M_1 + M_2^{n+} \rightarrow M_1^{n+} + M_2$   $\Delta V^0 = V_2^0 - V_1^0$

Se  $\Delta V^0 > 0 \rightarrow$  reação espontânea

Se  $\Delta V^0 < 0 \rightarrow$  reação inversa

150

## Série Galvânica

- Representa as reatividades relativas de diversos metais e ligas comerciais na água do mar.
- Classificação mais realística.
- As ligas próximas ao topo são catódicas (não reativas) e as da parte de baixo são mais anódicas, ou seja, mais ativas.

151

## Série Galvânica

Progressivamente mais inerte (catódico)

Progressivamente mais ativo (anódico)

Platina  
Ouro  
Grafita  
Titânio  
Prata  
Aço inoxidável 316 (passivo)  
Aço inoxidável 304 (passivo)  
Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (passivo)  
Níquel (passivo)  
Monel (70Ni-30Cu)  
Ligas cobre-níquel  
Bronzes (ligas Cu-Sn)  
Cobre  
Latões (ligas Cu-Zn)  
Inconel (ativo)  
Níquel (ativo)  
Estanho  
Chumbo  
Aço inoxidável 316 (ativo)  
Aço inoxidável 304 (ativo)  
Ferro fundido  
Ferro e aço  
Ligas de alumínio  
Cádmio  
Alumínio comercialmente puro  
Zinco  
Magnésio e ligas de magnésio

152

## Corrosão em C.A.

- **Fatores Mecânicos**
  - Vibração ⇒ Fissuras ⇒ Exposição das armaduras
  - Líquidos em movimento ⇒ Erosão ⇒ Desgaste
- **Fatores Físicos**
  - $\Delta T$  ⇒ choques térmicos ⇒ integridade das estruturas
  - $\Delta T$  componentes ⇒ dilatação diferencial ⇒ microfissuras
- **Fatores Biológicos**
  - Microorganismos ⇒ meios corrosivos (Bactérias oxidantes)
- **Fatores Químicos**
  - Podem agir na pasta de cimento, no agregado e na armadura de aço-carbono

153

## Despassivação da Armadura

- **Despassivação por Carbonatação**
  - Ação do gás carbônico da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto reduzindo o pH. (Não perceptível a olho nu).
- **Despassivação por elevado teor de íons cloreto (cloretos)**
  - Penetração de cloretos por difusão, impregnação ou absorção capilar de águas contendo teores de cloreto que despassivam a superfície do aço e iniciam a corrosão.

154

## Corrosão por Ação dos Cloretos

155

## Corrosão

- **Íons Cloreto**
  - Fontes
    - Uso de aceleradores de pega que contêm  $\text{CaCl}_2$ ;
    - Impurezas (agregados e água);
    - Atmosfera;
    - Sais de degelo;
    - Processos Industriais.
  - Formas no concreto
    - Quimicamente Combinados (cloroaluminatos);
    - Adsorvidos na superfície dos poros capilares;
    - Livres, na solução dos poros.

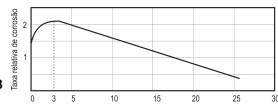
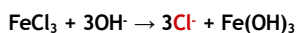
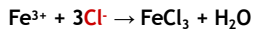
156



## Corrosão

### • Íons Cloreto

- Eletrólito forte (NaCl) → aumento de condutividade;
- Podem destruir a película passivadora proporcionada pelo meio alcalino e acelerar permanentemente a corrosão, sem consumir-se;



157

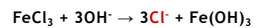
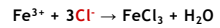
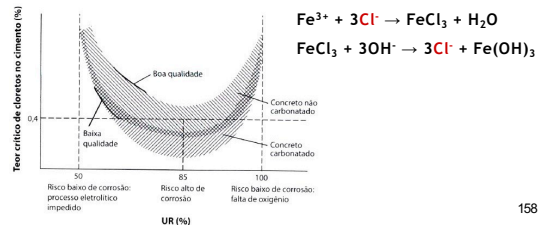
157



## Corrosão

### • Íons Cloreto

- Podem destruir a película passivadora proporcionada pelo meio alcalino e acelerar permanentemente a corrosão, sem consumir-se;



158

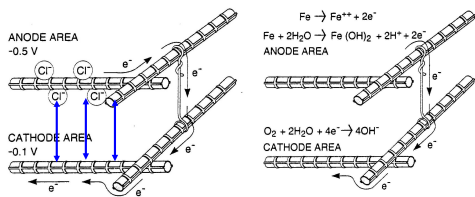
158



## Corrosão

### • Íons Cloreto

- Diferença de potencial entre as áreas anódicas (-0,5 V) e as partes catódicas (-0,1V) gera uma diferença de potencial de 0,4V



Corrosão das armaduras em concreto contaminado com cloretos

159

159



## Corrosão

### • Íons Cloreto

- Estimativa da concentração do concreto (Cs) em estruturas de concreto em ambientes marinhos

Risco de corrosão	Teor de cloretos (%)	
	Em relação à massa do cimento	Em relação à massa do concreto*
Certo	> 2,0	> 0,36
Provável	1,0 a 2,0	0,18 a 0,36
Possível	0,4 a 1,0	0,07 a 0,18
Desprezível	< 0,4	< 0,07

\* Com base em um concreto com consumo de cimento igual a 440 kg/m<sup>3</sup>.

160

160



## Corrosão

### • Íons Cloreto

- Fatores que influenciam na velocidade:
  - Quantidade de aluminatos (C<sub>3</sub>A) - formação do cloroaluminato de cálcio hidratado (sal de Friedel);
  - Introdução de adições minerais ativas – diminui a porosidade total e a distribuição de poros;

Teor de C <sub>3</sub> A	% de Cl <sup>-</sup> livres	Início de corrosão
2%	86%	Referência
9%	58%	1,75 vezes
11%	51%	1,93 vezes
14%	33%	2,45 vezes

161

161



## Corrosão

### • Íons Cloreto

- Fatores que influenciam na velocidade:

- Cimentos RS: ↓ C<sub>3</sub>A;
- Grau de saturação: ↑GS → ↓D<sub>s</sub>,
- a/c;
- Cátion (NaCl ou CaCl<sub>2</sub> ???);
- Fissuras;
- Carbonatação – dificulta a reação dos aluminatos;
- ↑ Temperatura → ↑ Taxa de corrosão.

Tipo de cimento	D <sub>s</sub> (10 <sup>-9</sup> cm <sup>2</sup> /s)
CP comum	44,7
30% cinza volante	14,7
65% escória	4,1
RS	100,0

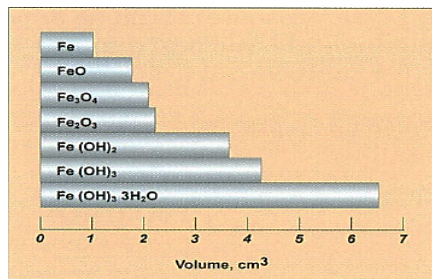
162

162



## Corrosão

### • Íons Cloreto



163

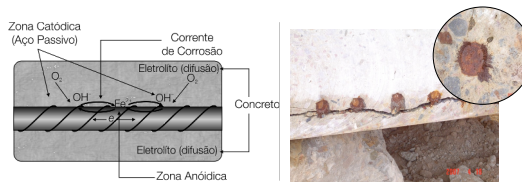
163



## Corrosão

### • Corrosão das Armaduras

- ~~Oxidação (Corrosão química);~~
- Ação Eletroquímica (criação de pilhas eletroquímicas);



- Diminuição da seção da armadura e fissuração do concreto paralelamente / manchas.

164

164



## Corrosão

### • Corrosão das Armaduras

- Ação Eletroquímica (criação de pilhas eletroquímicas)

UR > 60%;

Formação de óxidos e hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem;

- Deve existir um eletrólito.
- Deve existir uma diferença de potencial.
- Deve existir oxigênio.
- Podem existir agentes agressivos.

165

165



## Corrosão

### • Corrosão das Armaduras

- Passivação

• Elevação do seu potencial de corrosão em qualquer meio de pH > 2, de modo a estar na região de passivação (inibidores anódicos);

• Abaixamento de seu potencial de corrosão, com o fim de passar ao domínio da imunidade (proteção catódica) e;

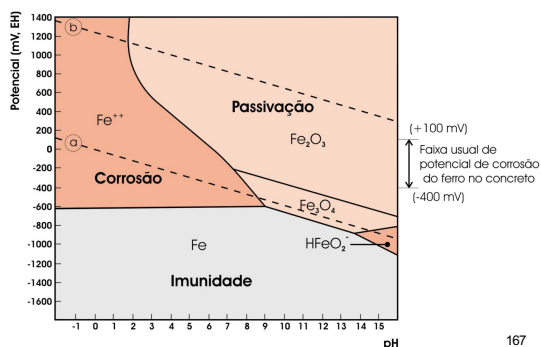
• Manter o meio com pH acima de 10,5 e abaixo de 13, que é o meio natural proporcionado pelo concreto, desde que seja homogêneo e compacto.

166

166



## Corrosão



167

167



## Corrosão

### • Principais causas de destruição do filme de óxidos:

1. Redução do pH resultante da carbonatação
2. Presença de cloretos no concreto junto às armaduras.



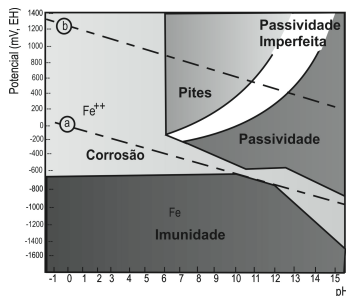
168

168



## Corrosão

- Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-água com Cl<sup>-</sup> (355 ppm)

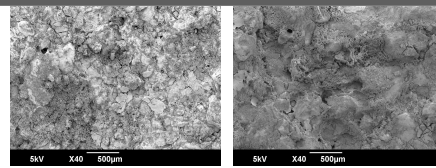


169

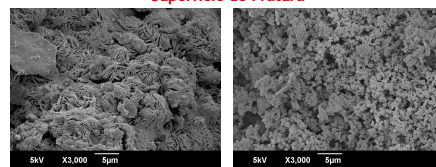
169



## Corrosão



Superfície de Fratura



Morfologia do produto de corrosão formado na região da armadura / Morfologia do produto de corrosão após passagem pelos poros do concreto.

170

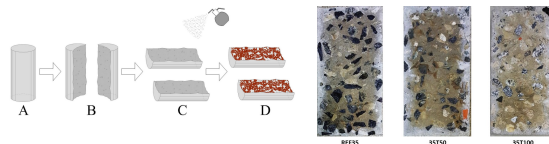
## Métodos de Ensaio Ação dos Cloretos

171



## Íons Cloro

- Profundidade de penetração
- Detecção:
- Solução de AgNO<sub>3</sub> (qualitativo)
- Precipitado Branco (AgCl) → Cl<sup>-</sup> livre
- Precipitado Marrom → ausência de Cl<sup>-</sup> livre



172



## Íons Cloro

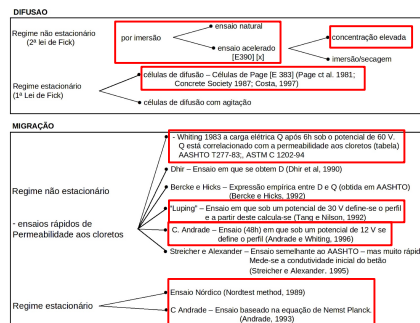
- Perfil de Concentração de Cloretos
- Detecção:
- Retirada de Testemunhos - Análise Química a cada profundidade (Perfil de Concentração);
- Análise Mineralógica - compostos formados;
- Dissolução em ácido ou água.

173

173



## Ensaio de Difusão e Migração



174

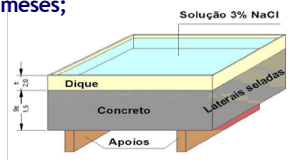




## “Método do Dique”

• **Método baseado na ASTM C1543/10a**  
(Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding)

- Penetração de íons cloreto no concreto com utilização de um dique;
- Duração mínima de 3 meses, podendo chegar a 12 meses;
- Difusão.



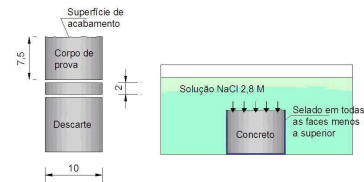
175



## Difusão Aparente

• **Método baseado na ASTM C1556/04**  
(Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion)

- Determinação do coeficiente de difusão aparente;
- Duração do ensaio : 35 a 90 dias.



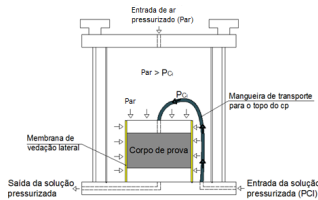
176



## Ensaio de Coluna

• **Método baseado na NBR 10786:2013**  
(Determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto endurecido, através de percolação de água sob pressão)

- Percolação da água e de uma solução com concentração inicial conhecida, sob pressão.



177



## Ensaio de Coluna

• **Método baseado na NBR 10786:2013**



178



## Ensaio de Coluna

• **Método baseado na NBR 10786:2013**  
(Determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto endurecido, através de percolação de água sob pressão)

- Ajuste Teórico dos resultados experimentais
- Modelo de Ogata (1961), aperfeiçoado por Freeze-Cherry (1979)
- A difusão pode ser diferenciada em dois processos distintos e dependentes da velocidade de percolação do fluido.

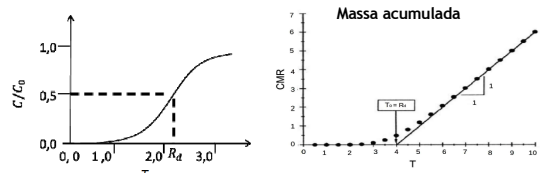
- Dispersão por difusão efetiva ( $D_e$ ) =  $w \cdot D_0$
- Dispersão mecânica ( $D_m$ ) =  $\alpha \cdot v_s$

$$D_h = D_e + D_m$$

179



## Ensaio de Coluna



$T = N^\circ$  de volume de poros  
(Vol. de solução / vol. de poros)

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta m_i}{V_p \cdot C_0}$$

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{Rd \cdot x - v_s \cdot t}{2\sqrt{Rd} \sqrt{D_h t}} \right) + \exp \left( \frac{v_s \cdot x}{D_h} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{Rd \cdot x + v_s \cdot t}{2\sqrt{Rd} \sqrt{D_h t}} \right) \right]$$

$D_h$  = dispersão hidrodinâmica

180





## Ensaio de Coluna

- Método baseado na NBR 10786:2013
- **Vantagens:**
  - Procedimento se aproxima bastante da situação real;
  - Não há indução de um campo elétrico externo;
  - Concentração inicial igual a zero.
- **Desvantagens**
  - Tempo de ensaio (90 a 360 dias);
  - A solução possui sempre a mesma concentração;
  - Depende da saturação do corpo de prova.

181



## Teste Nórdico Padrão

- **Normalizado pela NT BUILD 492:1999**  
(Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments)
- Aplicação de uma diferença de potencial que varia entre 10V e 60V, para analisar a penetração dos cloretos na amostra de concreto;
- Analisa semi-empiricamente apenas a difusão no estado não-estacionário ( $D_{ns}$ );
- Determinação da profundidade de penetração de cloretos por meio de soluções indicadoras ( $AgNO_3$ );

182



## Teste Nórdico Padrão

- **Normalizado pela NT BUILD 492:1999**  
(Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments)
- A diferença de potencial é definida de maneira que a frente de cloretos não atinja a face de saída;
- O ajuste de tensão é feito com base na medida da corrente que atravessa a amostra no início do ensaio.

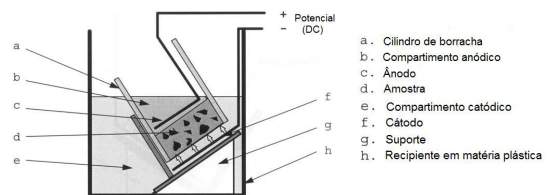
$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right)$$

183



## Teste Nórdico Padrão

- **Normalizado pela NT BUILD 492:1999**  
(Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments)



184



## Teste Nórdico Padrão

- **Normalizado pela NT BUILD 492:1999**  
(Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments)



185



## Teste Nórdico Padrão

- **Normalizado pela NT BUILD 492:1999**  
(Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments)

- Analisa semi-empiricamente apenas a difusão no estado não-estacionário ( $D_{ns}$ );

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right)$$

$D_{ns}$  = coeficiente de difusão em regime não estacionário ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ );  
 $U$  = valor da diferença de potencial do campo elétrico (V);  
 $T$  = valor médio da temperatura inicial e final da solução anódica ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $L$  = espessura do corpo-de-prova (mm);  
 $x_d$  = valor médio da penetração de ions cloro (mm);  
 $t$  = duração do ensaio (horas).



186



## Teste Nórdico Padrão

- Resistência à penetração de cloretos, com base na difusividade aos 28 dias

Coefficiente não estacionário de difusão de cloretos, aos 28 dias ( $D_{ns28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ou $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	Resistência à penetração de cloretos
> 15	Baixa
10 a 15	Moderada
5 a 10	Alta
2,5 a 5	Muito alta
< 2,5	Extremamente alta

187



## Teste Nórdico Padrão

- Normalizado pela NT BUILD 492:1999
- Vantagens:
  - Ensaio rápido (24h);
  - Baixo custo.
- Desvantagens
  - Tensão varia em função da corrente aplicada;
  - Método semi-empírico;
  - Determina apenas o  $D_{ns}$ ;
  - Resultado depende da saturação da amostra.

188



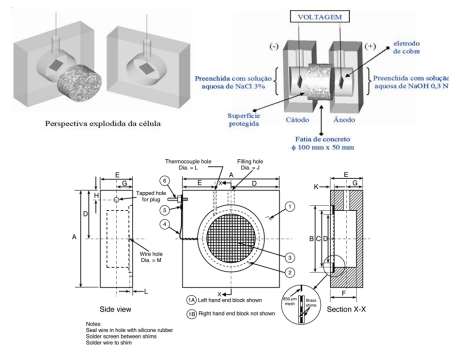
## Carga Total Passante

- Método baseado na ASTM C1202/2012 (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)
- Indução do movimento dos íons sob a ação de um campo elétrico externo;
- Avalia o coeficiente de difusão no estado estacionário;
- Tensão aplicada de 60V (contínua), durante 6h, medindo-se a corrente passante a cada 30min.

189



## Carga Total Passante

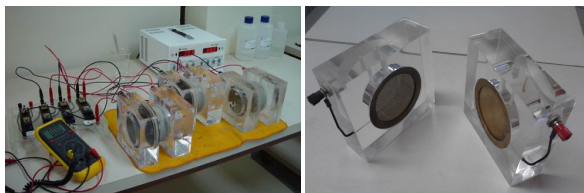


190



## Carga Total Passante

- Método baseado na ASTM C1202/2012 (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)



191



## Carga Total Passante

- Método baseado na ASTM C1202/2012
- Vantagens:
  - Ensaio muito rápido (6h);
  - Ausência de cálculos.
- Desvantagens
  - Elevada tensão aplicada (60V);
  - Dificuldade de fixação;
  - Eletrodo (malha) muito próximo à amostra, gerando aquecimento;
  - Determina apenas a carga total passante.

192



## Carga Total Passante

- Método baseado na ASTM C1202/2012
- Desvantagens
- Determina apenas a carga total passante.

Carga Passante	Penetrabilidade de cloretos no concreto
> 4.000 C	Elevada
2.000 - 4.000 C	Moderada
1.000 - 2.000 C	Baixa
100 - 1.000 C	Muito Baixa
< 100 C	Desprezível

193



## Migração de Cloretos

- Método adaptado da ASTM C1202/2012
- Indução do movimento dos íons sob a ação de um campo elétrico externo (Nernst Planck);
- Obtêm-se os coeficientes de difusão no estado estacionário e não estacionário;
- Tensão aplicada de 12V (contínua), medindo-se a condutividade elétrica a cada 24h;

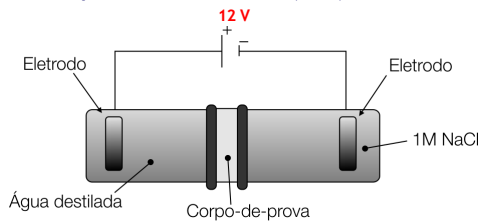
$$\text{Fluxo} = \cancel{\text{difusão pura}} + \text{migração elétrica} + \cancel{\text{convecção}}$$

194



## Migração de Cloretos

- Método adaptado da ASTM C1202/2012
- Indução do movimento dos íons sob a ação de um campo elétrico externo (12V);

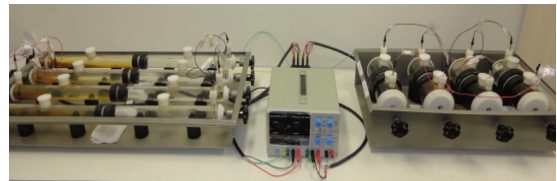


195



## Migração de Cloretos

- Método adaptado da ASTM C1202/2012
- Indução do movimento dos íons sob a ação de um campo elétrico externo (12V);

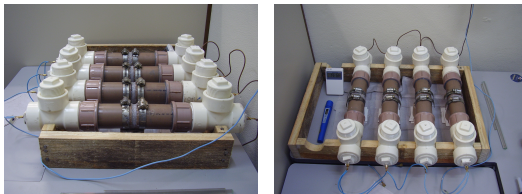


196



## Migração de Cloretos

- Método adaptado da ASTM C1202/2012
- Indução do movimento dos íons sob a ação de um campo elétrico externo (12V);



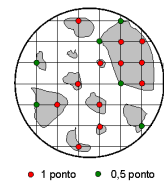
197



## Migração de Cloretos

- Método adaptado da ASTM C1202/2012
- Seleção das Amostras de forma representativa;
- Adaptação da ASTM E 562-99 (*Standard Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*).

- Estimativa da quantidade relativa de brita, sobrepondo uma malha de contagem.

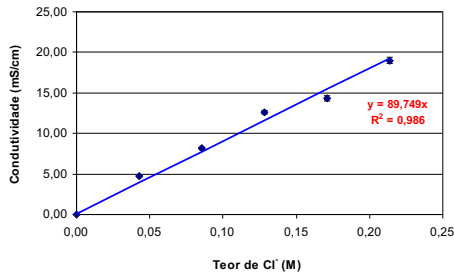


198



## Migração de Cloretos

- Método adaptado da ASTM C1202/2012
- Curva de calibração da condutividade



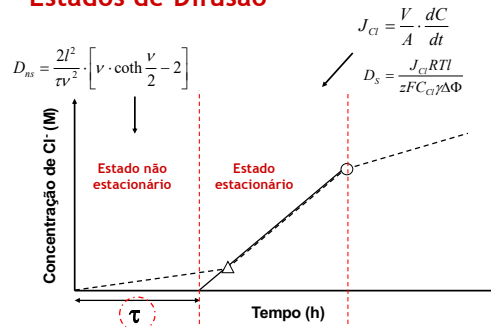
199

199



## Migração de Cloretos

- Estados de Difusão



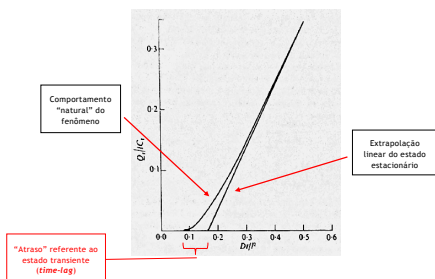
200

200



## Migração de Cloretos

- Estados de Difusão



CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. 2ª Ed. Bristol: J.W. Arrowsmith LTD, 1975.

201

201

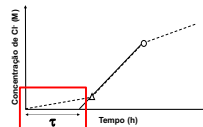


## Migração de Cloretos

- Equação de Nernst-Planck
- Difusão no Estado Não Estacionário

- Fluxo de Difusão varia em função do tempo, unidirecionalmente.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D_{ns} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$



$$D_{ns} = \frac{2l^2}{\tau v^2} \left[ v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right]$$

$$v = \frac{ze\Delta\Phi}{kT}$$

202

202



## Migração de Cloretos

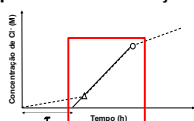
- Equação de Nernst-Planck
- Difusão no Estado Estacionário

- Fluxo de Difusão não varia em função do tempo, ocorrendo em apenas uma direção.

$$J_i(x) = -\frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x}$$

$$D_s = \frac{J_{Cl} RT l}{z F C_{Cl} \Delta \Phi}$$

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt}$$



203

203



## Migração de Cloretos

- Resistência à penetração de cloretos, com base na difusividade aos 28 dias

Coefficiente não estacionário de difusão de cloretos, aos 28 dias ( $D_{ns28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ou $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	Resistência à penetração de cloretos
> 15	Baixa
10 a 15	Moderada
5 a 10	Alta
2,5 a 5	muito alta
< 2,5	Extremamente alta

Nilsson et al. apud GJØRV, 2015

204

204

## Migração de Cloretos

- Estimativa do Período de Iniciação
- Lei de Einstein

$$D_s = \frac{k}{\rho} = k \cdot \sigma$$

K cte. relacionada às condições de exposição  
Não considera a reação dos agentes com a matriz !!!

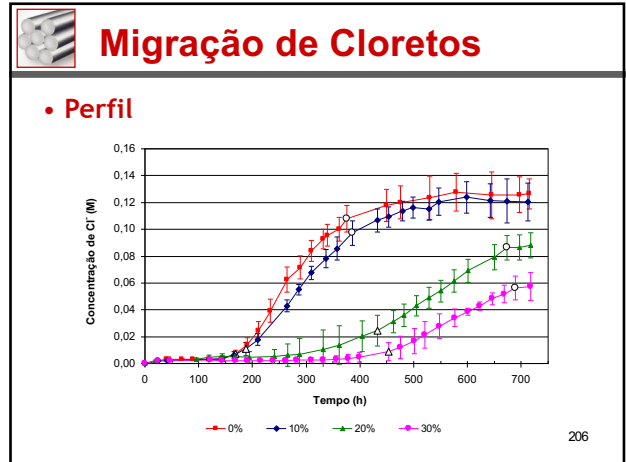
↓

$$D_{ns} = \frac{k}{\rho \cdot r}$$

$r = \text{fator de reação ou fator de retardo } (> 1)$

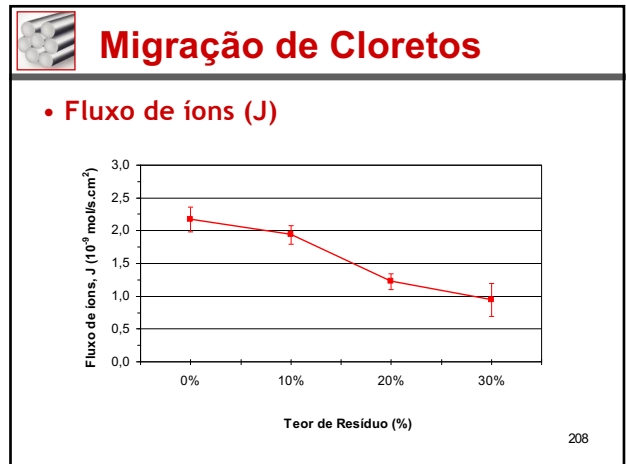
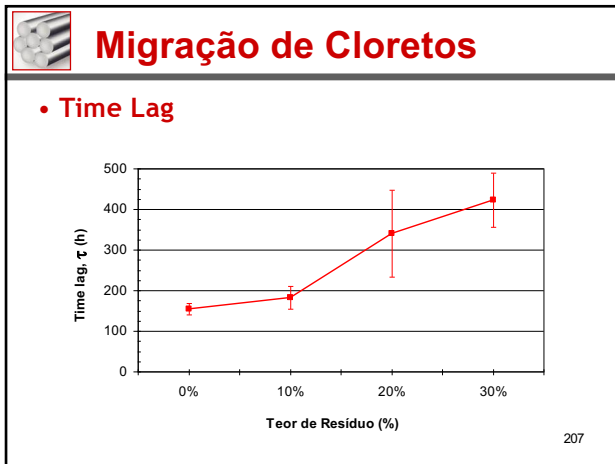
$$r = \frac{D_s}{D_{ns}}$$

205



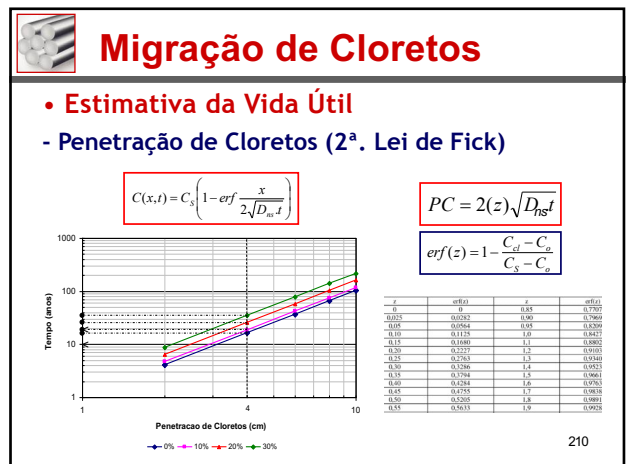
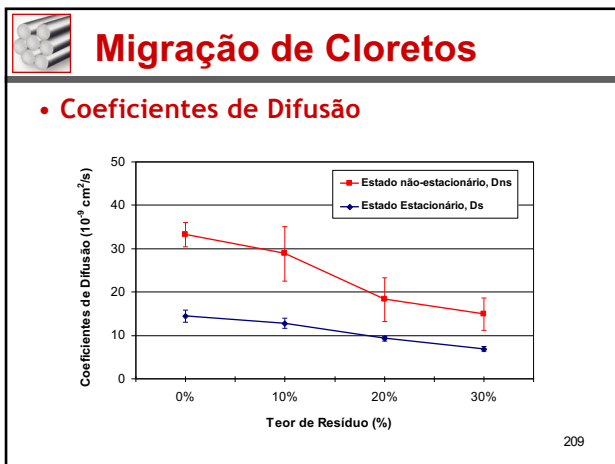
205

206



207

208



209

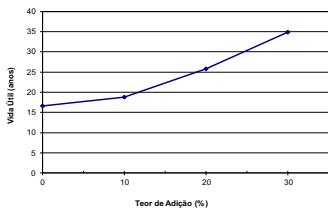
210





## Migração de Cloretos

- Estimativa da Vida Útil
- Penetração de Cloretos (2ª. Lei de Fick)



$$PC = 2(z)\sqrt{D_{ns}t}$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{cl} - C_a}{C_s - C_a}$$

z	erf(z)	z	erf(z)
0	0	0,90	0,7927
0,025	0,0282	0,95	0,7622
0,05	0,0540	0,98	0,8324
0,10	0,1125	1,0	0,8217
0,15	0,1680	1,1	0,8802
0,20	0,2220	1,2	0,9042
0,25	0,2743	1,3	0,9344
0,30	0,3249	1,4	0,9592
0,35	0,3729	1,5	0,9801
0,40	0,4179	1,6	0,9973
0,45	0,4605	1,7	0,9998
0,50	0,5205	1,8	0,9999
0,55	0,5633	1,9	0,9998

211

211



## Migração de Cloretos

- Método adaptado da ASTM C1202/2012
- Vantagens:
  - Tensão aplicada é moderada (12V);
  - Eletrodo afastado da amostra;
  - Determina o  $D_{ns}$  e o  $D_s$ ;
  - Estima vida útil em função do cobrimento.
- Desvantagens
  - Tempo de ensaio (a partir de 25 dias);
  - Depende da saturação do corpo de prova.

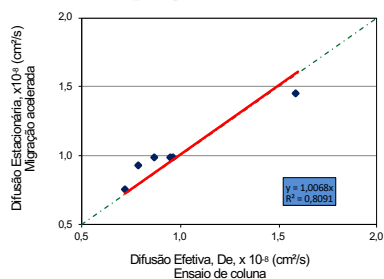
212

212



## Correlação

- Ensaios de Migração x Coluna



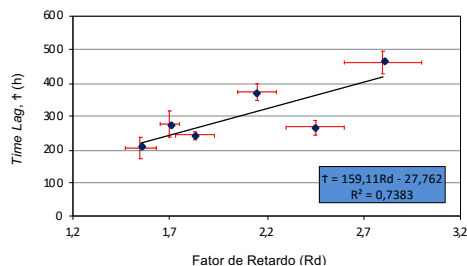
213

213



## Correlação

- Ensaios de Migração x Coluna



214

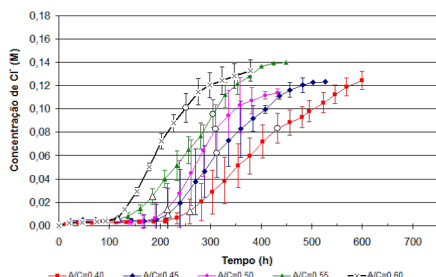
214



## Migração de Cloretos

- Efeito da relação a/c

Ivan Santos, 2013



215

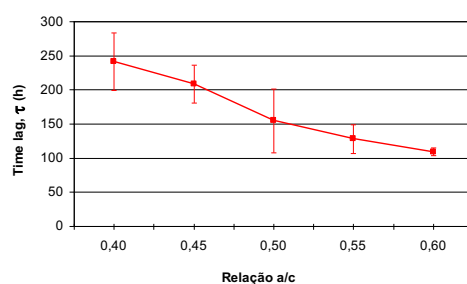
215



## Migração de Cloretos

- Efeito da relação a/c

Ivan Santos, 2013



216

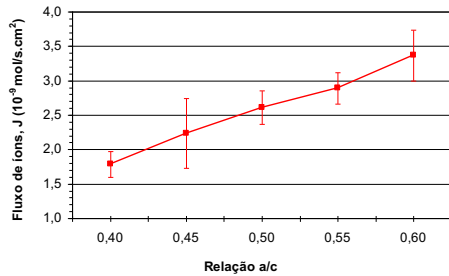
216



## Migração de Cloretos

- Efeito da relação a/c

Ivan Santos, 2013



217

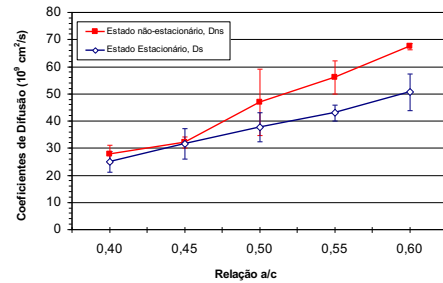
217



## Migração de Cloretos

- Efeito da relação a/c

Ivan Santos, 2013



218

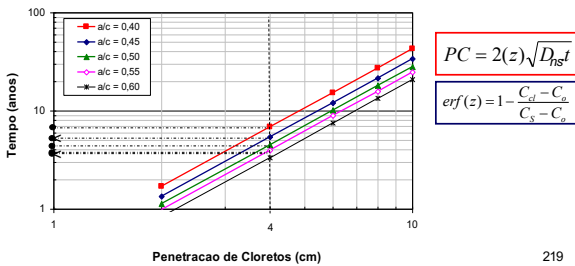
218



## Migração de Cloretos

- Efeito da relação a/c

Ivan Santos, 2013



219

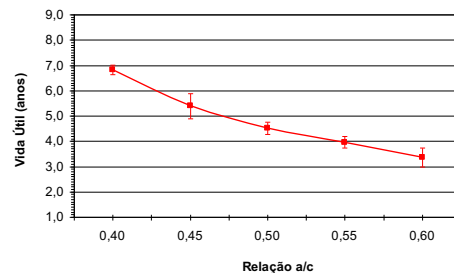
219



## Migração de Cloretos

- Efeito da relação a/c

Ivan Santos, 2013



220

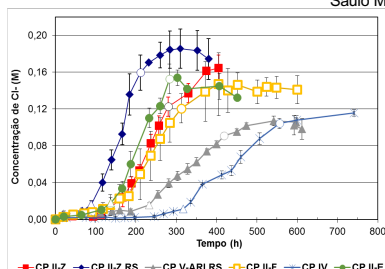
220



## Migração de Cloretos

- Efeito do tipo de cimento  
Composição Química (aluminatos) x Finura

Saulo Marques, 2014



221

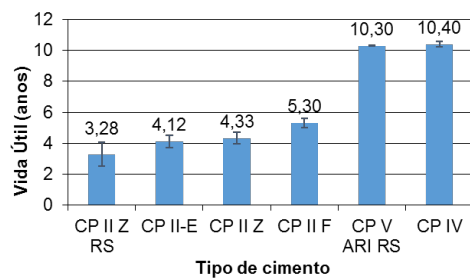
221



## Migração de Cloretos

- Efeito do tipo de cimento

Saulo Marques, 2014



222

222



## Migração de Cloretos

- Efeito do tipo de cimento

Finura

Saulo Marques, 2014

Propriedades Determinadas	Método	CP II-Z-32	CP II-Z-32 RS	CP V-ARI RS	CP II-F-32	CP IV-32	CP II-E-32
Área Superficial Específica (cm <sup>2</sup> /g)	Blaine	3297	2821	4466	4612	5743	4331
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NM 23/01	2,99	3,16	3,16	3,15	2,84	3,08

Composição Química (aluminatos)

223



## Migração de Cloretos

- Efeito do tipo de cimento

Finura

Composição Química (aluminatos)

Saulo Marques, 2014

Cimento	Teor (%)									
	CaO	CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
CP II-Z-32	44,3	20,4	22,7	4,1	1,7	4,8	1,2	0,270	0,1	0,0
CP II-Z-32 RS	45,9	26,0	16,8	3,6	2,7	3,4	0,9	0,293	0,1	0,0
CP V-ARI RS	52,4	20,6	16,0	3,7	3,2	2,8	0,780	0,2	0,1	0,0
CP II-F-32	51,3	19,9	16,5	4,9	2,5	3,4	1,142	0,3	0,1	0,0
CP IV-32	41,0	0,0	41,9	3,9	2,2	9,1	1,179	0,5	0,1	0,0
CP II-E-32	47,7	24,6	16,8	3,9	1,8	3,8	0,785	0,3	0,1	0,1

224

223

224

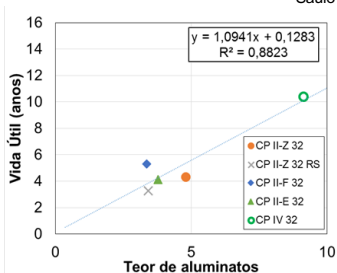


## Migração de Cloretos

- Efeito do tipo de cimento

Composição Química (aluminatos)

Saulo Marques, 2014



225

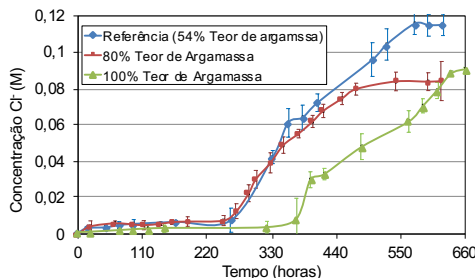
225



## Migração de Cloretos

- Efeito do teor de argamassa

Silas Pinto, 2016



226

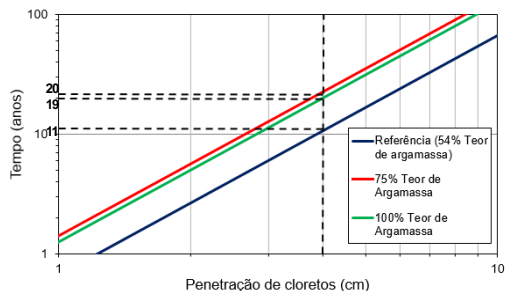
226



## Migração de Cloretos

- Efeito do teor de argamassa

Silas Pinto, 2016



227

227

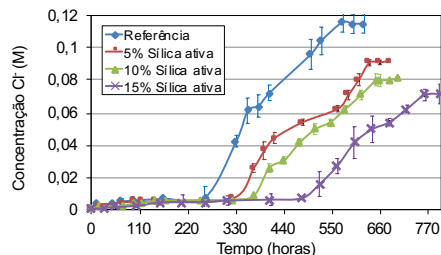


## Migração de Cloretos

- Presença de Adições Minerai

• Adição de Sílica Ativa

Silas Pinto, 2016



228

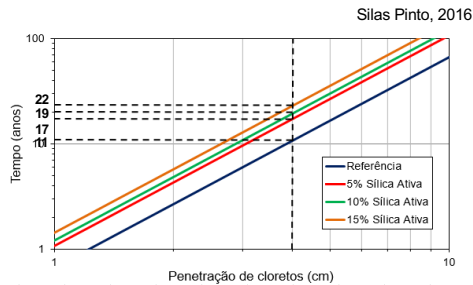
228



## Migração de Cloretos

### - Presença de Adições Minerais

- Adição de Silica Ativa



229

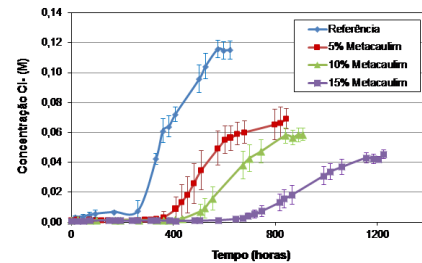
229



## Migração de Cloretos

### - Presença de Adições Minerais

- Adição de Metacaulim



230

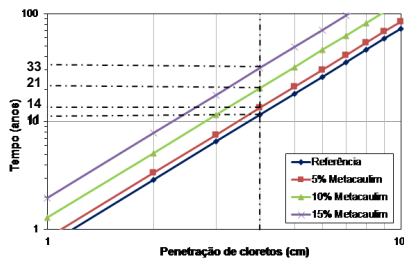
230



## Migração de Cloretos

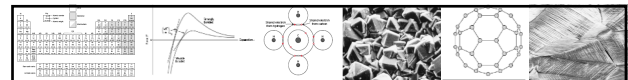
### - Presença de Adições Minerais

- Adição de Metacaulim

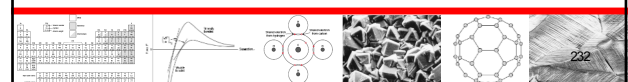


231

231



## Corrosão por Carbonatação



232

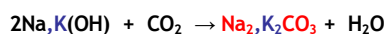


## Carbonatação

### • Mecanismo

- Gás carbônico ( $CO_2$ ), Dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e Gás sulfídrico ( $H_2S$ );

- Redução do pH;  $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$



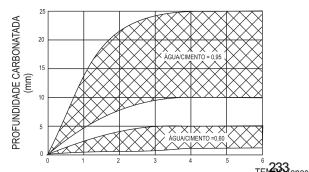
- pH  $CaCO_3 = 9,4$ ;

- Influência da relação a/c;

- Influência da Umidade;

- Presença de Adições.

Reduz a reserva alcalina

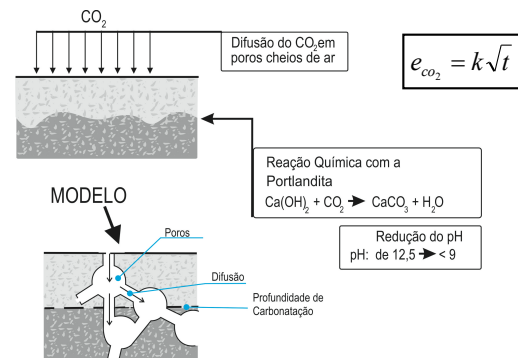


233

233



## Carbonatação



234

234

## Carbonatação

- Carbonatação do  $\text{Ca(OH)}_2$
- Dissolução do  $\text{CO}_2$  na solução do poro
 
$$\text{CO}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$$
- Dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$ 

$$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$$
- Formação do carbonato de cálcio
 
$$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$$

235

235

## Carbonatação

- Frente de carbonatação.

CARBONATAÇÃO COMO AGENTE DA CORROSÃO

pH < 9

pH > 12

(CASTRO, 2002)

236

236

## Carbonatação

- Carbonatação do CH

Camada de  $\text{CaCO}_3$  sobre o  $\text{Ca(OH)}_2$

Cimento hidratado completamente carbonatado

(HÄUBLER *et al.*, 2001)

237

237

## Carbonatação

- Carbonatação de bases alcalinas (NaOH e KOH)

"Em presença de bases alcalinas (NaOH e KOH), a solubilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$  é baixa e a sua carbonatação é lenta. No entanto, essas bases podem se carbonatar."

- Carbonatação do NaOH e KOH:
 
$$\text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$$

$$\text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$$
- Formação do carbonato de cálcio:
 
$$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{CO}_3 + 2\text{KOH}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{CO}_3 + 2\text{NaOH}$$

238

238

## Carbonatação

- Carbonatação de outros compostos da pasta de cimento hidratada (silicatos e aluminatos)
- O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é inicialmente descalcificado, diminuindo sua relação Ca/Si e, posteriormente, é convertido em sílica gel:

$$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$$

↓ Ácido carbônico    
 ↓ C-S-H    
 ↓ Carbonato de cálcio    
 ↓ Sílica gel

239

239

## Carbonatação

- Carbonatação do C-S-H

C-S-H proveniente da hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$

C-S-H carbonatado (3%  $\text{CO}_2$  por 28 dias)

(HÄUBLER *et al.*, 2001)

240

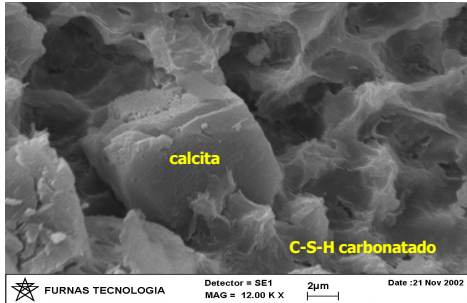
240





## Carbonatação

### • Carbonatação do C-S-H



241



## Carbonatação

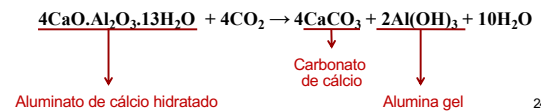
### • Carbonatação de outros compostos da pasta de cimento hidratada (silicatos e aluminatos)

#### - Carbonatação da etringita e monossulfato:

"A etringita e o monossulfato produzem alumina gel e gesso"

#### - Carbonatação dos aluminatos hidratados:

"Os aluminatos hidratados  $C_4AH_x$  são convertidos rapidamente em  $C_4ACH_x$  e posteriormente em alumina gel"



242

242



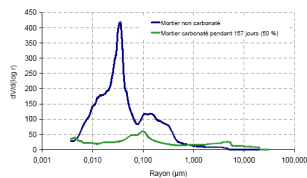
## Carbonatação

### • Efeitos sobre a microestrutura do concreto

- Redução da porosidade total e/ou refinamento de poros:  $CaCO_3$  que possui volume maior (cerca de 11% maior que do  $Ca(OH)_2$ ) → colmatagem dos poros;

1 mol de  $Ca(OH)_2 = 33,2 \text{ cm}^3 \rightarrow$  1 mol de  $CaCO_3 = 36,9 \text{ cm}^3$  (↑11%)

1 mol de C-S-H são =  $12 \text{ cm}^3 \rightarrow$  1 mol de C-S-H carbonatado =  $16 \text{ cm}^3$  (↑33%)



243

243



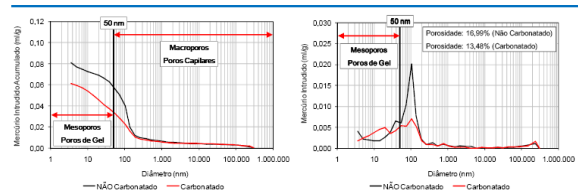
## Carbonatação

### • Efeitos sobre a microestrutura do concreto

Fisicamente →

- Redução da porosidade
- Refinamento dos poros

CP V – ARI



244

244



## Carbonatação

### • Efeitos sobre a microestrutura do concreto

- Influência da Carbonatação na Difusão de Cloretos (Cl<sup>-</sup>)

	Cimento CEM I	Cimento CEM II	Cimento CEM III
D ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) Concreto não carbonatado	1,5	3,3	0,8
D ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) Concreto carbonatado	0,2	0,5	0,3

(OLLIVIER, 2009)  
245

245



## Carbonatação

### • Efeitos sobre a microestrutura do concreto

- Retração por Carbonatação

- Perda de moléculas de água na reação principal de carbonatação;

- Diminuição de volume na pasta de cimento endurecida (dissolução do  $Ca(OH)_2$  em zonas onde ele está sob tensão e a precipitação do  $CaCO_3$  em espaços não sujeitos à tensão).

✓ Se confunde com a retração por secagem e contribui para a parcela irreversível dessa retração (NEVILLE, 1997);

✓ Pode contribuir com fissuração generalizada da superfície exposta do concreto e pode ser significativa em pequenos CPs (TAYLOR, 1990).

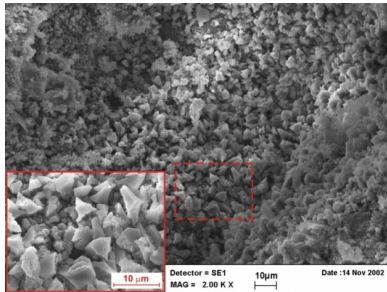
246

246



## Carbonatação

- Morfologia típica da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) vista ao MEV



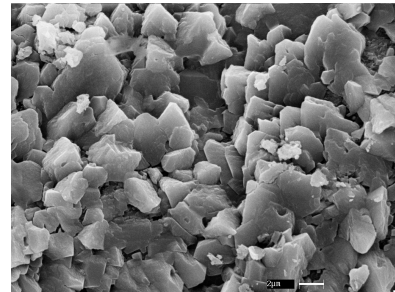
247

247



## Carbonatação

- Morfologia típica da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) vista ao MEV



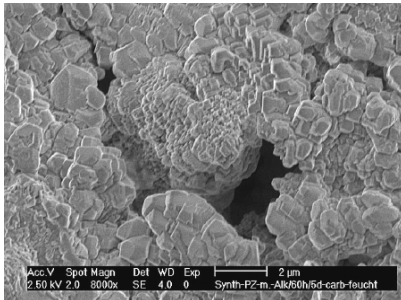
248

248



## Carbonatação

- Morfologia típica da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) vista ao MEV



249

249



## Carbonatação

- Efeitos

- Redução do pH:

pH do concreto → 12,5 a 13,5

pH crítico (despassivação) → 11,5 a 11,8

pH de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  → 8,3 a 9,0



➔ principal "efeito colateral" da carbonatação

➔ importante agente iniciador da corrosão

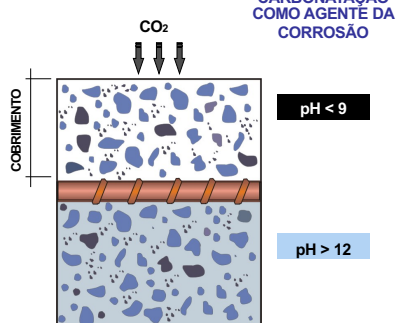
250

250



## Carbonatação

- Frente de carbonatação.



(CASTRO, 2002)

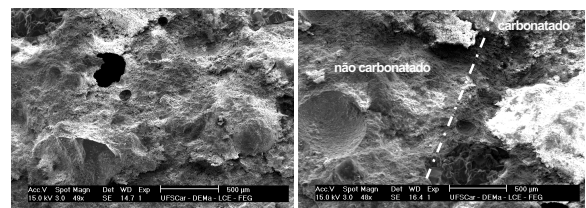
251

251



## Carbonatação

- MEV



Região Carbonatada

Interface

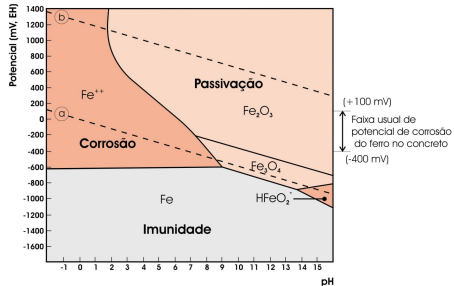
252

252



## Carbonatação

- Diagrama de Equilíbrio Termodinâmico do Sistema Fe-H<sub>2</sub>O a 25°C - Diagrama de Pourbaix.

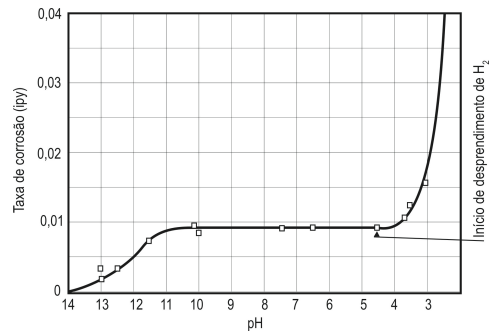


253

253



## Carbonatação

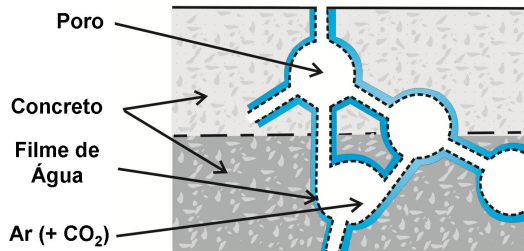


254

254



## Carbonatação

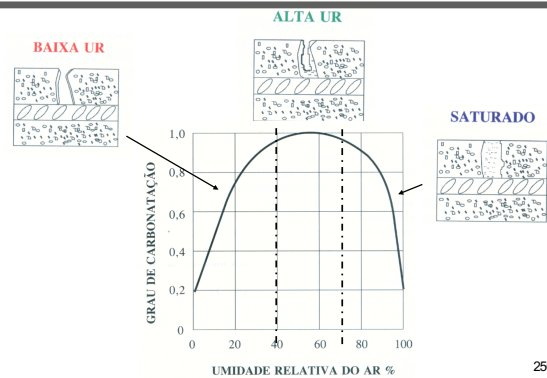


255

255



## Carbonatação



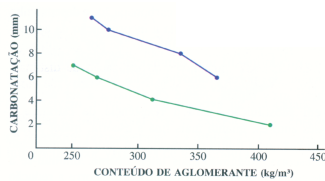
256

256



## Carbonatação

- Mecanismo
- Presença de Adições Pozolânicas.
- Redução da porosidade x Redução na reserva alcalina
- Reação Pozolânica: Consumo elevado de álcalis da pasta

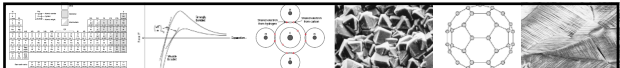


$$e_{CO_2} = k\sqrt{t}$$

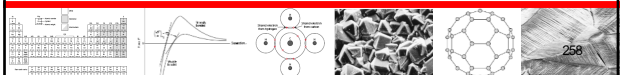
- concreto (60% cimento portland + 40% cinza volante)
- concreto (cimento portland)

257

257



## Métodos de Ensaio Carbonatação



258



## Carbonatação

### • Métodos

- Determinação precisa: prismas Nicol;  
Dupla refração sofrida pelo carbonato de cálcio.  
Técnica pouco acessível.
- Indicador Fenolftaleína (pH = 9,5) ou indicador Timolftaleína (pH = 10,5);  
Solução aquo-alcóolica com 1% do indicador.
- Uso de Câmara de Carbonatação;
- MEV;
- Análises Térmicas;
- Resistência à Flexão, outros...

259

259



## Carbonatação

### • Métodos

- Câmara de Carbonatação + indicador de pH;



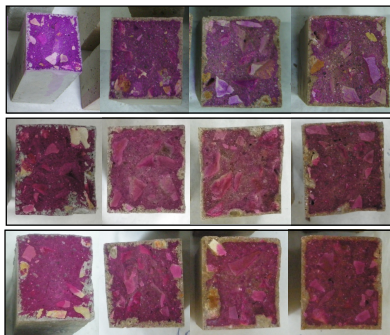
260

260



## Carbonatação

### • Carbonatação x corrosão



(A) 7 dias

(B) 14 dias

(C) 28 dias

261

261



## Carbonatação

### • Carbonatação x corrosão



(D) 52 dias

(E) 91 dias

(F) 180 dias

262

262



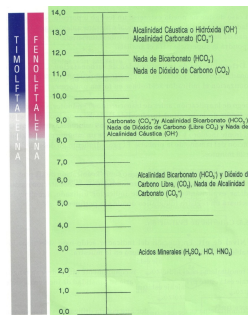
## Carbonatação

- A previsão do início da corrosão, baseada na velocidade de avanço da carbonatação e na espessura do cobrimento, pode ser feita pela seguinte equação:

$$e = k \cdot t^{1/2}$$

Onde: "e" é o cobrimento em cm, "t" é a idade prevista para início da corrosão; "k" é uma constante que varia com o a/c, fck, % de CO<sub>2</sub> do ar e com a agressividade do meio.

$k_c = 1,8$  a  $12,0$  mm<sup>2</sup>/ano  
(BATISTA; CASCUO; CARASEK, 2013)



263

263



## Carbonatação



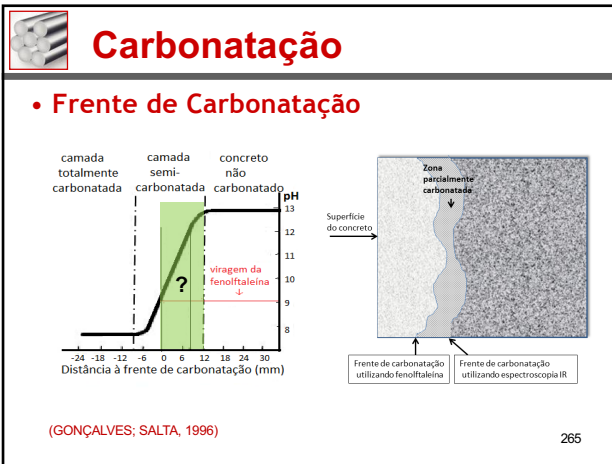
### Medida da Frente de Carbonatação



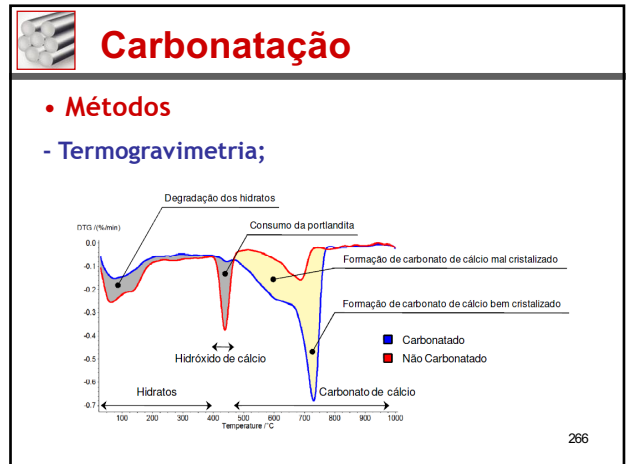
264

264

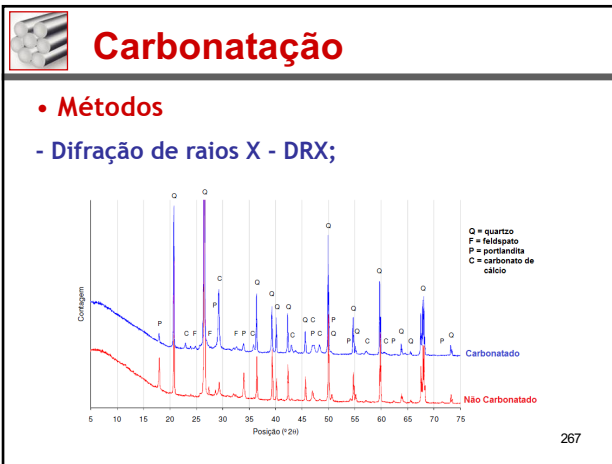




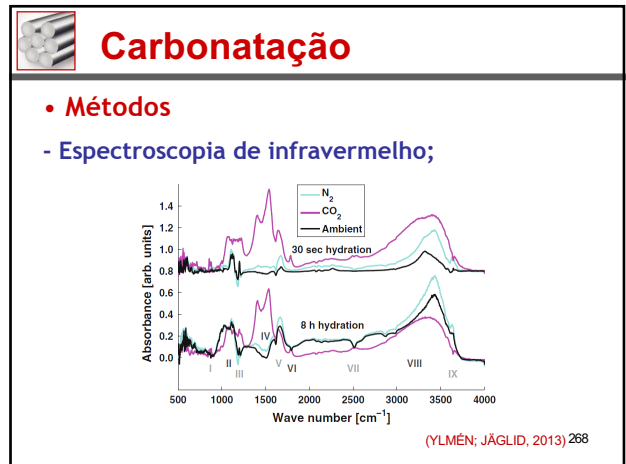
265



266



267



268



269

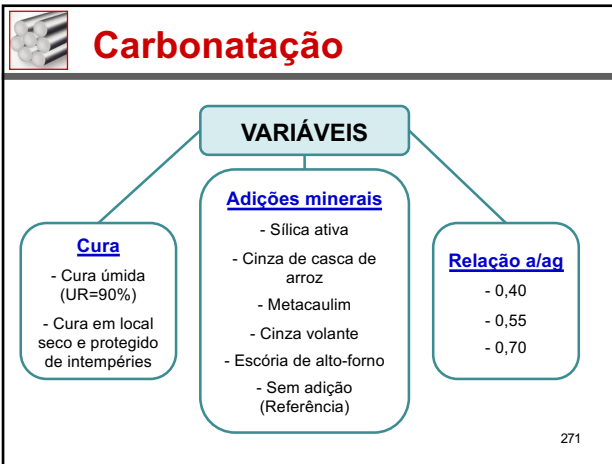
## Carbonatação

- Dúvidas
- As adições minerais realmente produzem queda no desempenho do concreto em relação à carbonatação? Mito ou verdade?
- Existem riscos de que, baseados na resistência (f<sub>ck</sub>), os concretos com adições minerais não atinjam VUPs de 50, 63 ou 75 anos, conforme previsto na NBR 15575 (norma de desempenho)?
- Quais os parâmetros de controle (das adições e dos concretos) para que se garanta durabilidade e vida útil?

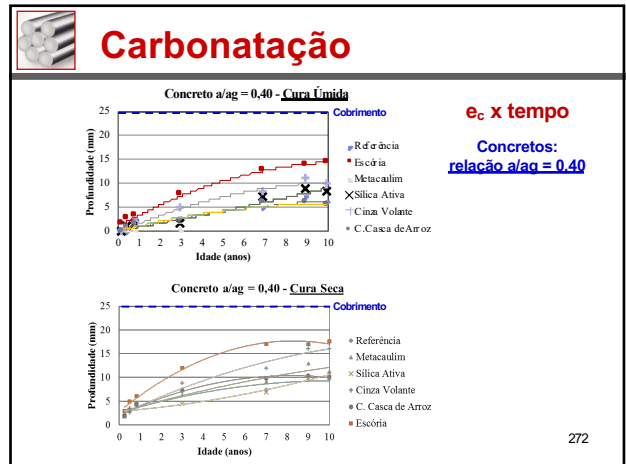
270

270

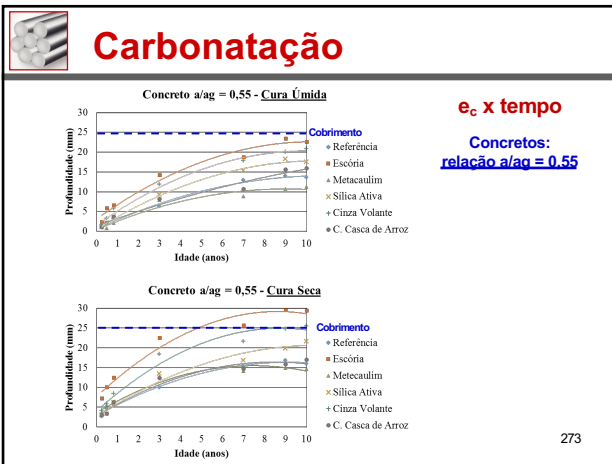




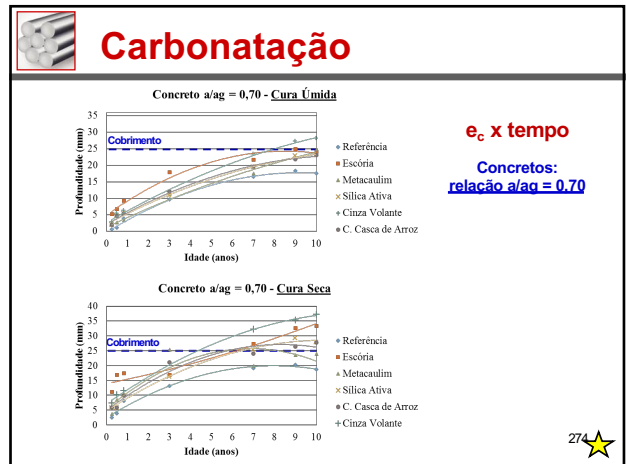
271



272



273



274



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
Escola Politécnica  
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais  
PPEC – Programa de Pós em Engenharia Civil

---

## ENG M39 - Durabilidade e Degradação das Estruturas de Concreto

**UNIDADE I** - Introdução, Conceitos de Durabilidade e Vida Útil, Efeitos do Ambiente e da Temperatura, Mecanismos de Transporte, Corrosão as Armaduras, Migração de Cloretos, Carbonatação

**Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro**  
verasribeiro@hotmail.com

---



275