



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

Materiais de Construção II

(TC-031)

DURABILIDADE DO CONCRETO

Professores

José de Almendra Freitas Jr. - freitasjose@terra.com.br

Marienne do Rocio de Melo Maron da Costa - mariennemaron@gmail.com

Laila Valduga Artigas - artigas@ufpr.br

Versão 2020

Ponte de concreto armado



Arquivo: Filmes concreto / Durabilidade / Ponte completamente deteriorada

DURABILIDADE

- Durabilidade se preocupa com a variação das propriedades do concreto sob o ataque de agentes agressivos.
 - A durabilidade é interligada aos conceitos de vida útil e de manutenção
 - É o início do estudo de Patologia
- O estudo de engenharia deve sempre considerar o CICLO DE VIDA das obras

RECORDAÇÃO IMPORTANTE

1. USA-SE MAIS ÁGUA QUE O NECESSÁRIO PARA A HIDRATAÇÃO DEVIDO À TRABALHABILIDADE

- > Gera-se vazios preenchidos com água distribuídos na massa
 - > Por pressão osmótica a água tende a ir para a superfície
 - A movimentação da água gera vasos capilares
- A água ao passar por agregados pode acumular, gerando a zona de transição
 - Como há produtos solúveis no concreto (CaOH_2), K^+ , Na^+), dentro dos poros e capilares existem soluções básicas.
- Há tensão capilar dentro dos vasos, que influem no volume das peças de concreto
 - Minimiza-se com a cura e diminuindo consumo de água

RECORDAÇÃO IMPORTANTE

2. O pH DO CONCRETO É BÁSICO

- > pH é um marcador que indica os íons e reatividade
 - > pH é maior que 12,5 em geral, é reativo
 - > Materiais ácidos atacam o concreto

3. Os vasos capilares deixam o concreto poroso

- > A saída de água carrega sólidos para o exterior
- > Permitem a entrada de agentes agressivos

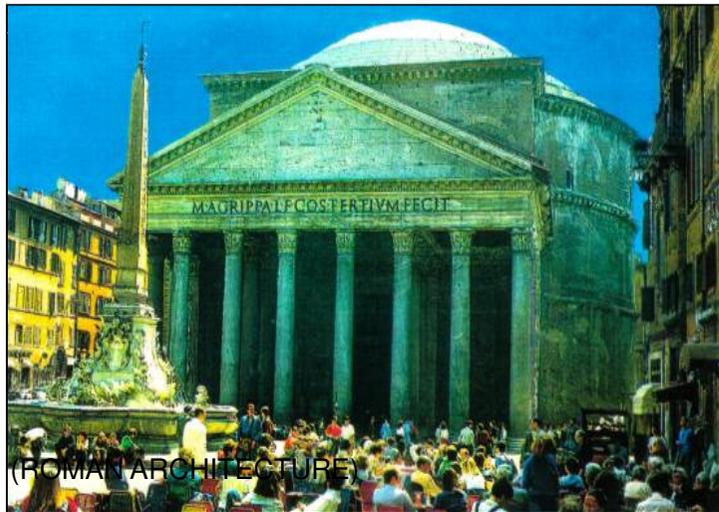
4. Resistência à abrasão depende do tipo agregado, fechamento granular e da zona de transição

DURABILIDADE DO CONCRETO

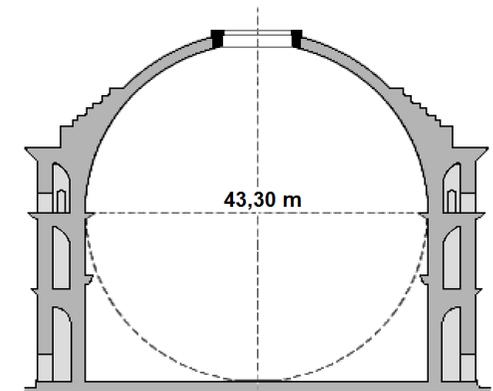
Concreto romano - durabilidade muito grande, inúmeras obras com 2.000 anos. O cimento romano (natural), junto com a cal e as pozolanas davam ao concreto um “envelopamento” muito bom deixando a porosidade muito baixa.

Pantheon (Roma)

Construído por Marco Agrippa, reconstruído por Adriano 110-125 d.c



Cúpula c/ agregados leves (pedra pome).



Cimento Romano+pozolanas+agregados

/Pantheon Roma

Paredes cilíndricas e cúpula (43,3 m diâmetro) em concreto maciço 10 MPa.

DURABILIDADE DO CONCRETO



Barragens de Cornalbo (H=24m) e Proserpina (H=18m), construídas pelos Romanos, região de Mérida, 200 DC, em funcionamento.

A ponte de Alcântara, romana 106 DC, rio Tejo (Espanha). Em uso até hoje.

Romanos não tinham ISO....



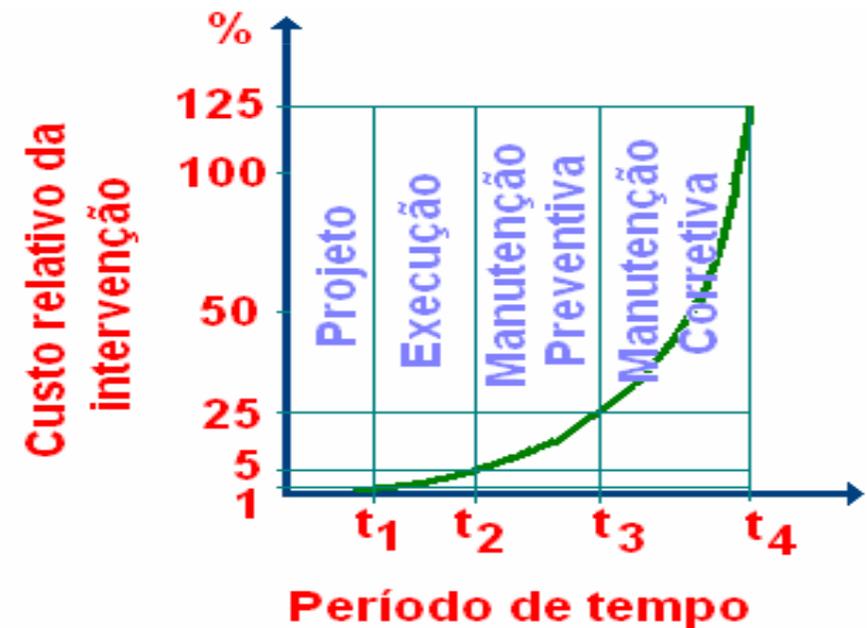
DURABILIDADE DO CONCRETO

A NBR-6118 obriga projetista estrutural, de acordo com a agressividade do meio especifique a relação água/cimento máxima a ser usada.

Vital conhecimento das causas de deterioração do concreto :

- Melhor utilização das matérias primas.
- Preservação do meio ambiente.
- Minimizar custos de manutenção.
- Aumentar a vida útil das estruturas.
- Possibilitar concreto em ambientes agressivos.

“Lei da evolução de custos”.
Sitter –1984



DURABILIDADE DO CONCRETO

Gastos de países europeus com manutenção e reparos:

Pais	Gastos com construções novas	Gastos com manutenção e reparo	Gastos totais com construção
França	€ 85,6 bilhões (52%)	€ 79,6 bilhões (48%)	€ 165,2 bilhões (100%)
Alemanha	€ 99,7 bilhões (50%)	€ 99,0 bilhões (50%)	€ 198,7 bilhões (100%)
Itália	€ 58,6 bilhões (43%)	€ 76,8 bilhões (57%)	€ 135,4 bilhões (100%)
Reino Unido	€ 60,7 bilhões (50%)	€ 61,2 bilhões (50%)	€ 121,9 bilhões (100%)

(Ueda , Tanaka; 2007)

(Dados do ano 2004, p/ Itália ano de 2002)

FONTE: Revista Concreto - Ibracon

DURABILIDADE DO CONCRETO



Gastos com manutenção e reparos!!!!



DURABILIDADE DO CONCRETO



Gastos com manutenção e reparos!!!!

DURABILIDADE DO CONCRETO

Requisitos NBR15.575/2013 – Edificações Habitacionais - Desempenho

Prazos de vida útil de projeto

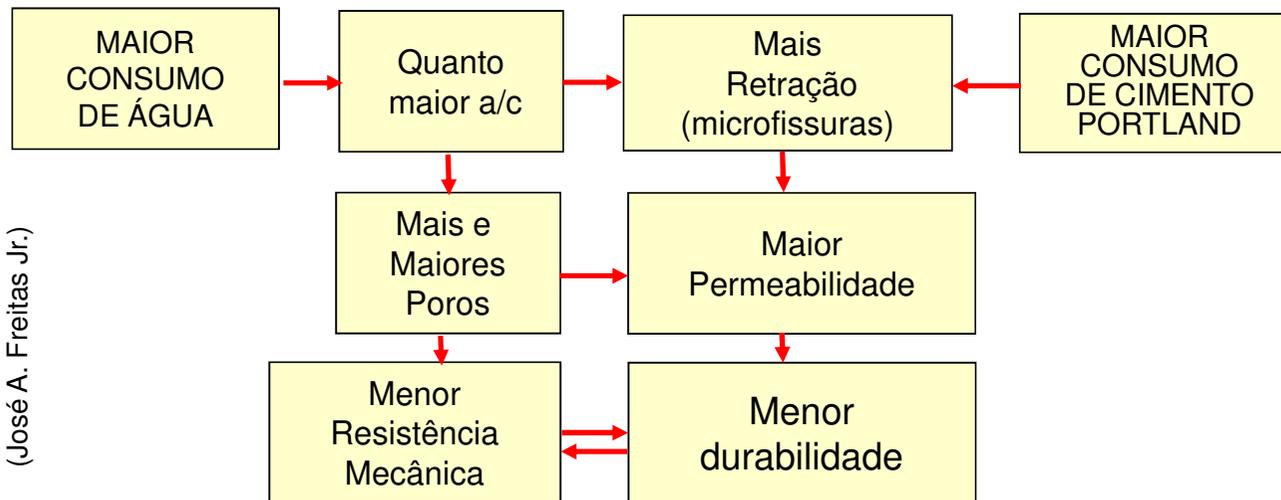
Sistema	VUP anos		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30

* 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.

CAUSAS PARA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Muitos fenômenos, químicos, eletro-químicos e físicos levam a deterioração, quase sempre estes fenômenos estão ligados a presença da água em contato com o concreto.

A seqüência de eventos que leva a deterioração do concreto está ligada a sua porosidade.



(José A. Freitas Jr.)

Concreto comum com microfissuras nas interfaces agregado/pasta, ressaltadas por um fluido fluorescente.



Mehta, P.K.; IBRACON 2009

CAUSAS PARA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

ÁGUA - características :

- Melhor solvente conhecido, carregando íons e gases.
- Aumenta de volume (cerca de 8,5%) ao solidificar.
- Tensão superficial - força elétrica que aproxima ou afasta outras moléculas

A permeabilidade do concreto é função dos poros e micro-fissuras presentes, sendo mais significativos os diâmetros dos poros que a quantidade destes.

CAUSAS PARA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Causas físicas:

- Deterioração por desgaste superficial
- Fissuração pela cristalização de sais nos poros
- Fissuração pelo efeito do congelamento da água
- Deterioração pela ação do fogo

Causas químicas:

- Hidrólise dos componentes da pasta
- Reações por troca de cátions
- Reações formadoras de produtos expansivos



CAUSAS FÍSICAS PARA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

CAUSAS PARA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Causas Físicas

Deterioração por desgaste superficial:

- Abrasão
 - atrito seco com partículas sólidas;
- Erosão
 - atrito com partículas sólidas em suspensão na água;
- Cavitação
 - “Implosão” de minúsculas bolhas de baixa pressão (vapor de água), originadas por fluxos de alta velocidade.

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL:

Abrasão: Atrito seco de detritos e tráfego contra o concreto.
Pavimentos.



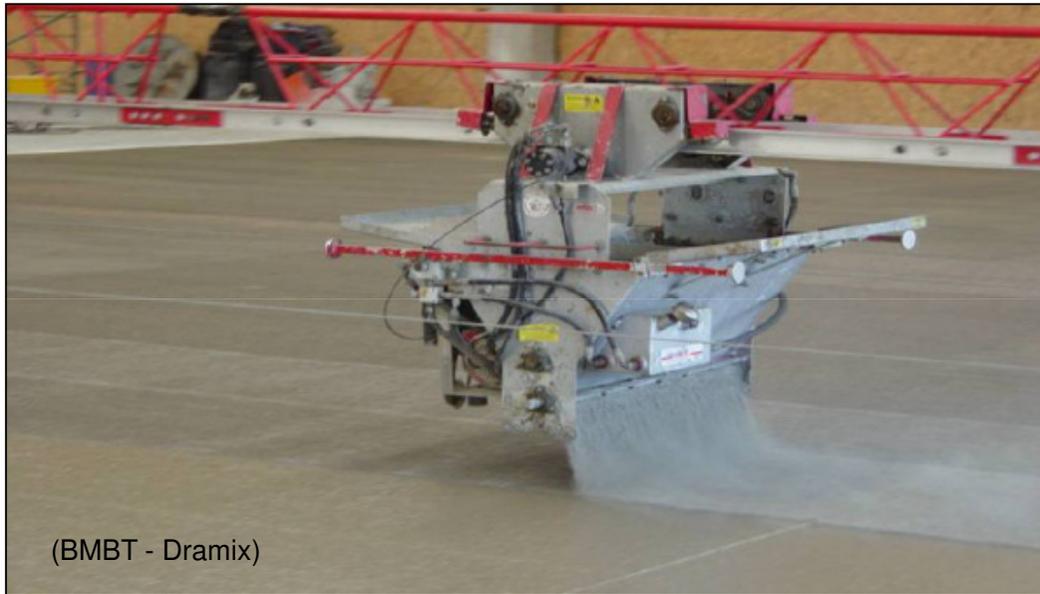
Desgaste superficial por abrasão em pavimento de concreto.

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL:

Pavimentos.

Abrasão:

Atrito seco de detritos e tráfego contra o concreto.

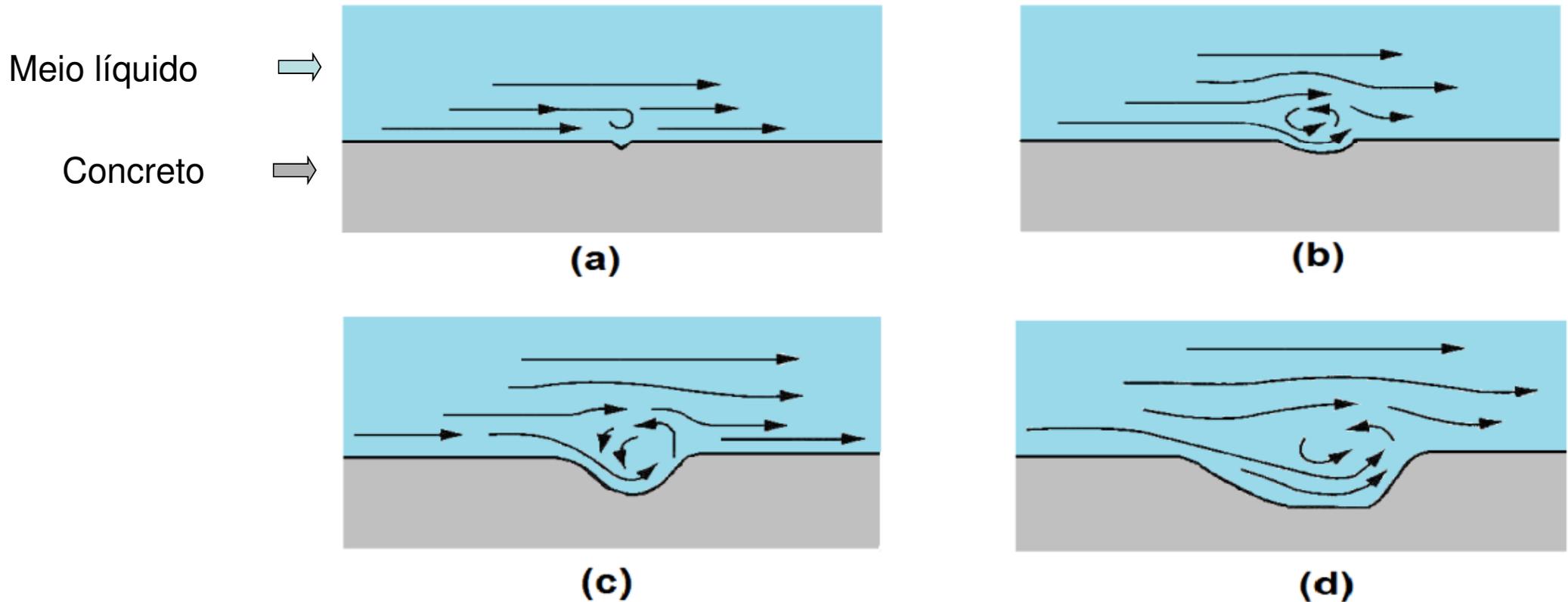


Endurecimento superficial com espalhamento de agregados na superfície do concreto.



CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL:

Erosão: Causada pelo movimento relativo do líquido e/ou o atrito de partículas sólidas em suspensão neste contra a superfície de concreto.



CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL:

Erosão: Atrito de partículas sólidas em suspensão em líquidos.
Canais, dutos , vertedouros pilares de pontes.



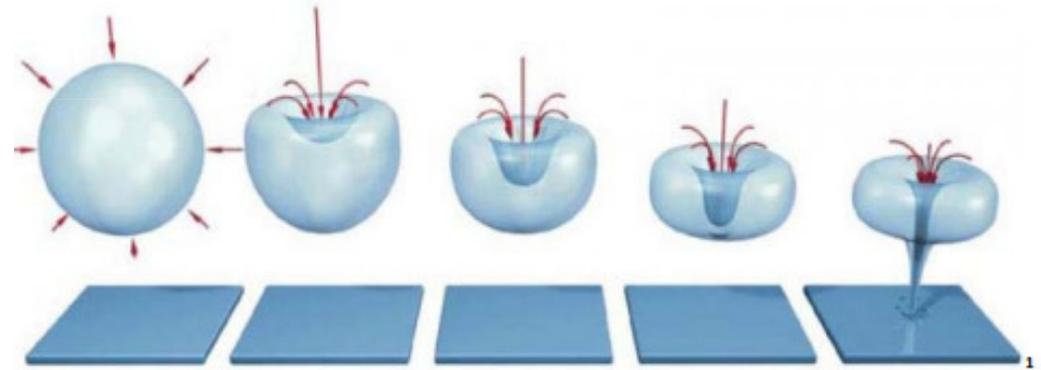
Erosão em galeria de água pluvial em região de degrau.

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL:

Cavitação:

“Implosão” de minúsculas bolhas, formadas por redução da pressão local de vapor, fluxos sob alta velocidade.

O fluxo de água e pequenas irregularidades das superfícies formam micro-bolhas de vapor instáveis, que na sequência implodem em campos de pressão mais elevada, causando micro-jatos e erosão.



Modelo de colapso da bolha e cavitação
(Turton, 1995 [Lush, 1987])

Bolha de cavitação (1) implodindo próximo a uma superfície sólida, projetando um jato (4) de líquido contra a superfície.

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL:

Cavitação: “Implosão” de minúsculas bolhas, formadas por redução da pressão local de vapor, fluxos sob alta velocidade.



www.portlandcement.com

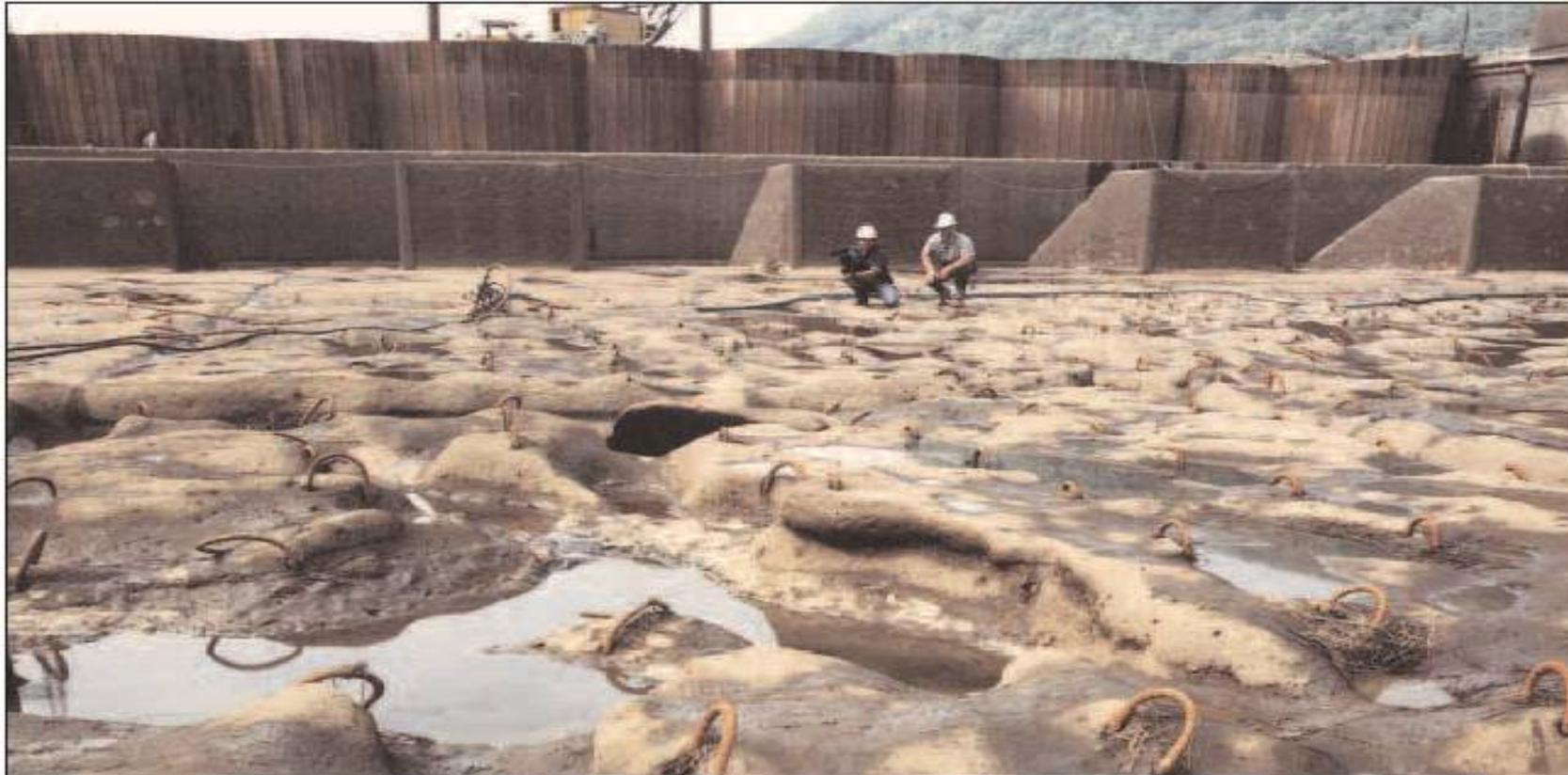
Bacia de dissipação, Kinzua
Pennsylvania



(Miranda, 1966)

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL

Erosão / Cavitação



(Silia Fume Association - Holland, 1996)

Bacia de dissipação, Kinzua Pennsylvania.

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL

Erosão / Cavitação



Efeitos da cavitação no vertedor de Itaipú.

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL

Erosão / Cavitação



<http://caltechbook.library.caltech.edu>

Dano no concreto por cavitação em duto forçado de 15,2m de diâmetro na represa Hoover (Arizona – EUA). O “buraco” tem 35m de comprimento por 9m de largura. Warnock (1945).

CAUSAS FÍSICAS - DESGASTE SUPERFICIAL:



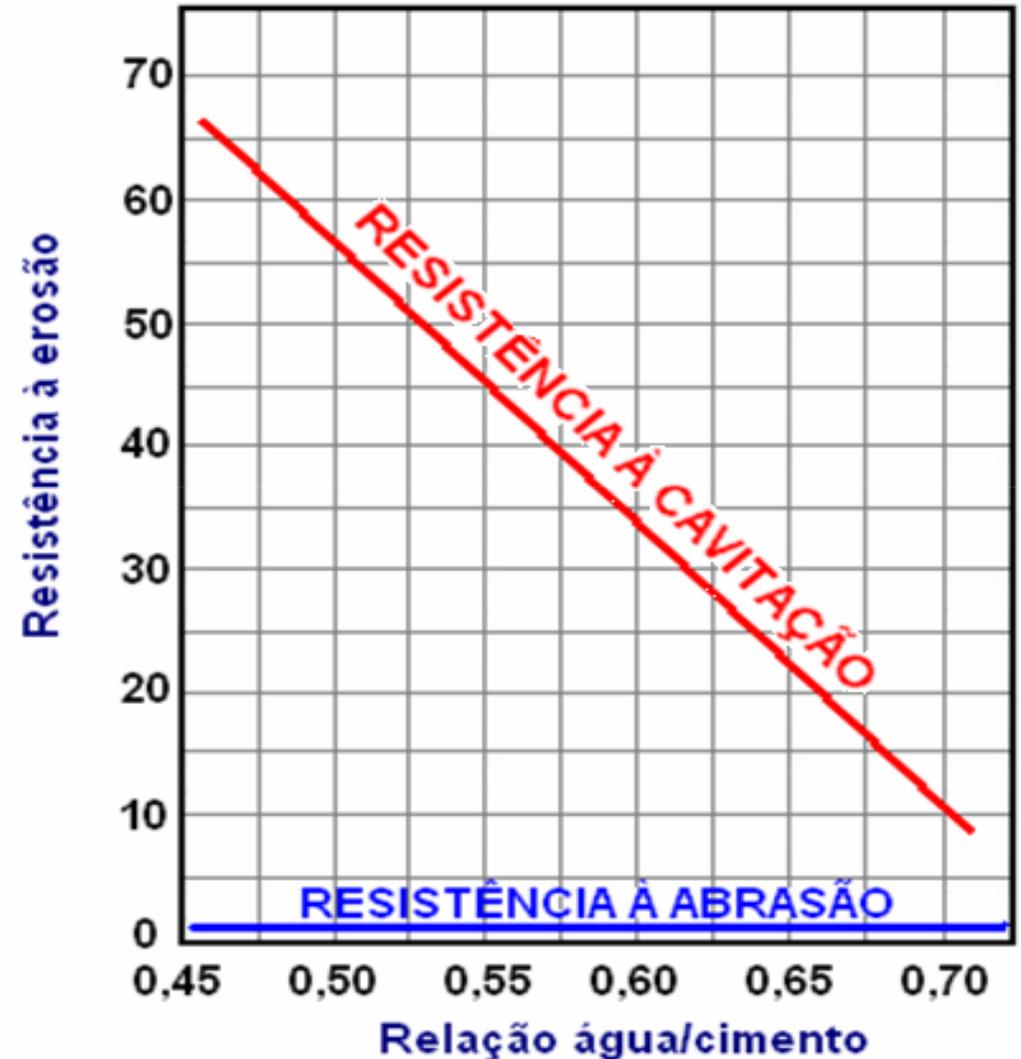
Efeitos da **cavitação** (Miranda, 1974)

CAUSAS FÍSICAS DESGASTE SUPERFICIAL:

A resistência do concreto à erosão varia na razão indireta da relação água/cimento.

(ENGEVIX Engenharia)

(V. Paulon, 1996)



CAUSAS FÍSICAS

CRISTALIZAÇÃO DE SAIS NOS POROS:

Concreto poroso absorve água salgada.
(solução de íons de Na^+ e Cl^-).

Diferença de concentrações de sais gera pressão osmótica dentro dos poros.

Quando evapora deixa cristais de sal sólido dentro dos poros.

Com a cristalização o sal aumenta de volume dentro dos poros, gerando tensões internas.

Sal (NaCl) - Água marinha
Anti-congelante para pavimentos

CAUSAS FÍSICAS

CRISTALIZAÇÃO DE SAIS NOS POROS:

Com a evaporação da umidade com sal em solução, o sal permanece e recristaliza nos poros fazendo com que ocorra descamação e fragmentação do concreto.



Descamação



Fragmentação

CAUSAS FÍSICAS - CONGELAMENTO DA ÁGUA:

Concreto permeável absorve a água no estado líquido.

Temperaturas negativas formam gelo nos poros causando um aumento de volume da água em 8,5%.

Congelamento também gera pressões osmóticas.

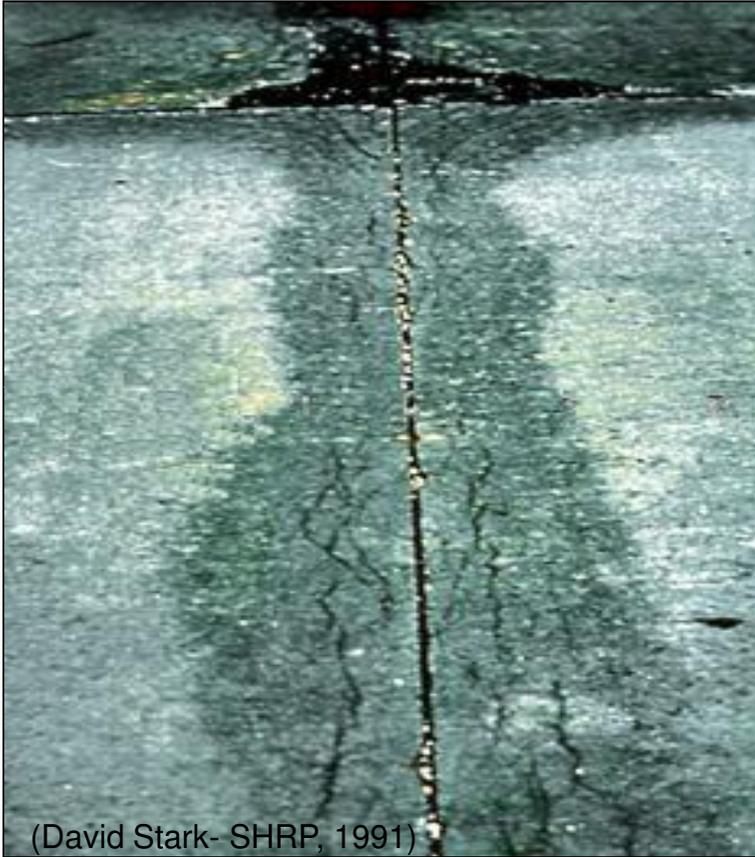
Tensões internas decompõe o concreto.



(José Marques Filho)

Obras hidráulicas

CAUSAS FÍSICAS - CONGELAMENTO DA ÁGUA :



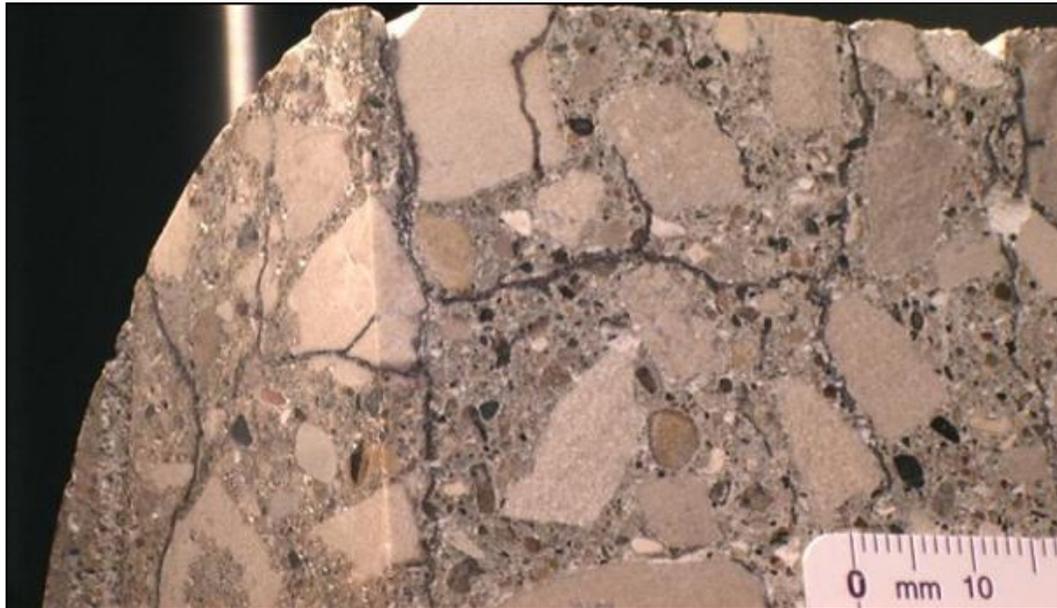
Pavimentos



Pilares e bases

CAUSAS FÍSICAS - CONGELAMENTO DA ÁGUA :

Pavimentos



Fissuras verticais em pavimento típicas do fenômeno gelo-degelo.



CAUSAS FÍSICAS - CONGELAMENTO DA ÁGUA :

Minimização dos efeitos:

Redução da porosidade e permeabilidade – redução do a/c

Incorporação de ar, as pequenas bolhas funcionam como “válvula de escape” p/ crescimento de volume do gelo.



CAUSAS FÍSICAS - CONGELAMENTO DA ÁGUA :

Minimização dos efeitos:

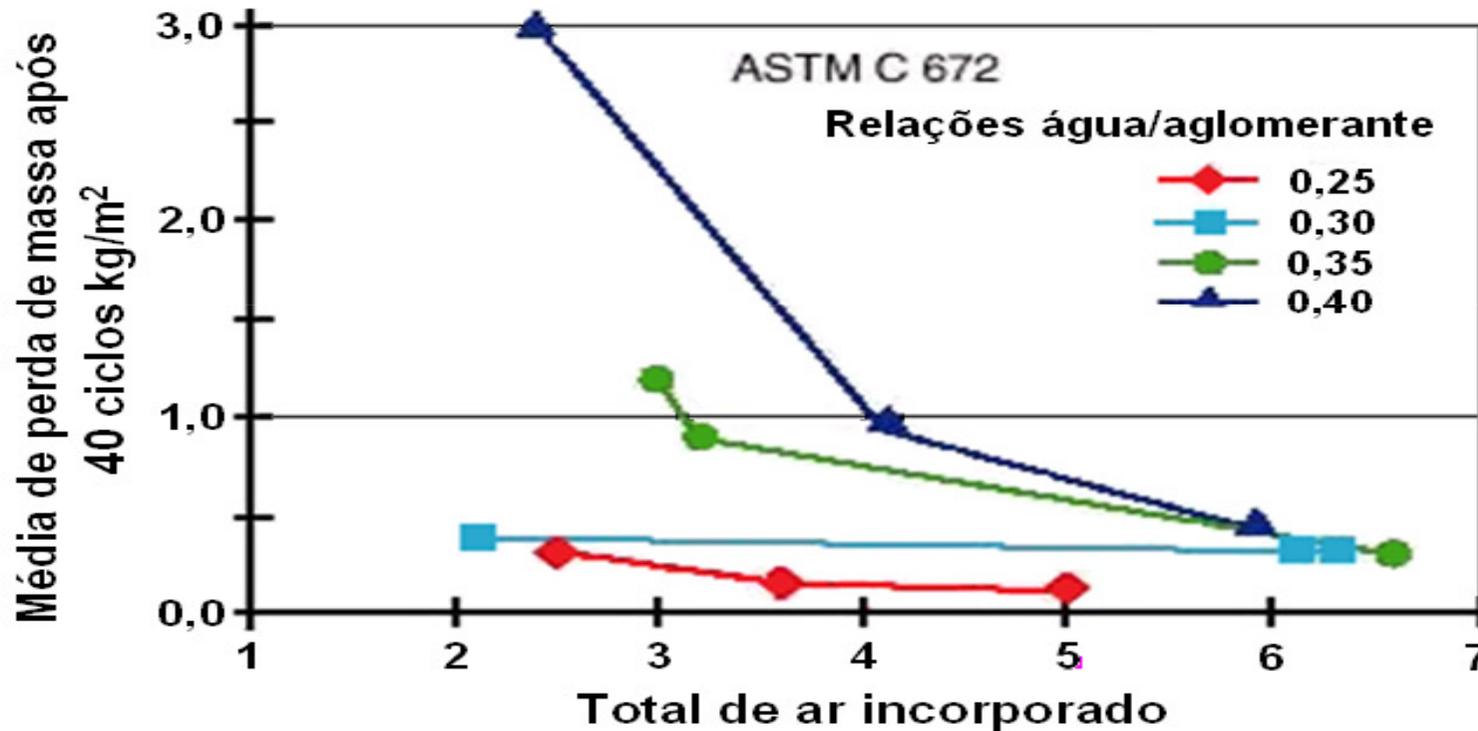
Recomendação de Incorporação de Ar

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Conteúdo de ar (%)	
	Exposição severa	Exposição moderada
9	7,5	6
12,5	7	5,5
19	6	5
25	6	4,5
37,5	5,5	4,5
50	5	4
76	4,5	3,5

CAUSAS FÍSICAS - CONGELAMENTO DA ÁGUA :

Minimização dos efeitos:

Incorporação de Ar



www.cement.ca

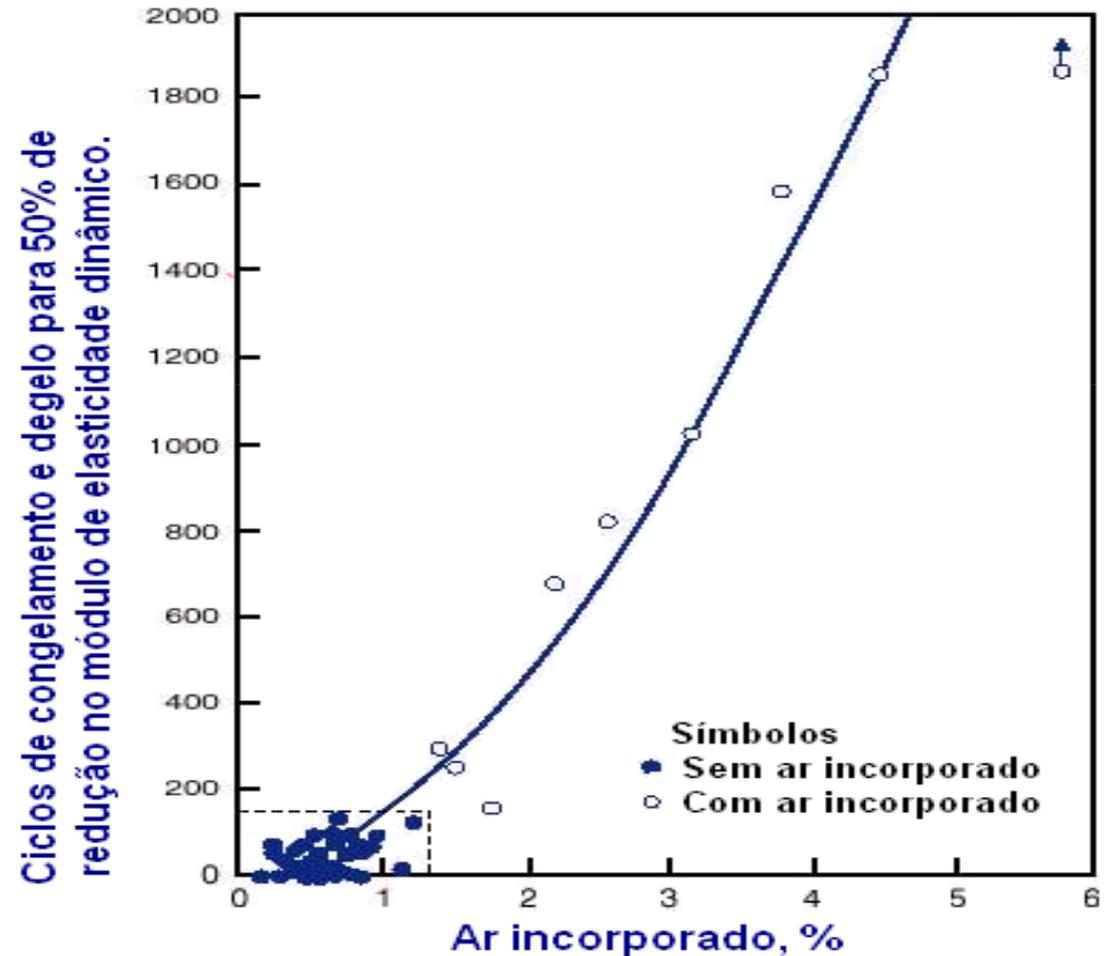
Perda de massa depois de 40 ciclos de gelo/degelo para concretos com diferentes % de ar incorporado.

CAUSAS FÍSICAS - CONGELAMENTO DA ÁGUA :

Minimização dos efeitos:

Incorporação de Ar

Efeitos do ar incorporado sobre a resistência do concreto ao gelo/degelo em ensaios de laboratório. Os concretos foram feitos com cimentos de diferentes finuras e composições, com vários consumos de cimentos e relações a/c.



(Bates and others 1952, and Mielenz and Lerch 1960)

Efeito do gelo-degelo em pisos de concreto



CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

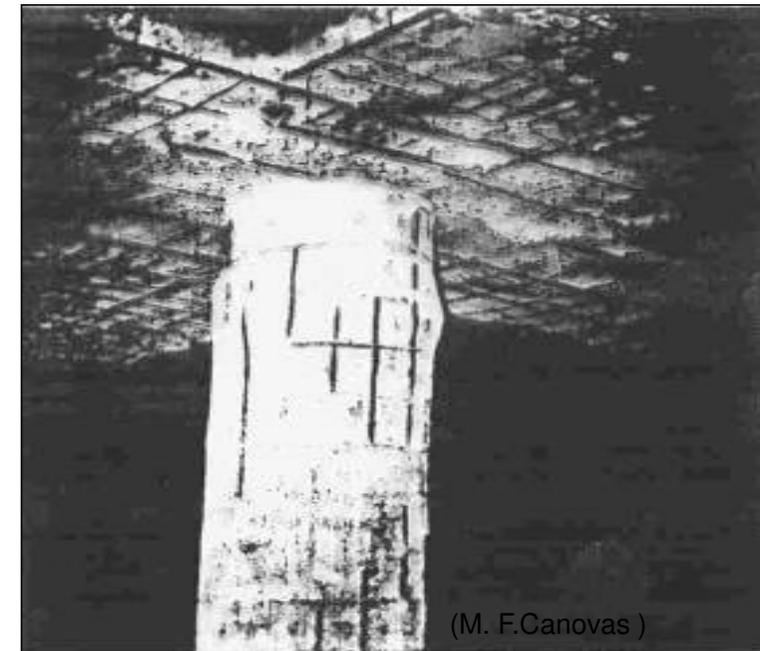
Concreto material incombustível - sob temperaturas elevadas, alguns componentes se decompõem.

Incêndios, atingem temperaturas superiores aos 1.000°C,

Fatores afetam a resistência do concreto armado ao fogo:

Na pasta de cimento:

- Temperatura >100°C decompõe a etringita,
 - 500 a 600°C decompõe Ca(OH)_2 ,
 - A 900°C decompõe C-S-H.
- Quanto mais água dentro do concreto (menor idade), mais lento será o crescimento de temperatura, a 100°C aparecem gases causando lascamento.



CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

Nos Agregados :

Alguns são mal condutores de calor retardando o crescimento das temperaturas, outros tem coeficiente de dilatação muito diferente da pasta – fragiliza a zona de transição.

Nas estruturas:

Peças mais volumosas, mais lento será o seu aquecimento, diminuindo a profundidade da decomposição do material.

No concreto armado:

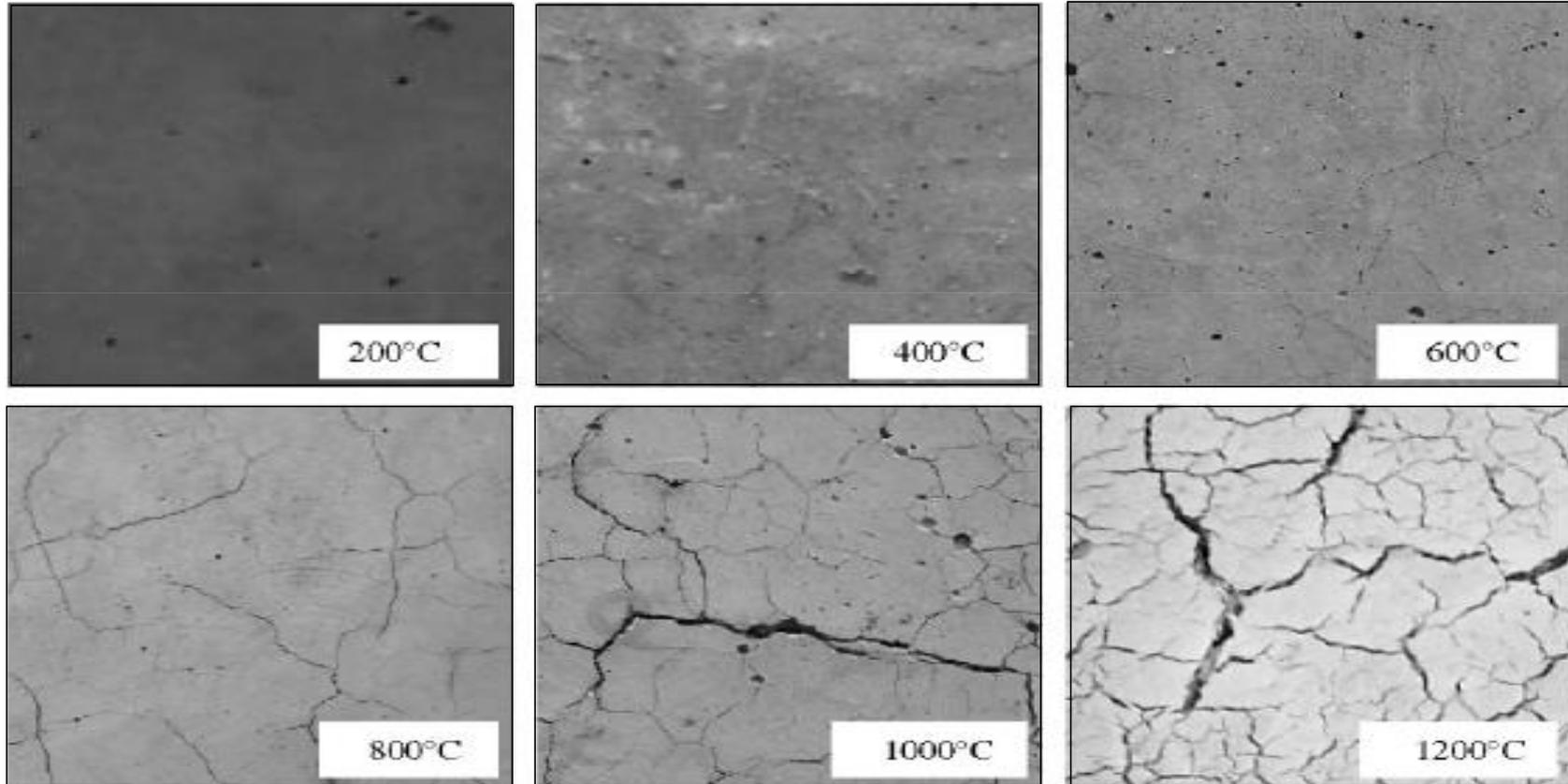
Coef. dilatação do aço é semelhante mas não igual ao do concreto, condutibilidade térmica do aço é superior. Acima dos 100°C a diferença aumenta muito.

Aço CA-50 perde significativa resistência acima de 700°C.

CA-60 perde significativa resistência a temperaturas bem inferiores. Cabos de protensão perdem maior parte da resistência até 700°C.

CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

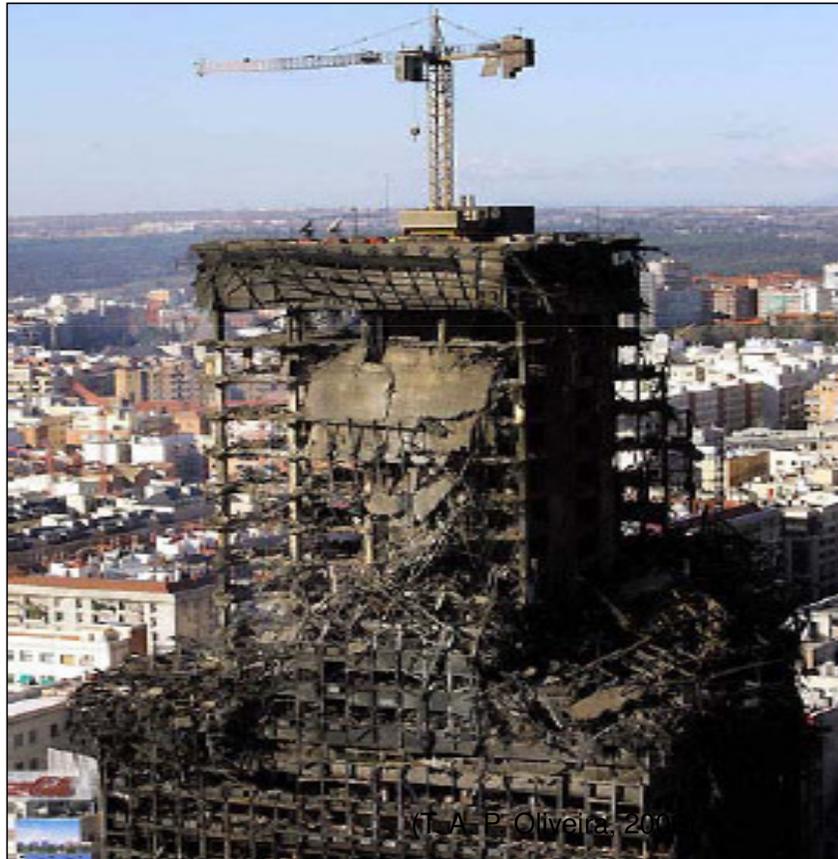
Textura superficial do concreto elevado a diversas temperaturas



(COSTA C.N., 2002)

CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

Ensaio de comportamento da estrutura frente a um incêndio.



Ed. Windsor, Madri, Espanha em
2005.

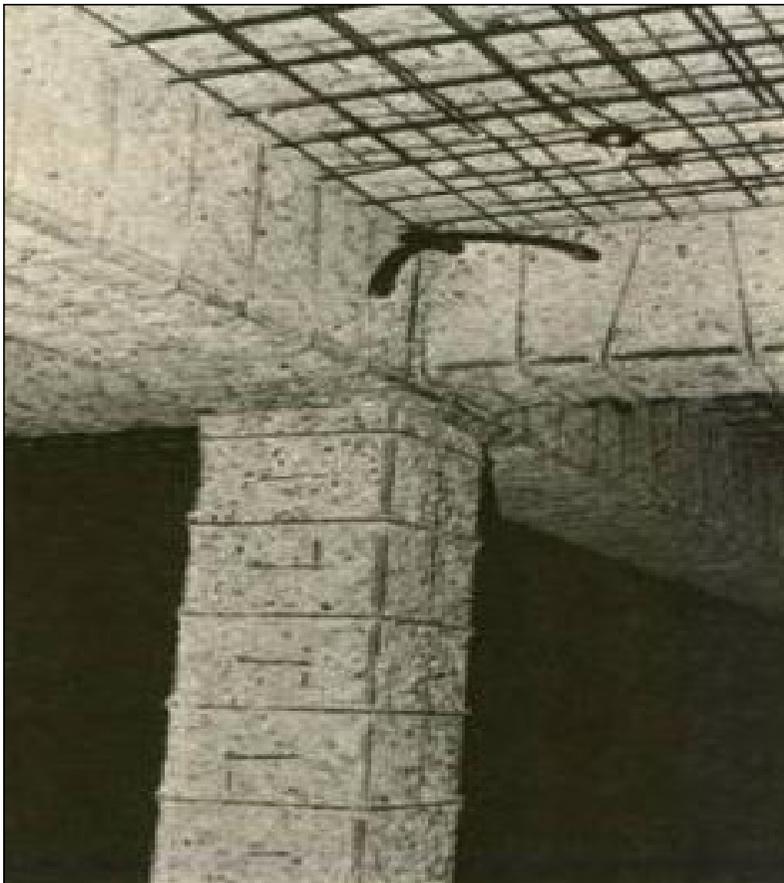
(Taerwe L. *et al.*, 2006)

Ação do fogo em grandes estruturas



CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

Efeito do fogo em estruturas de concreto.



Pilar experimental

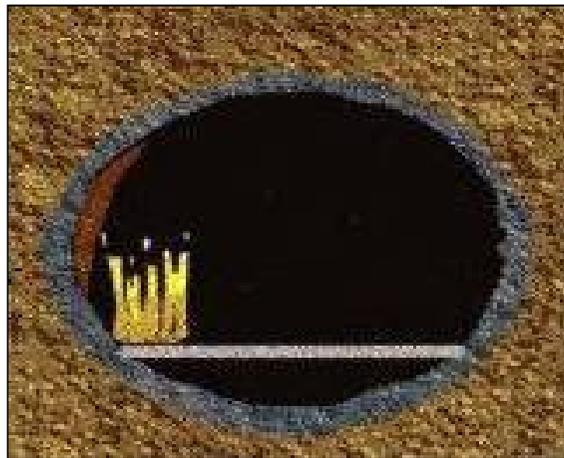
CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

Lascamento de concreto: (*Spalling*)

Incêndios levam a bruscas elevações da temperatura.

A água nos poros do concreto forma do vapor, que cria tensões internas elevadas dentro das argamassas e do concreto.

A pressão de vapor dentro destes materiais leva ao “*spalling*” ou lascamento.



Seqüência de incêndio em túnel – *spalling* ou lascamento.

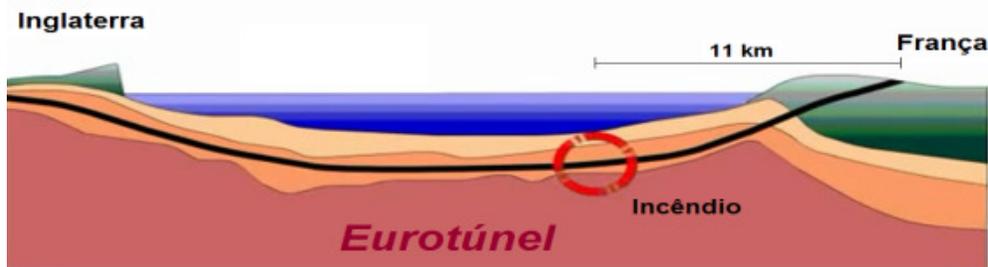
(J. Tanesi e A. Nince – TECHNE set./2002)

CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

Efeito do fogo em estruturas de concreto.



Spalling no Eurotúnel 18/11/1996



(Costa et al, 2002)

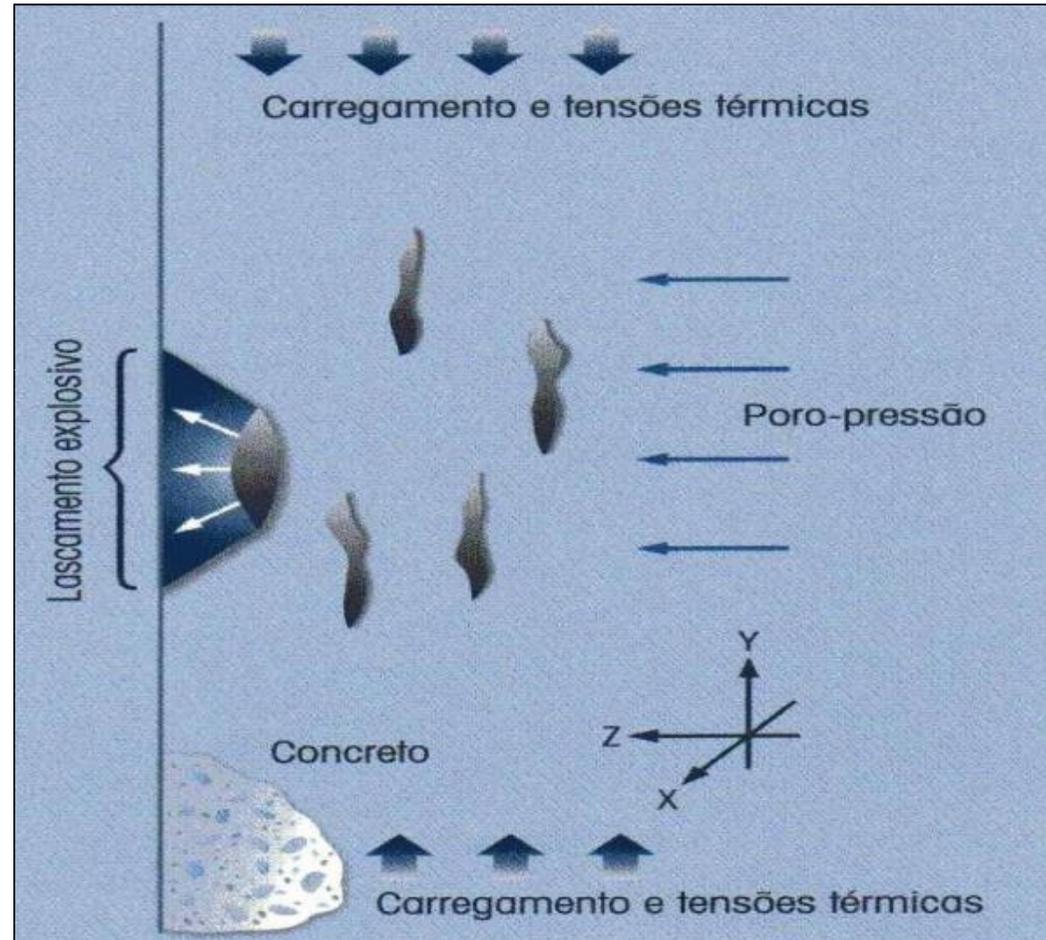


(Costa et al, 2002)

Cavidades devido ao lascamento no *Mont Blanc Tunnel* – França/ Itália em 1999.

CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

Fenômeno do lascamento
“*spalling*”



CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:



(Paulo Barbosa, PhDesign)

Viaduto em SP, 1998



CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

Estrutura recuperada de ed. em Curitiba

Desintegração do concreto pelo fogo

Lixiviação do Ca(OH)_2

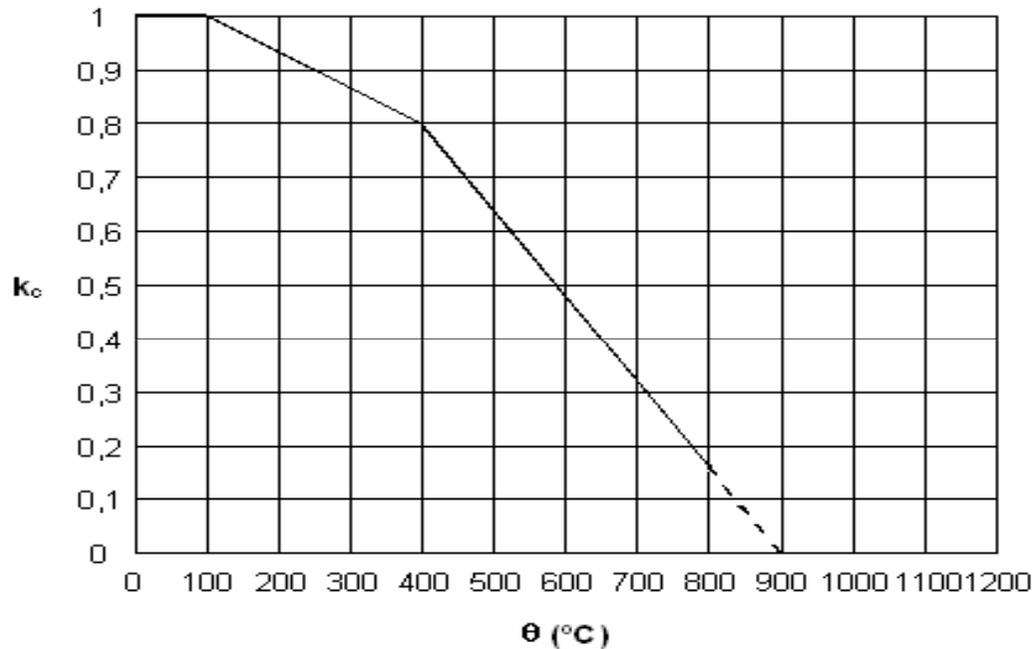


Dano em lajes e vigas por queima de madeirame em obra parada.

Reconstituição completa do concreto e armaduras.

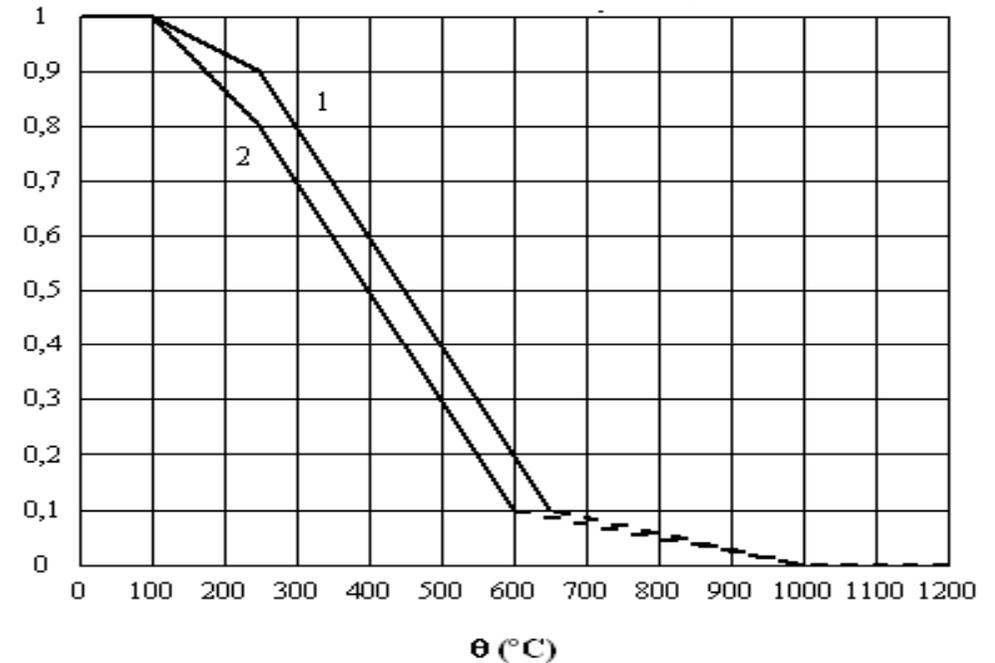
CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:

NBR-6118 CONCRETO



$k_c(\theta)$ é o fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ .

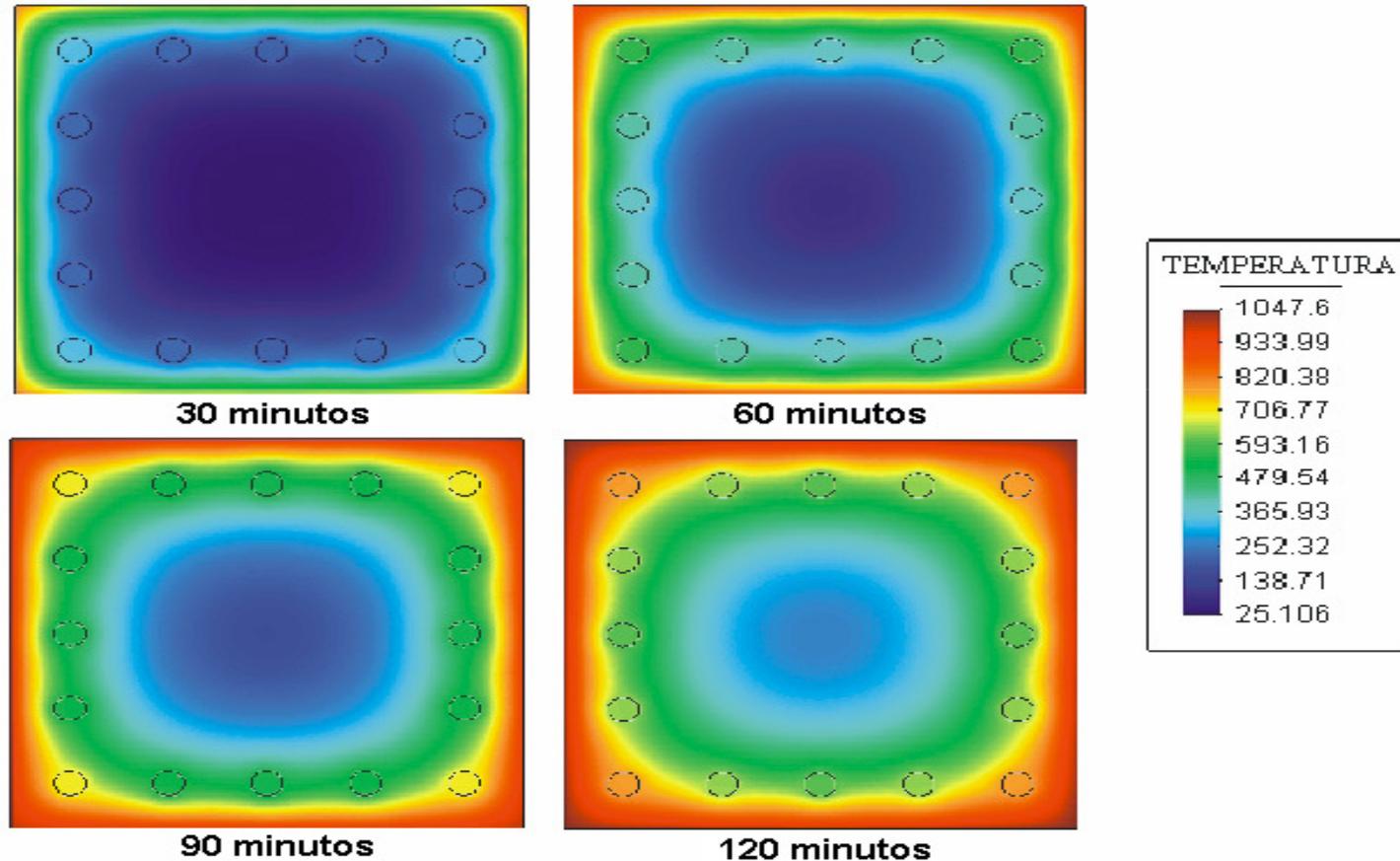
NBR-6118 AÇO



$k_p(\theta)$ é o fator de redução da resistência do aço de armadura ativa na temperatura θ .

Efeitos da temperatura sobre a resistência do concreto e do aço

CAUSAS FÍSICAS - AÇÃO DO FOGO:



Distribuição da temperatura em um elemento estrutural Programa THERSYS –
Ribeiro (2004)

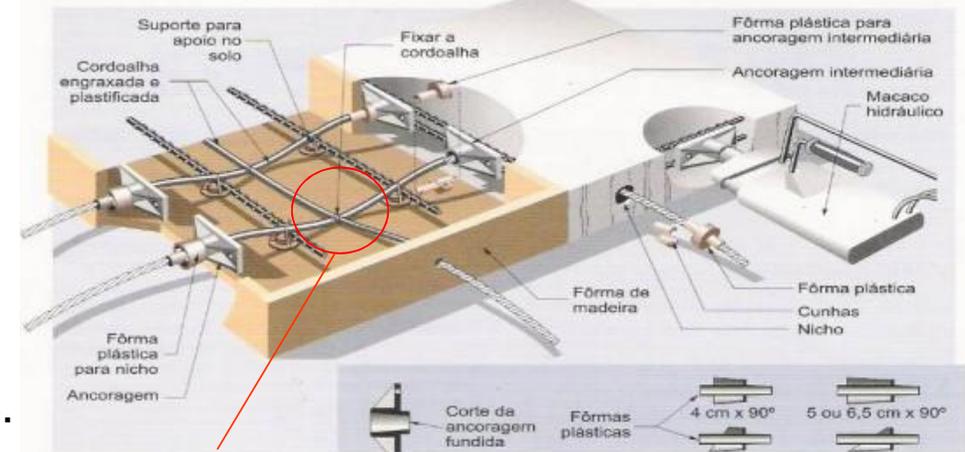
AÇÃO DO FOGO EM LAJES PROTENDIDAS COM CORDOALHAS ENGRAXADAS

Não há bainhas, as cordoalhas tem poucos mm de cobrimento nas superfícies inferiores das lajes.



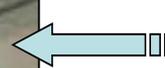
Aço altamente encruado.

Projeto p/ 120 minutos de tolerância em incêndios.

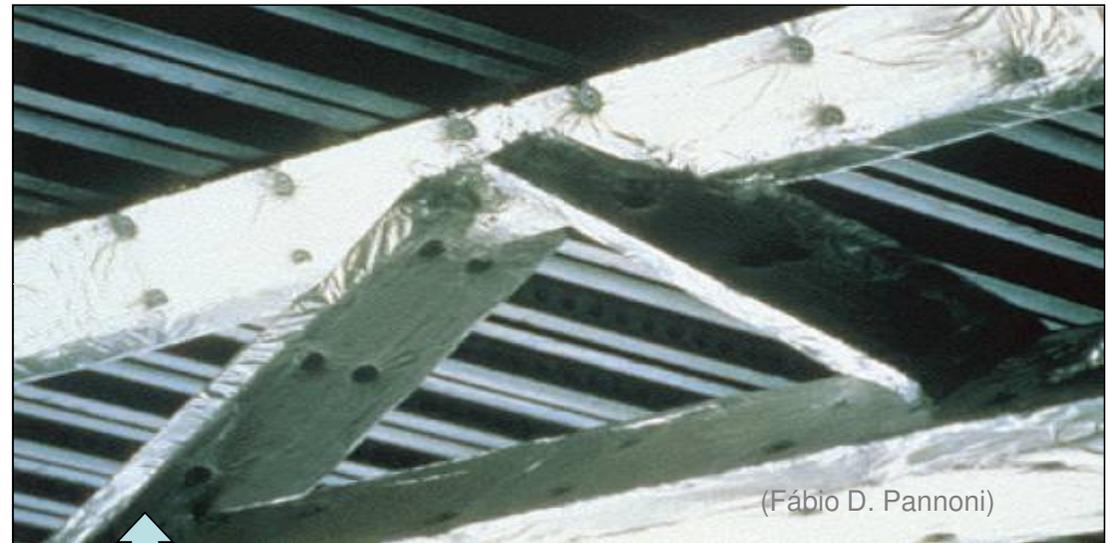


Cobrimento mínimo

PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS CONTRA O FOGO:



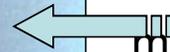
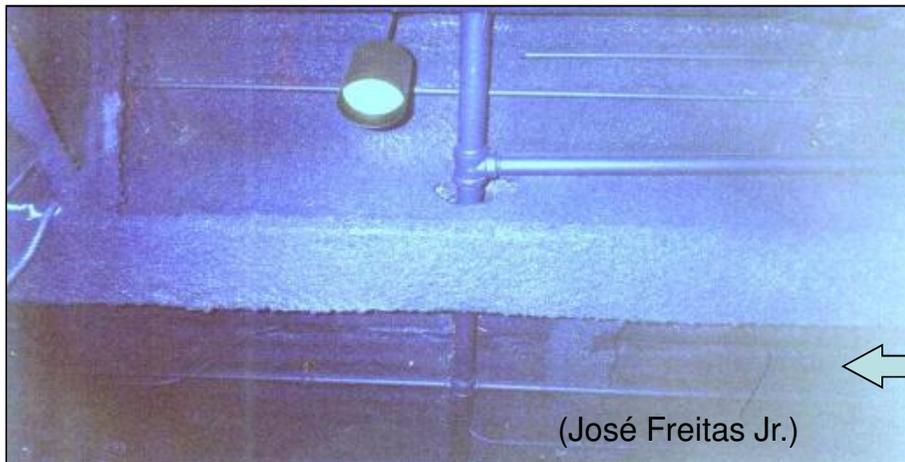
Projeção de argamassa com fibras minerais ou vermiculita.



(Fábio D. Pannoni)



Revestimento com mantas sílico-aluminosas.



Isolamento térmico de argamassa com fibras minerais em uma viga metálica da estrutura do WTC-NY

(José Freitas Jr.)



CAUSAS QUÍMICAS PARA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

DETERIORAÇÃO POR REAÇÕES QUÍMICAS:

Compostos da pasta como: **hidróxido de cálcio** Ca(OH)_2 , íons alcalinos Na^+ , K^+ e OH^- e álcalis K_2O e Na_2O , nos fluídos dos poros elevam muito o **pH** (12,5 a 13,5).

Qualquer meio com pH diferente é agressivo ao concreto.

pH abaixo de 6 é bastante nocivo, decompõe a pasta.

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Águas de como rios de montanhas, lagos de degelo, etc., não contém quase nada dissolvido, portanto tem muita facilidade para decompor por hidrólise os componentes da pasta - **“ataque por água pura”**.

REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Hidrólise da pasta solubiliza em primeiro lugar o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que por lixiviação é transportado pela água até a superfície do concreto onde este carbonata devido ao contato com o CO_2 do ar, gerando eflorescências esbranquiçadas:



Quando o pH está entre 8,5 e 9,0 com excesso de CO_2 , acontece a formação do bicarbonato de cálcio que é 145 vezes mais solúvel na água:



REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Barragem do Vossoroca:

Barragem de gravidade com altura 21 m por 152 m de comprimento, encontrando-se com aproximadamente 40 anos de idade na época.



(José Marques Filho - COPEL)

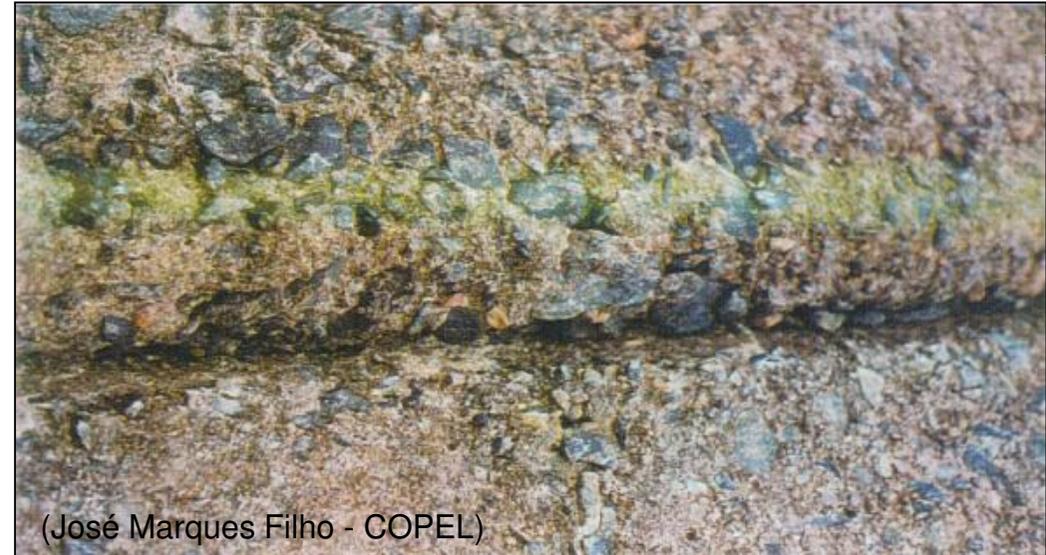
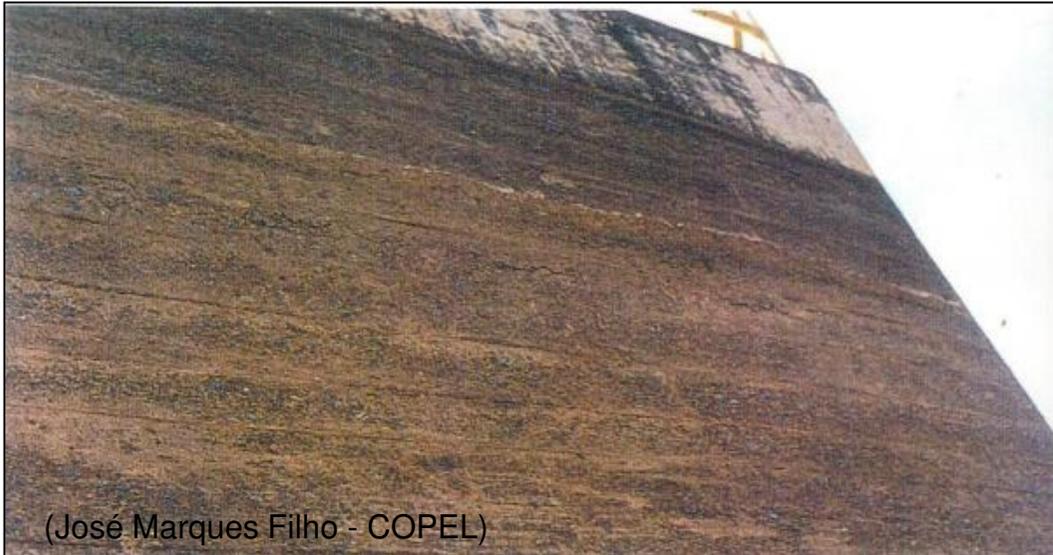
Acúmulo de incrustações de material carbonatado ao longo das juntas frias, a jusante da barragem 33 m³ de material.

REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Barragem do Vossoroca - Patologias apresentadas:

Paramento de montante superficialmente decomposto, com os agregados perfeitamente visíveis em diversas regiões, juntas frias perfeitamente delineadas e indicando permeabilidade pela região.



Paramento de montante e detalhe de porosidade e junta de concretagem.

REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Barragem do Vossoroça - Ensaios de verificação :

Extraídos testemunhos verticais, (diâmetro 5cm) que apresentaram grande decomposição do concreto nas regiões das juntas frias de concretagem, mais na região de jusante.

As amostras esfarelavam nas regiões das juntas.

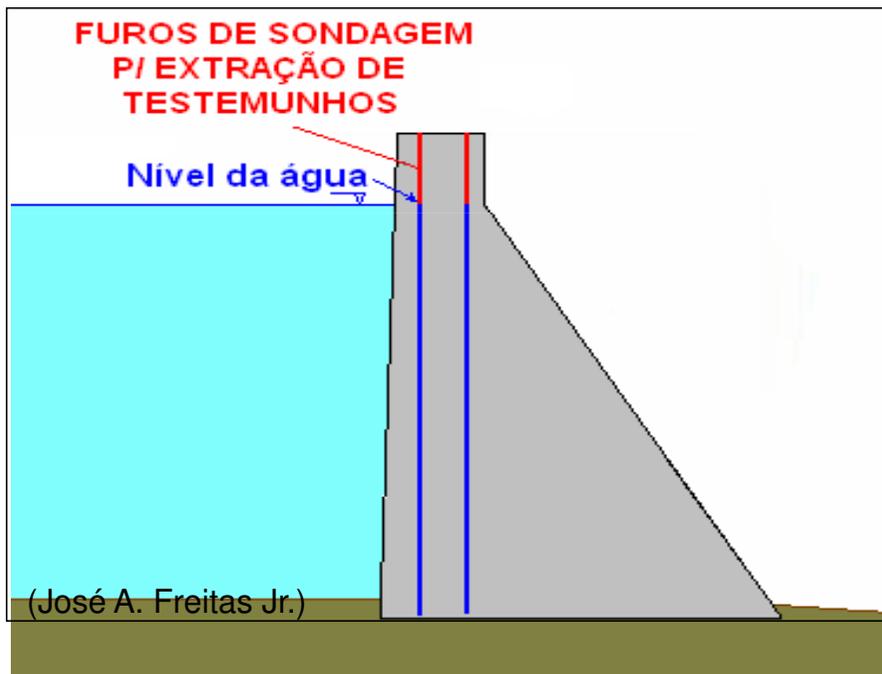
O concreto apresentava até **18%** de perda de massa.

A barragem encontrava-se saturada de água.

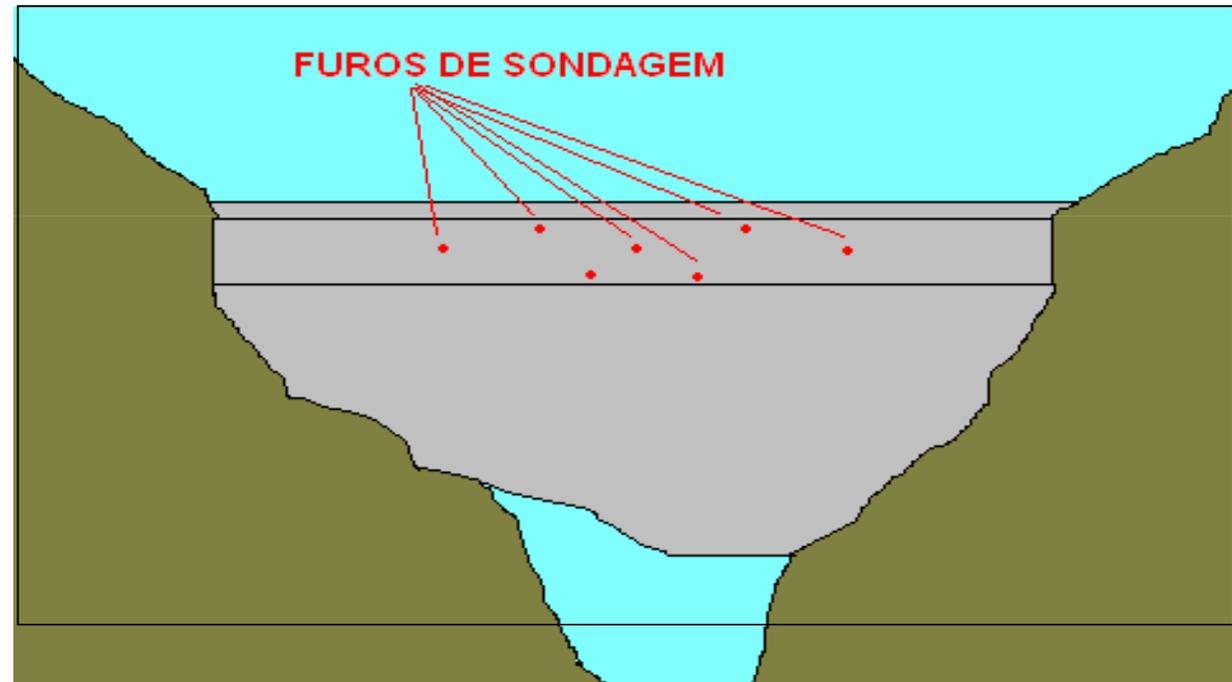
REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Barragem do Vossoroça - Ensaios de verificação :



CORTE



PLANTA

REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Barragem do Vossoroca:

Reparos executados :

Esvaziado o reservatório, deixando 5m de água, p/ facilitar a impermeabilização do bordo de montante.

Feitos furos a cada 4m e injetado pasta de cimento com sílica-ativa (para minimizar a permeabilidade e a retração). Alguns orifícios mais de 30m³ de material.

Retorno com perfurações a cada 2m. Regiões mais afetadas com furos a cada metro.

Bordo de montante impermeabilizado após jateamento e limpeza.

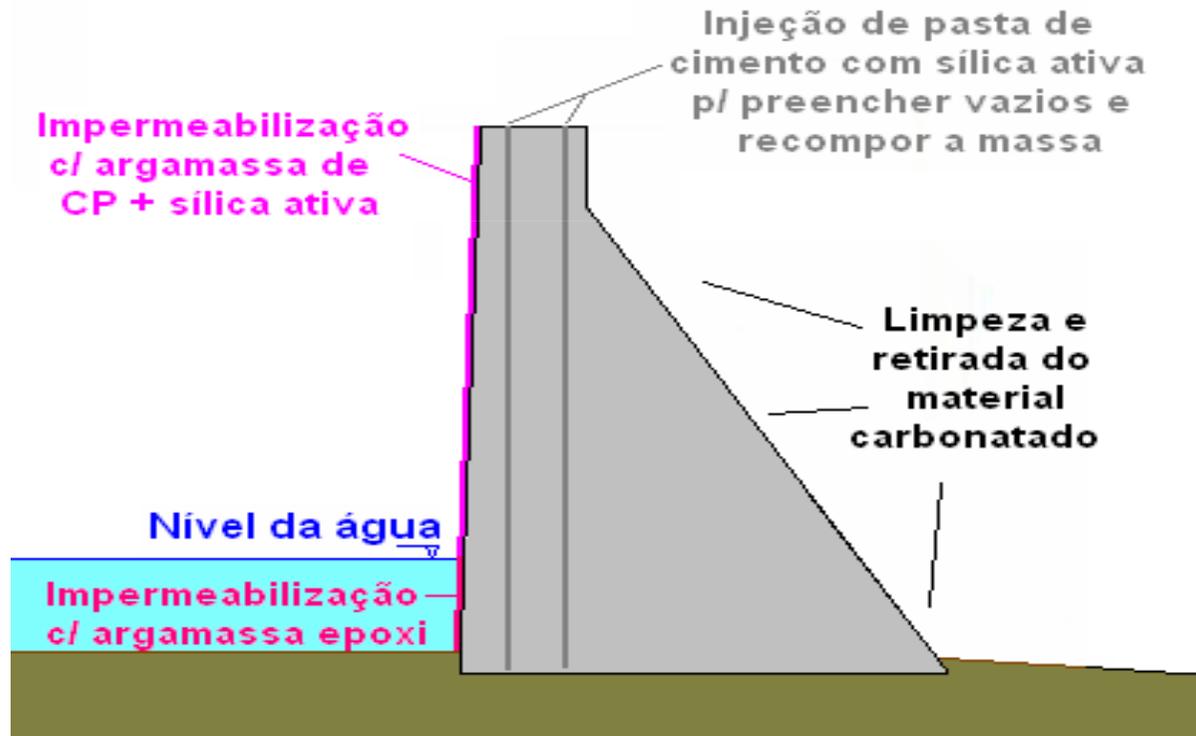
Impermeabilizado acima da linha da água com argamassa de cimento e sílica-ativa, embaixo d'água com argamassa epóxi.

REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Reparos executados :

Barragem do Vossoroca:



CORTE

(José A. Freitas Jr.)

REAÇÕES QUÍMICAS

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA:

Edifício da FAU USP



R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Reações onde compostos ácidos atacam os componentes básicos da pasta formando sais que são solubilizados na água.



Exemplos:

Ataque por ácido carbônico (H_2CO_3), com $\text{pH} < 7$, originário da decomposição de matéria orgânica em água:



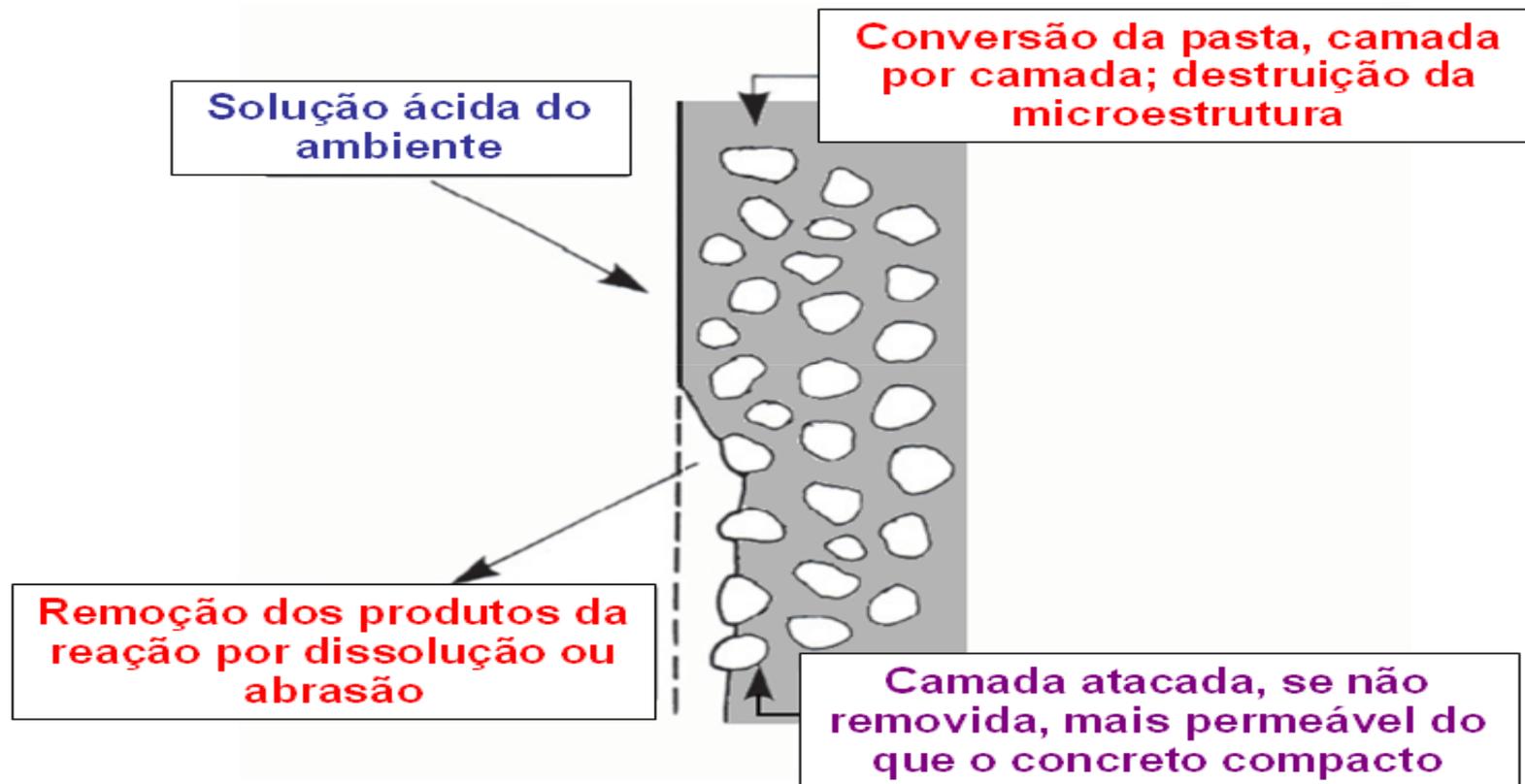
R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Como em geral, nestes casos há CO_2 livre na água ocorre a formação do bicarbonato de cálcio, que é extremamente solúvel em água:



Reação típica em estações de tratamento de esgoto, assim como em obras com contato direto com águas ricas em matéria orgânica.

R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:



Esquema de ataque do concreto por ácidos

(Adaptado de CEB, 1989)

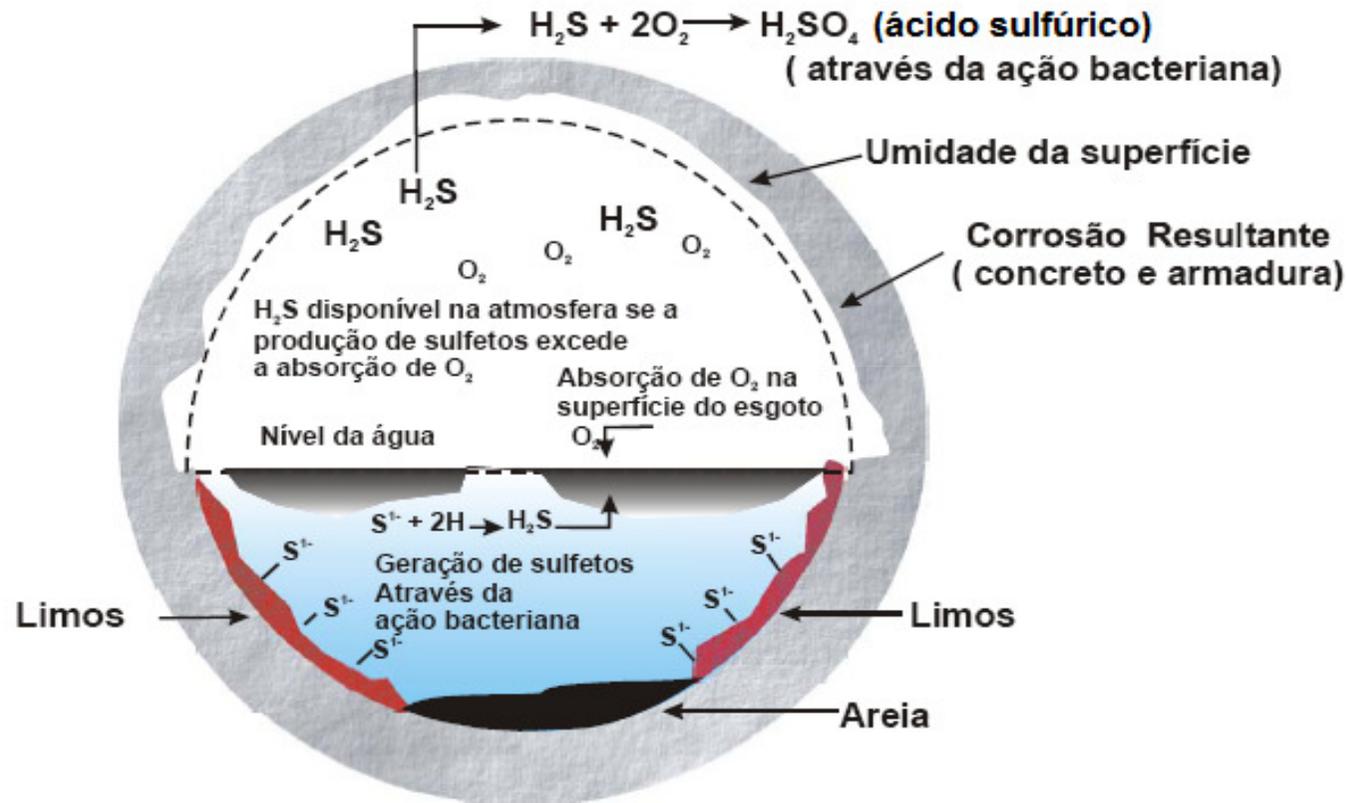
R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Estação de tratamento de esgoto



Ataque por ácido sulfúrico de origem biogênica

R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:



Formação de ácido sulfúrico em coletores de esgoto

(Ludwig & Almeida, 1979, citado por Helene, 1986, p.20)

R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Tubulação de efluentes de esgoto



www.nm.zfm-hannover.de

Equipamento de vídeo, remotamente controlado, que gravou as imagens.



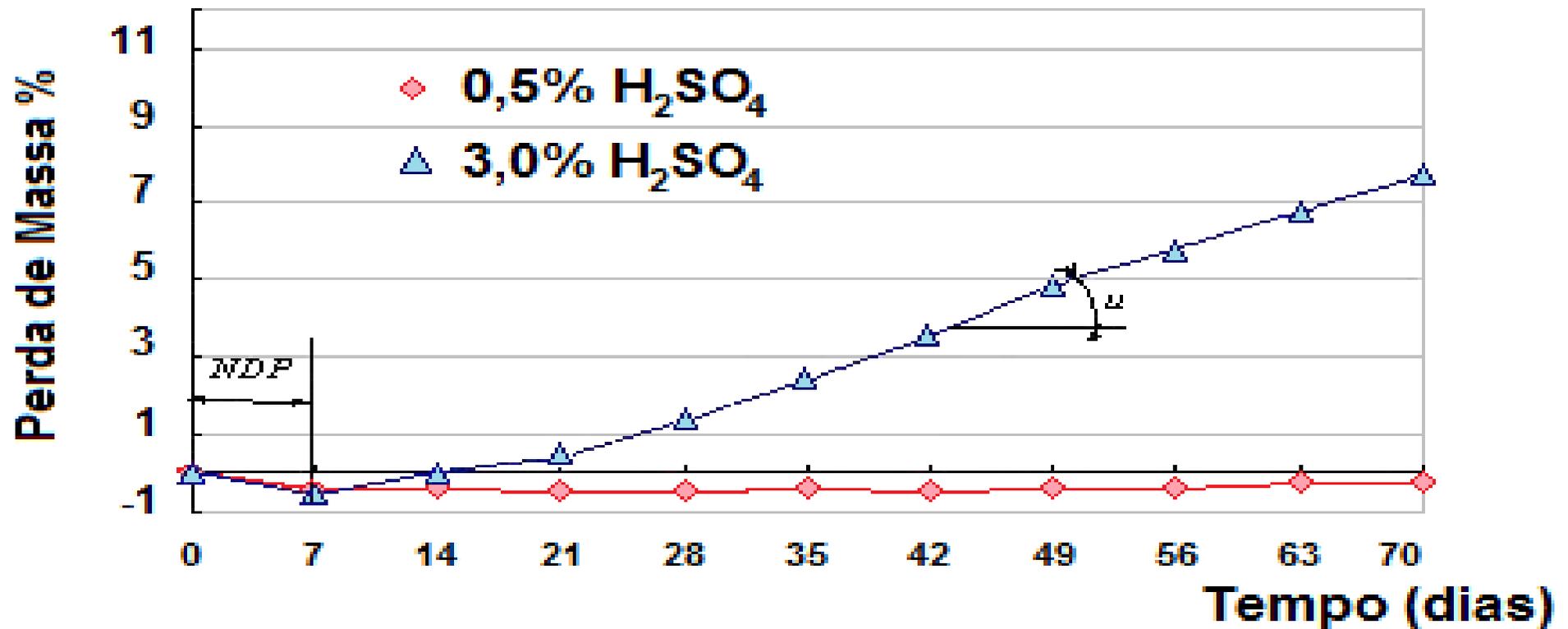
R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Parede de galeria de efluentes de esgoto



R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Perda de massa por ataque de ácido sulfúrico



(a/c=0,35 Temperatura 0°C)

R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Ataque por cloreto e sulfato de amônia, provenientes de fertilizantes, que também geram compostos solúveis:



Ataque por o ácido clorídrico (muriático), bastante usado na limpeza de obras:



R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Ácido clorídrico (muriático) na limpeza de obras:

Desincrustante, remove excessos de concreto e argamassas.



Aplicação excessiva e repetida ataca o concreto e corrói o aço.

R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Efeitos do ataque por ácidos:



- Remoção da pasta e exposição dos agregados
- Aumento da porosidade do concreto
- Diminuição da resistência mecânica do concreto
- Despassivação e posterior corrosão das armaduras.

Remoção da pasta e exposição dos agregados

R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:



Atmosfera ácida das grandes cidades



Interior de reator tipo RALF para tratamento de esgoto.

R. QUÍMICAS - REAÇÕES POR TROCAS DE CÁTIONS:

Ataque ácido em indústria:
Pequeno cobrimento de concreto expõe armaduras a produtos químicos ácidos usados para branquear tecidos em indústria têxtil. Ocorre exposição dos agregados pela lixiviação da pasta de cimento.



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS :

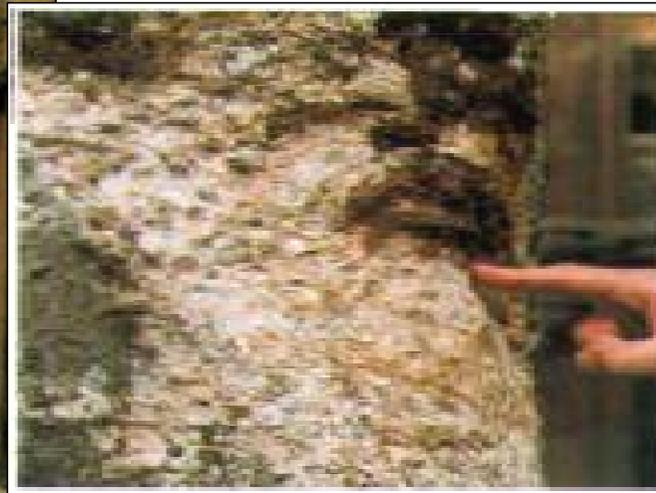
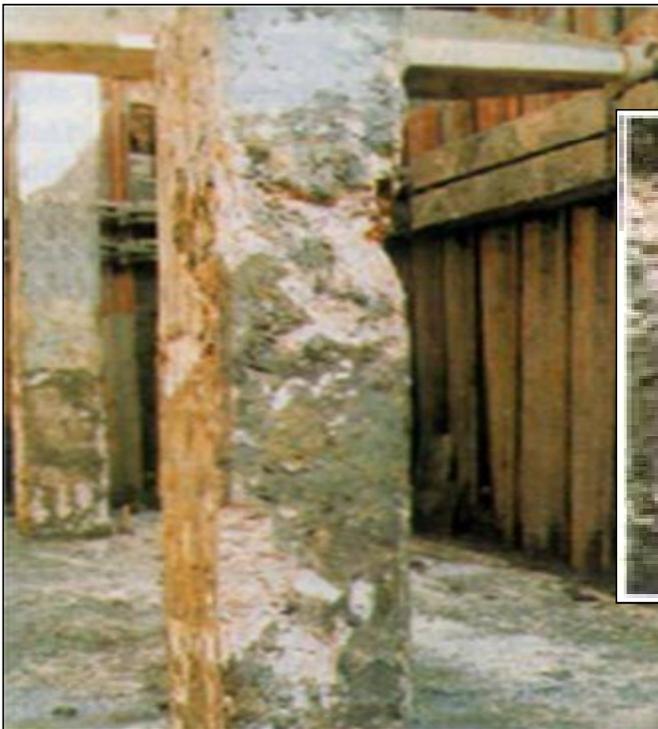
Reações que decompõem o concreto gerando um aumento de volume interno, além da decomposição química há uma destruição física da estrutura do concreto pela fissuração e o lascamento.

Fenômenos causadores de expansões dentro do concreto:

- Ataques por sulfatos (também é uma troca de cátions);
 - Reações álcali-agregado;
- Hidratação retardada de cal (CaO) e óxido de magnésio (MgO);
 - Reações de corrosão das armaduras de aço.

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:

Sulfatos (SO_4^{--}) podem existir em: solos (gipsita), em efluentes industriais, em produtos para a agricultura (sulfato de amônia) e na água do mar.

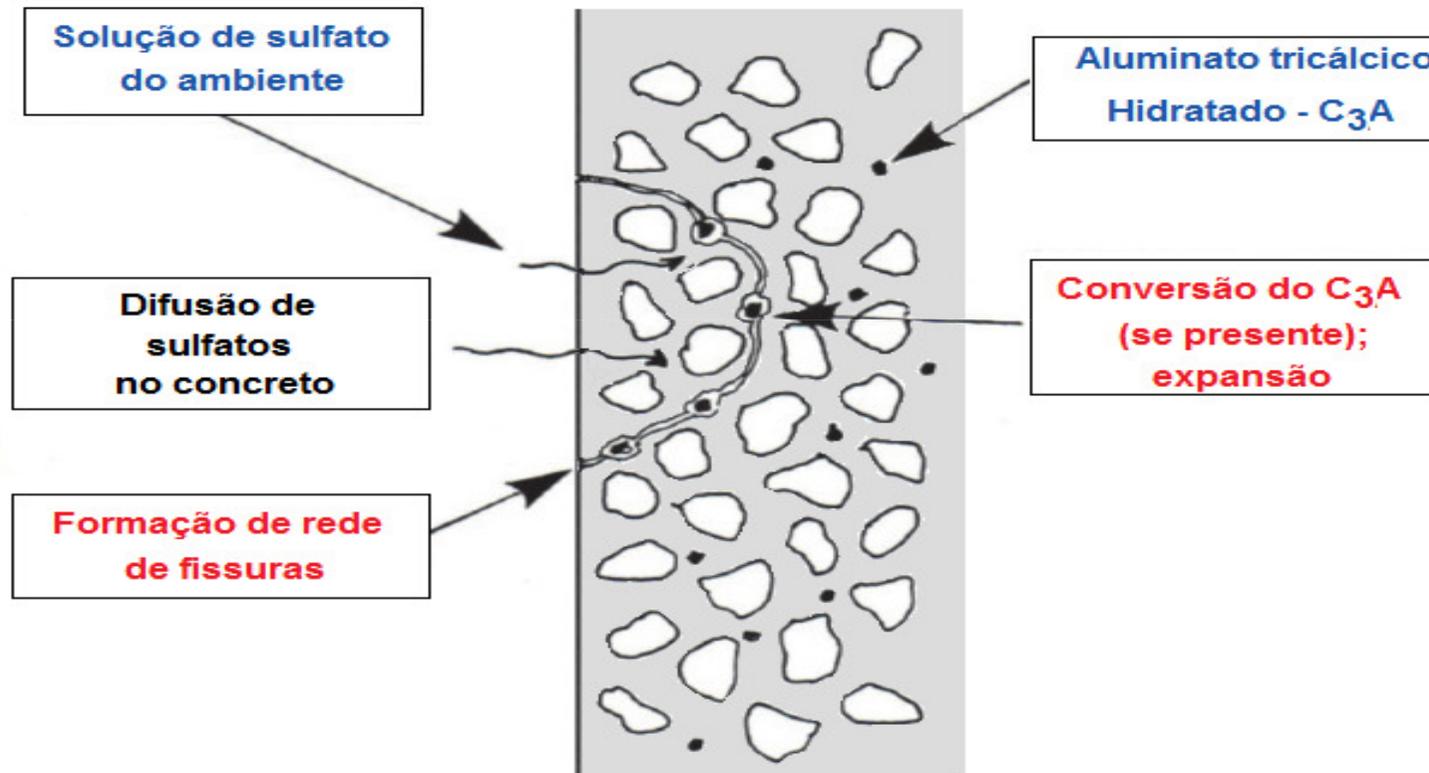


(J.S. Coutinho, FEUP)



ATAQUE POR SULFATOS

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:



Esquema de ataque do concreto por sulfatos (Adaptado de CEB, 1989)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:

Reações com sulfatos geram um forte aumento de volumes, com a consequente desagregação e lixiviação com perda de massa do concreto.

Ambientes industriais



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:

Ataque pela água do mar contribui para expansão, fissuração e desagregação do concreto devido à ação dos sulfatos, além de lixiviação e corrosão de armaduras pela ação de cloretos.

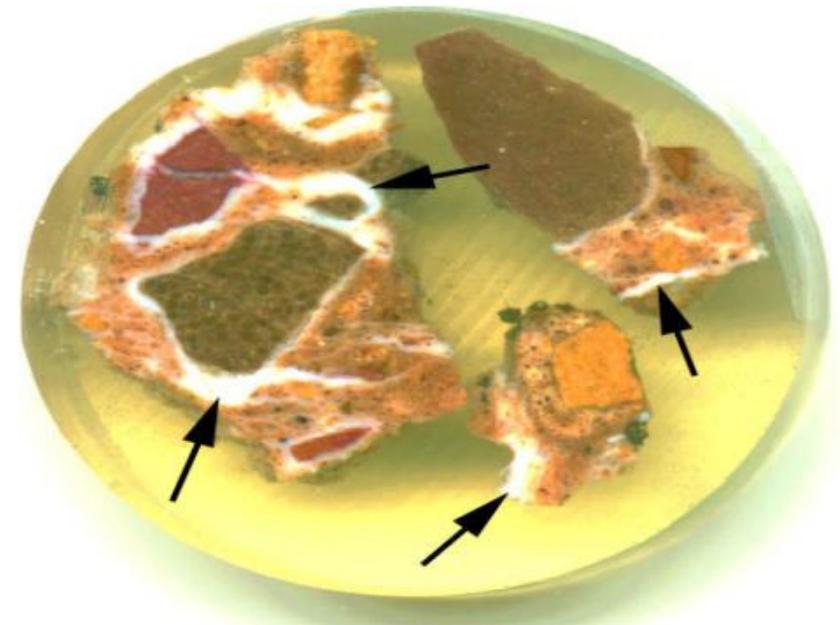


REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:

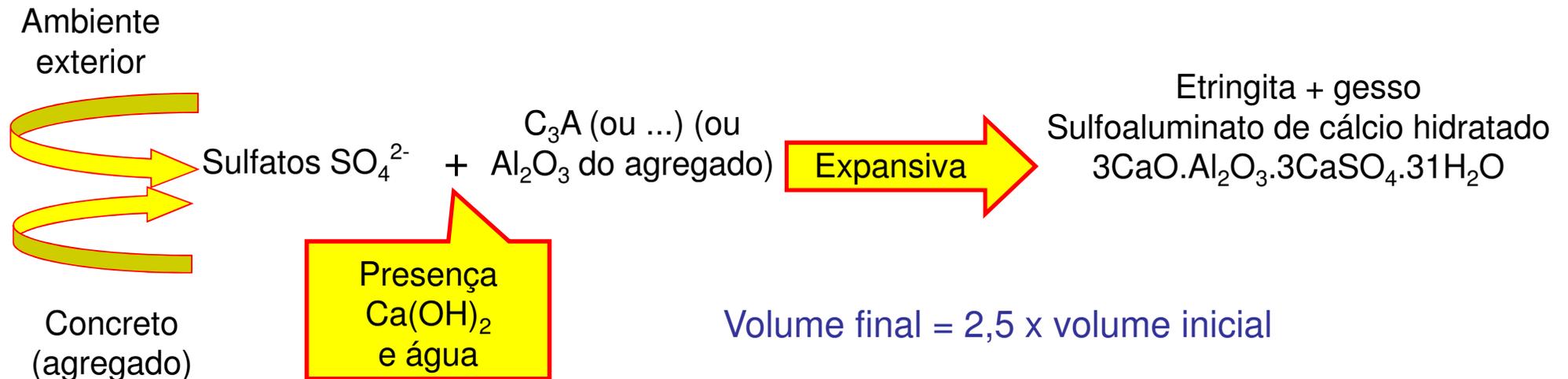


Expansão deletéria devido a existência de sulfato nos componentes do grante usado para fixação da peça metálica.

Seção polida de concreto de pavimento no Reino Unido. Ataque por sulfatos de concreto com agregados calcários. No entorno dos agregados e nas fissuras formou-se *taumasita*.



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:

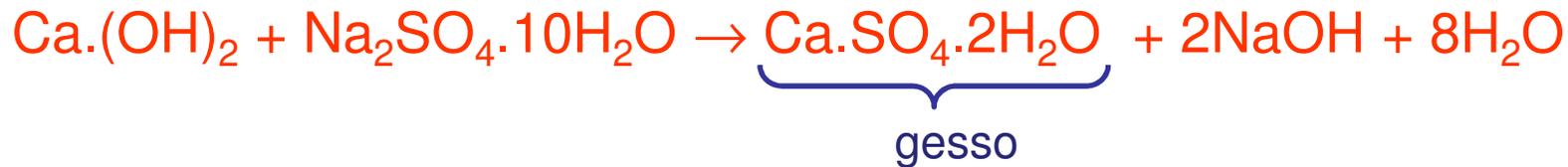


(Coutinho, J. S.; FEUP , 2001)

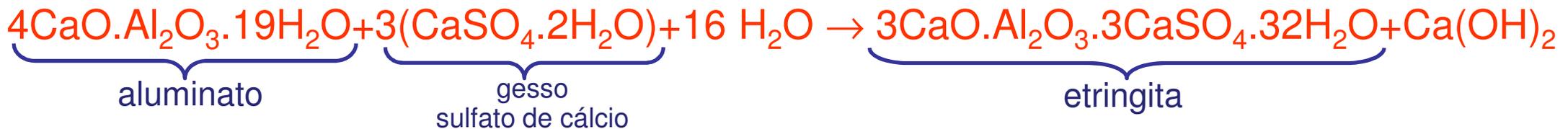
O crescimento do volume causa tensões internas, fissuração irregular do concreto, facilitando a penetração posterior de mais substâncias agressivas e a progressão da deterioração.

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:

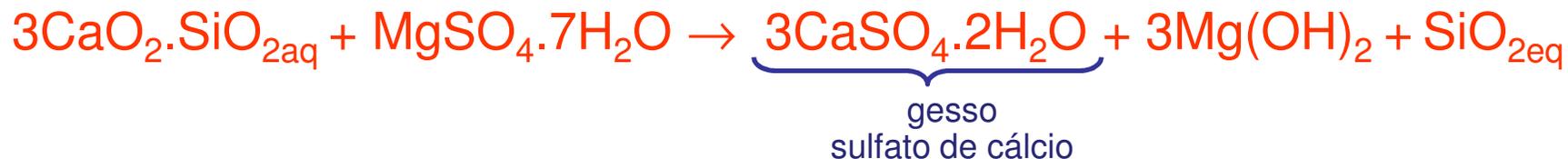
Reação com sulfato de sódio:



Reação com sulfato de cálcio:



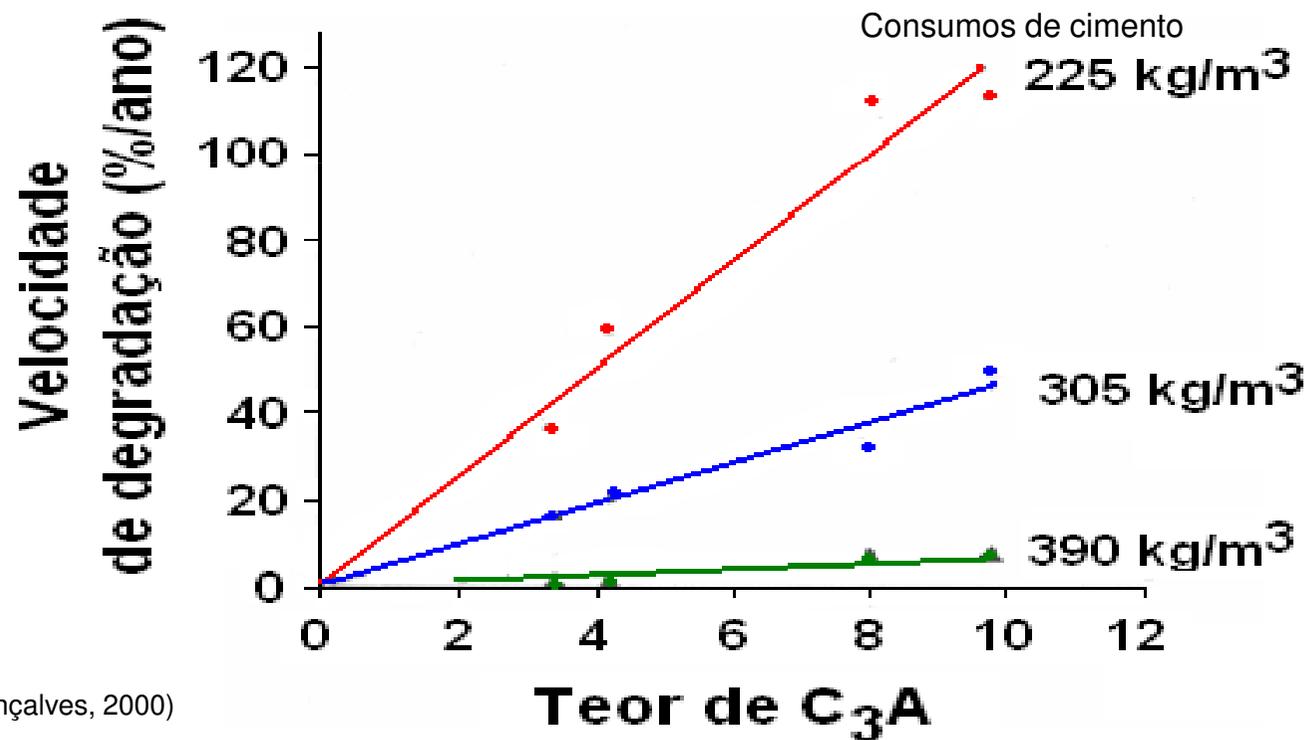
Reação com sulfato de magnésio:



Reação c/ sulfato de magnésio é mais devastadora pois decompõe os silicatos de cálcio hidratados e reage com os aluminatos e o hidróxido de cálcio.

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS - ATAQUE POR SULFATOS:

A influência da dosagem de cimento e do teor de C_3A na resistência do concreto ao ataque por sulfatos.



(Gonçalves, 2000)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

ATAQUE POR SULFATOS: Ação preventiva

Cimento Portland CP (RS) - (Resistente a sulfatos - NBR 5737)

Cimentos - CP I, II entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, III, IV ou V-ARI podem ser resistentes aos sulfatos, atendendo pelo menos uma das condições:

- Teor de C_3A do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;
- Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno em massa;
- Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- Cimentos com antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

(ABCP)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

Tipos:

- **Álcali-sílica;**
- **Álcali-silicato (mais comum no Brasil);**
- **Álcali-carbonato.**

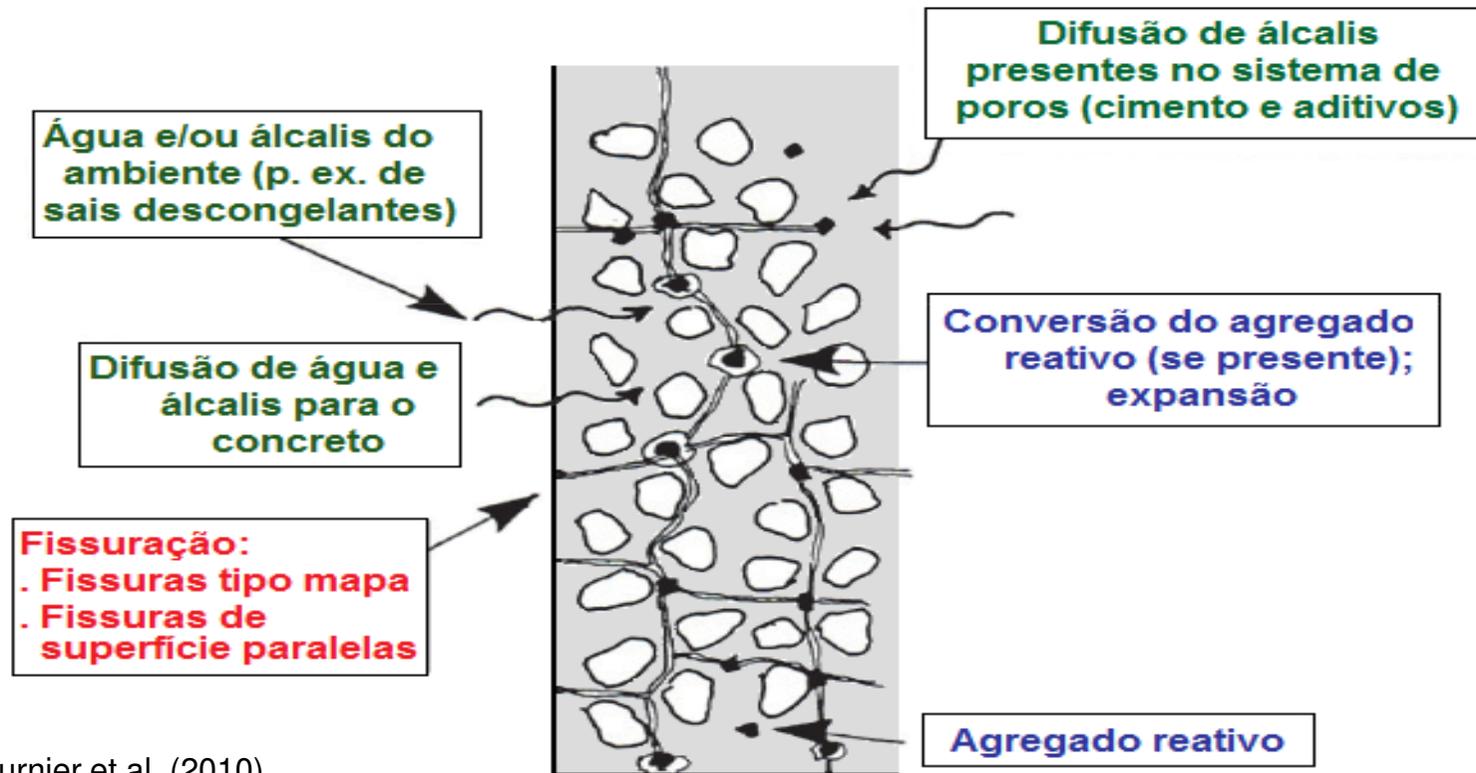
Reações entre os álcalis (K_2O e Na_2O), na presença de água reagem com a sílica ou os carbonatos presentes nos agregados, gerando resíduos muito expansivos.

Álcalis - origem:

- **Cimento (0,2 a 1,5%);**
- **Externa - água do mar, lençol freático.**

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):



Fournier et al. (2010)

Esquema de ataque do concreto por reações álcali-sílica (CEB, 1989)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

Reações álcali-agregado se **desenvolvem de forma lenta**, em geral levam **anos** para que apareçam as primeiras manifestações.

A **velocidade** destas reações varia com:

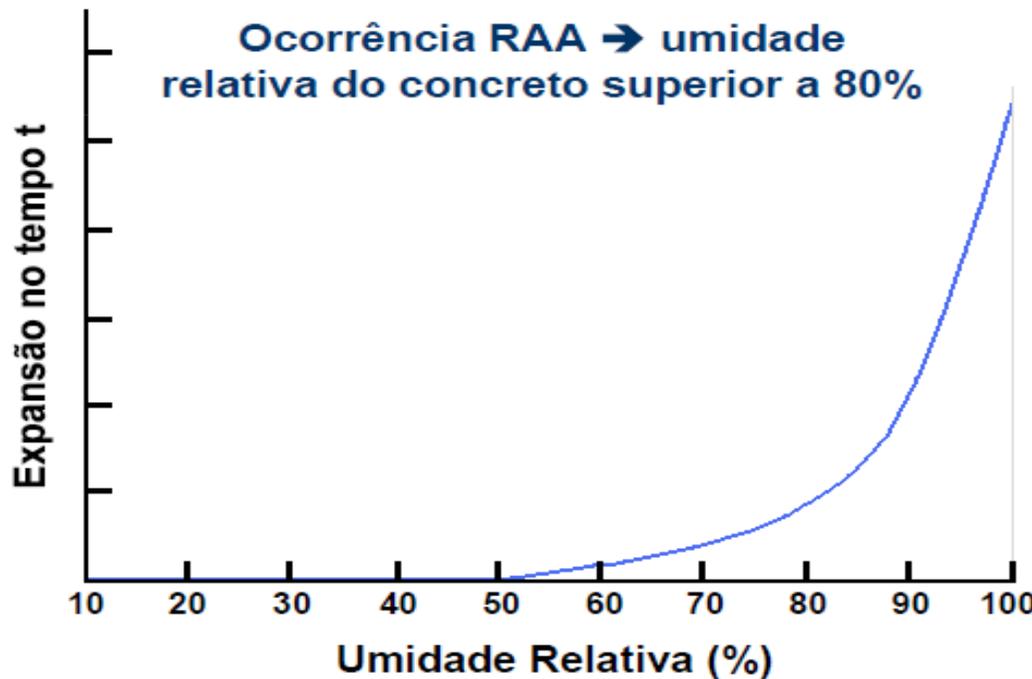
Com a %Na₂O equivalente presente no cimento,

- (Na₂O equivalente = 0,628 %K₂O + %Na₂O);
- Reatividade dos agregados (agregados reativos a álcalis);
- Temperatura (temperaturas maiores aceleram);
- Tipo dos minerais de sílica e tamanho das partículas;
- A contribuição de fontes externas de íons alcalinos;
- Presença de água e ions OH⁻ no concreto.

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

Efeito da umidade relativa na expansão do concreto devido à reação álcali-agregado



NBR 15577

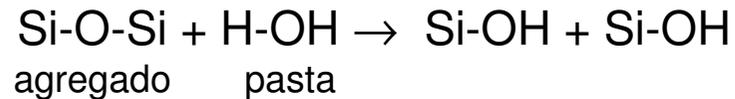
(Poole, 1992)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

Sequencia das reações:

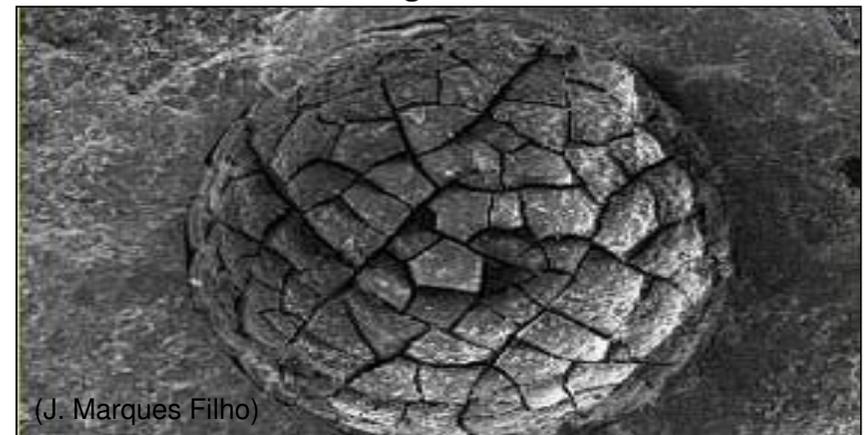
- O alto pH na pasta de cimento promove a hidrólise da sílica:



- Si-OH reage com a pasta formando Si-O-
- Si-O-, absorve Na,K e Ca para formar gel.
Gel na interface agregado/argamassa. Imagem microscopia óptica.



Gel Maciço Gretado no Poro (450 X).
Imagem MEV

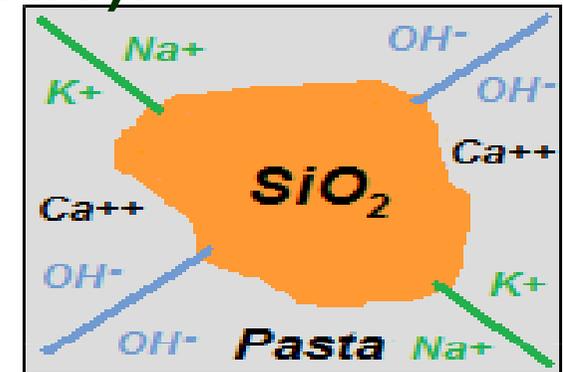


REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

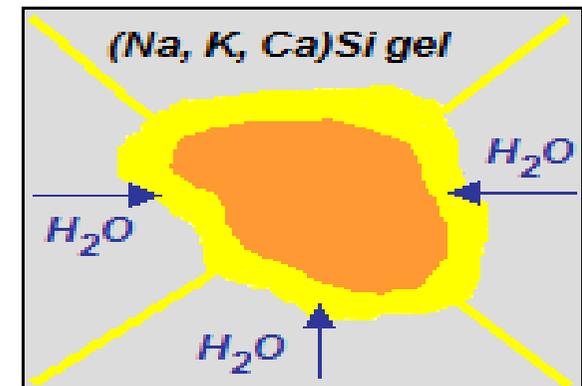
Mecanismo de Expansão

a) A solução nos poros do concreto é dominada por Na, K & OH (com quantidades menores de Ca). Se a sílica do agregado é reativa, o OH e o Na & K reagem com a SiO_2 .



b) O produto da reação é o gel de álcali-sílica, composto por Na, K, Ca & Si. O Gel se forma em torno do agregado.

c) O gel absorve água da pasta de cimento próxima e expande. Eventualmente as pressões desta expansão excedem a tensão de resistência da pasta, originando fissuras no concreto.



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

Mecanismo de Expansão



Apresentação: Eng. Anderson F. Sabbag



Viaduto Robert - Bourassa
Québec, Canada

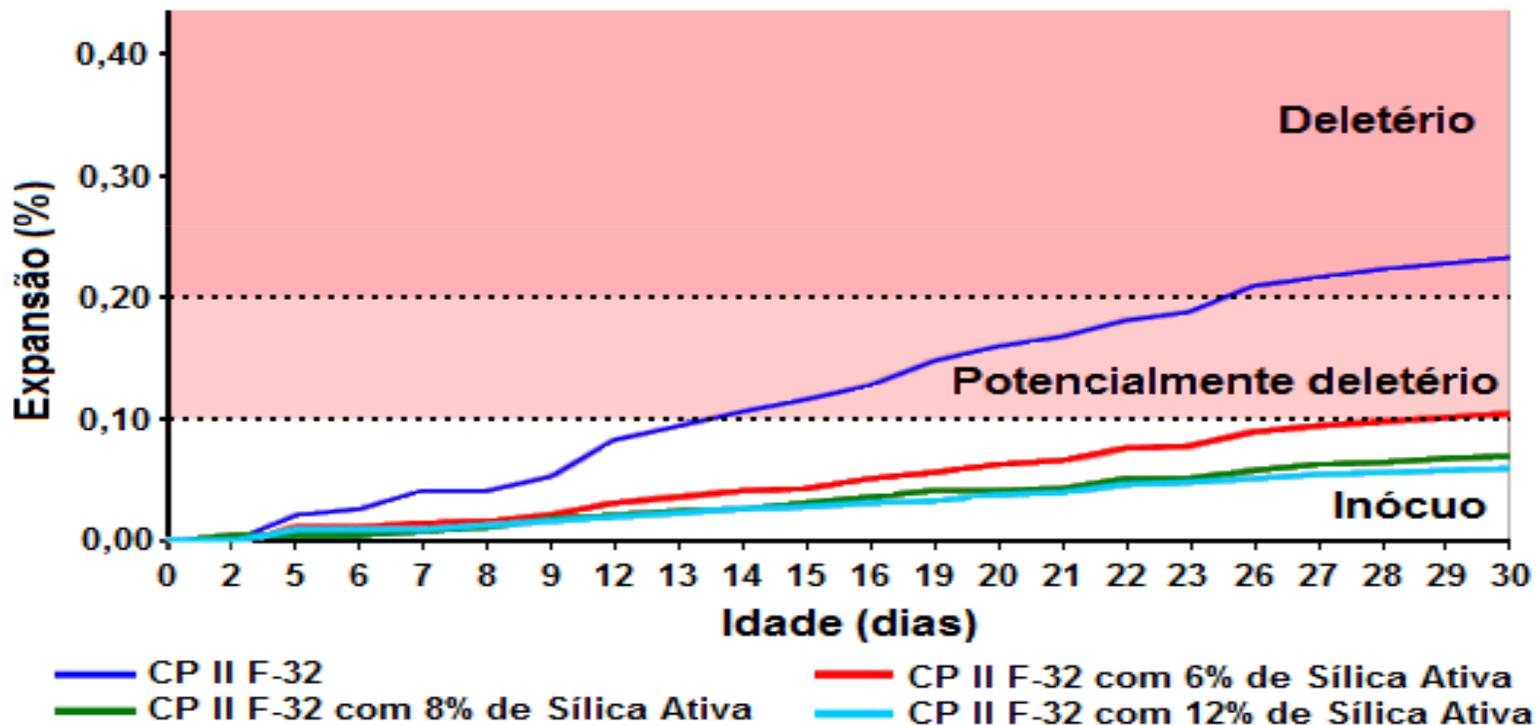
(Fournier et al. 2010)

(FERRARIS 2000, apud VALDUGA 2002)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

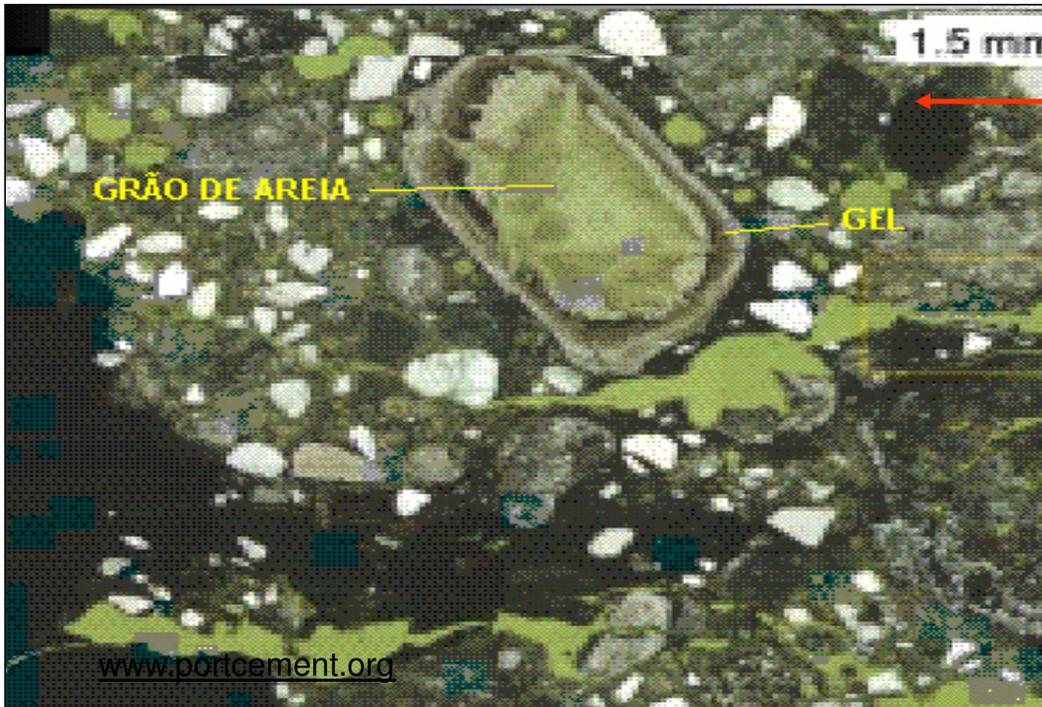
Expansão em ensaios de reatividade de agregados e cimento com sílica ativa:



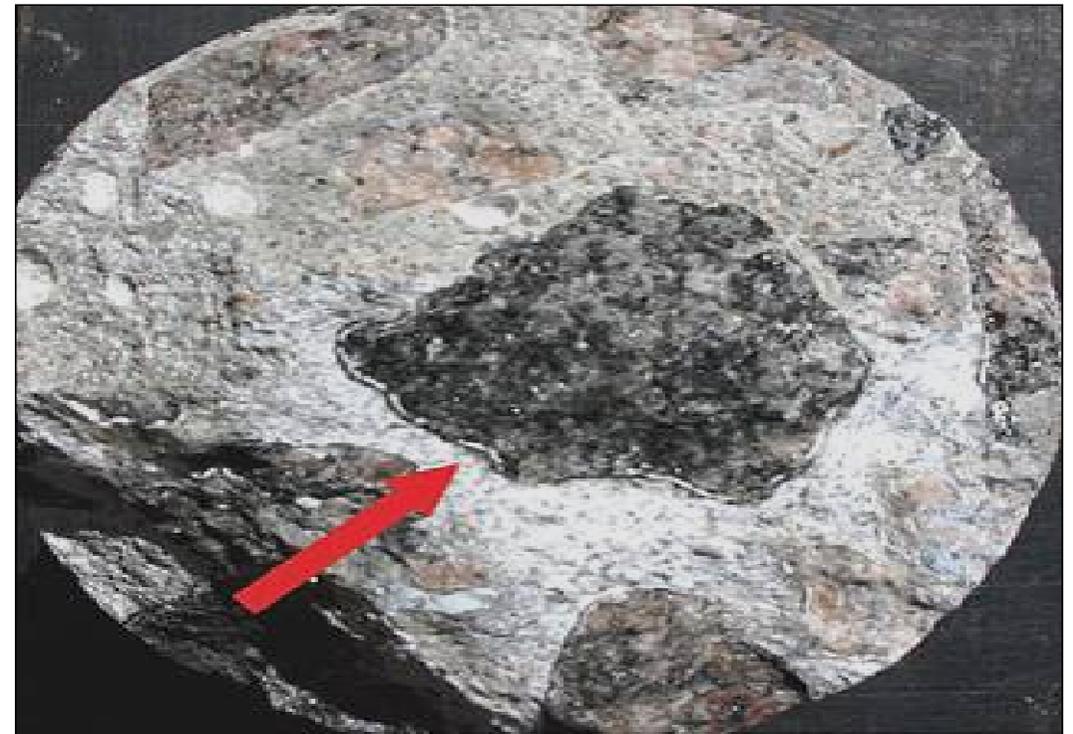
Ensaio de reatividade álcali-agregado pelo método acelerado ASTM C 1260/05
Relatório DCT.C.01.047.2006-RO-Furnas

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):



Formação do gel em torno dos grãos dos agregados



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

Blocos de fundações de ed. no Recife-PE



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):



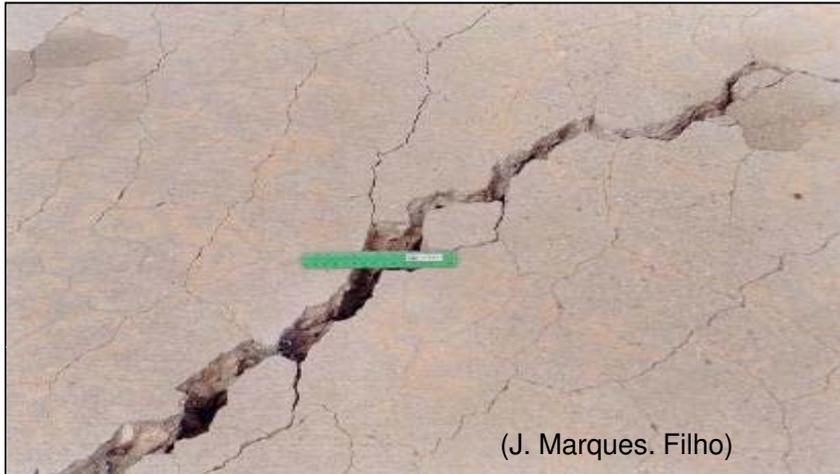
Parapeito de estrutura de ponte

RAA em pavimento de concreto



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):



Fissuras Posteriores ao Endurecimento
decorrentes de RAA
(Reação Álcali Agregado)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

ABNT/CB-18 NBR 15577

Intensidade da ação preventiva	Medidas de mitigação
Mínima	<ol style="list-style-type: none">1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 3,0 kg/m³ de Na₂O equivalente ^{1) e 2)} ou2) Utilizar cimentos CPII-E ou CPII-Z, conforme NBR 11578, ou CP III, conforme NBR 5735, ou CP IV, conforme NBR 5736, ou3) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade moderada
Moderada	<ol style="list-style-type: none">1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m³ de Na₂O equivalente ^{1) e 2)} ou2) Utilizar cimento CP III com no mínimo 60% de escória conforme NBR 5735 ou3) Utilizar cimento CP IV com no mínimo 30% de pozolana conforme NBR 5736 ou4) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade forte
Forte	<ol style="list-style-type: none">1) Utilizar materiais inibidores da reação de acordo com a tabela 3, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio previsto em 7.2 ou2) Substituir o agregado em estudo

NOTAS:

- 1) Aceita-se considerar o aporte de álcalis trazido ao concreto pelo cimento (álcalis totais determinados pela NBR NM 11, NBR NM 17 ou NBR 14656), na ausência de ensaios de todos os componentes do concreto.
- 2) $Na_2O_{eq} = 0,658 K_2O + Na_2O$

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

ABNT/CB-18 NBR 15577

Material	Materiais inibidores da reação álcali-silica no concreto Requisitos da composição
Cimento Portland tipo CII-E e CIII	Escória de alto-forno no cimento em teores suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,10% aos 16 dias, quando ensaiadas de acordo com a Parte 5 desta Norma ou menores que 0,04% em 2 anos, quando de acordo com a Parte 6 desta Norma.
Cimento Portland tipo CII-Z e CIV	Materiais pozolânicos no cimento em teores suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,10% aos 16 dias, quando ensaiadas de acordo com a Parte 5 desta Norma ou menores que 0,04% em 2 anos, quando de acordo com a Parte 6 desta Norma.
Sílica ativa e metacaulin em combinação com qualquer tipo de cimento Portland	Os teores necessários de sílica ativa e metacaulin e sua eficácia na mitigação das expansões decorrentes de reações deletérias devem ser estabelecidos pelo ensaio prescrito na Parte 5, atendendo o limite de 0,10% aos 16 dias, ou pelo ensaio prescrito na Parte 6, sendo menor que 0,04% em 2 anos.
NOTA 1. Em obras especiais de concreto massa , como é o caso de barragens, podem ser usados outros materiais, ou misturas de materiais como inibidores da reação álcali-agregado , tendo em vista a grande necessidade de se reduzir a retração térmica do concreto nesse caso e, portanto de controlar o desenvolvimento do calor de hidratação do cimento, sendo desejável alcançar elevadas deformações em função do proporcionamento dos materiais, o que diferencia essas estruturas das convencionais.	

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

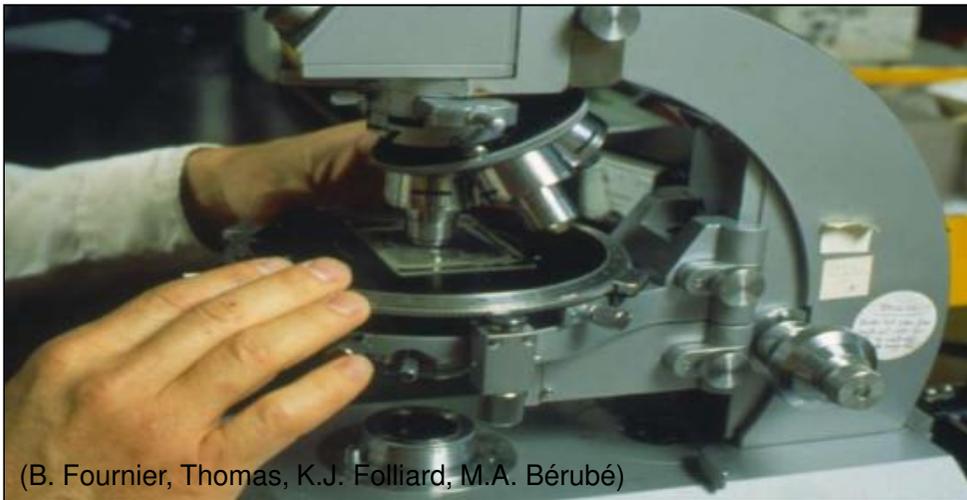
REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

- **Adições químicas:** (MCCOY & CALDWELL, 1951),(RAMACHANDRAN, 1998)
 - Sais de Lítio (alto custo) \Rightarrow 1% adicionado \Rightarrow 91% de redução
 - Pó de Alumínio \Rightarrow 0,25% adicionado \Rightarrow 75% de redução
 - Sulfato de Cobre \Rightarrow 1% adicionado \Rightarrow 48% de redução
 - Hidróxido de Lítio \Rightarrow 1% adicionado \Rightarrow valores inócuos.
- **Adições minerais:**
 - Cinza Volante (*Fly Ash*) \Rightarrow 30 a 40% (METHA & MONTEIRO, 1994).
 - Cinza de Casca de Arroz \Rightarrow 15% (HASPARYK, 1999),
 - Sílica Ativa \Rightarrow 15% (HASPARYK, 1999),
 - Escória de Alto Forno \Rightarrow 45% (DAVIES & OBERHOLSTER, 1999).

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

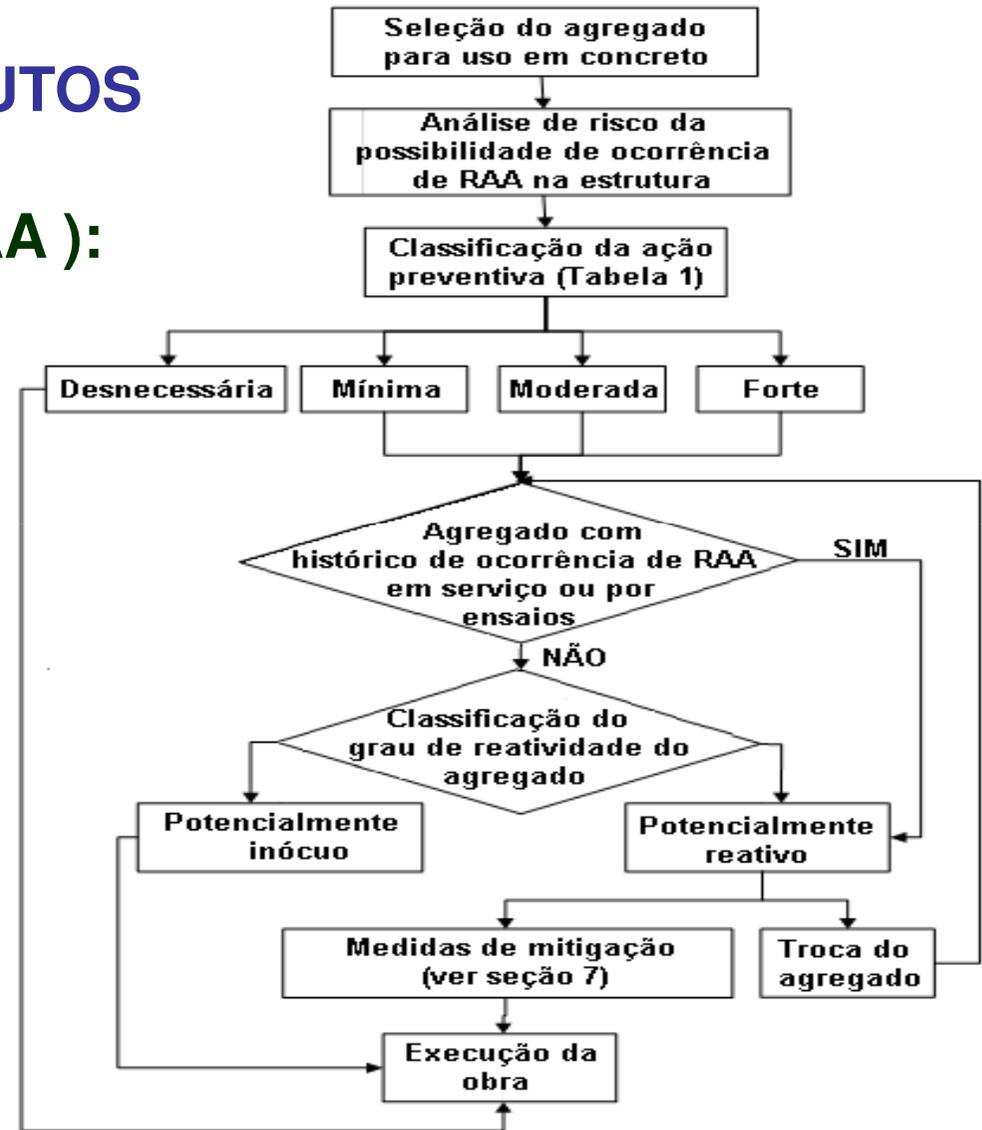
REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

ABNT/CB-18 NBR 15577



(B. Fournier, Thomas, K.J. Folliard, M.A. Bérubé)

Análise petrográfica é um dos principais processos para detecção da reatividade entre agregados e hidróxidos de sódio ou potássio.



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

A análise petrográfica é a análise visual, microscópica e estereoscópica para a identificação dos minerais deletérios no agregado; é uma primeira análise, em geral, não suficiente para assegurar sozinha se o agregado pode vir a contribuir ou não para o aparecimento de manifestações patológicas.



Sanchez (2008)

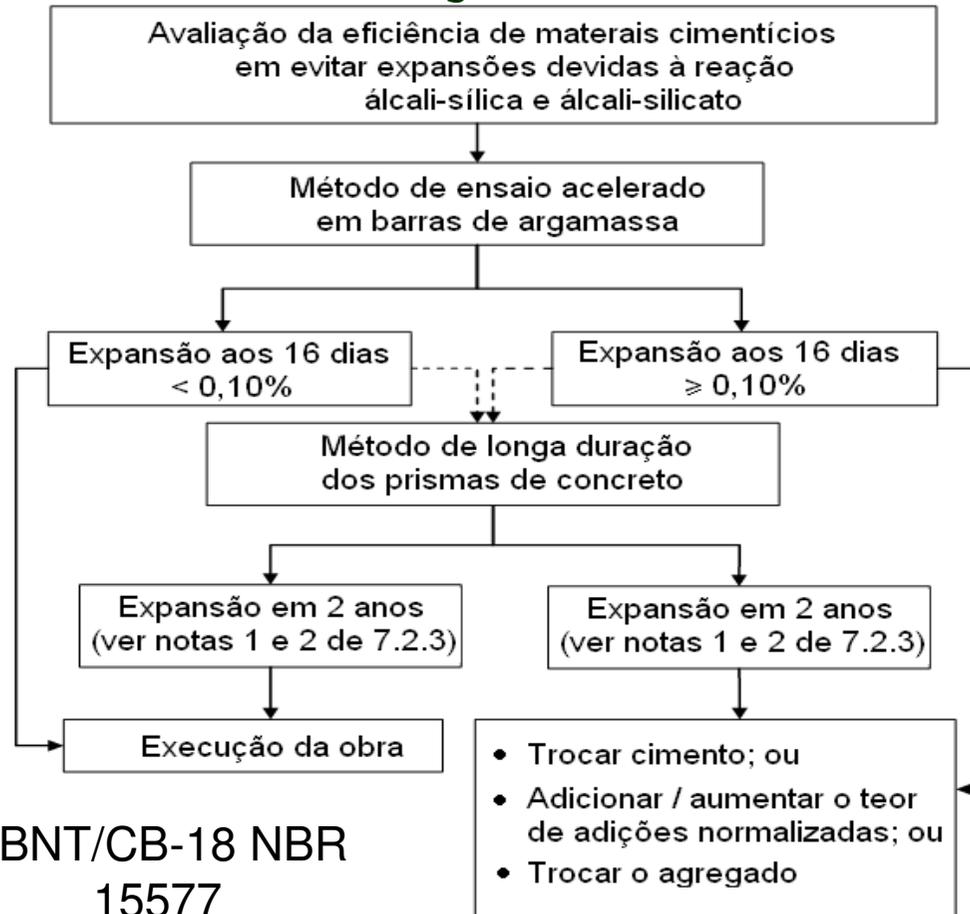
REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

- Método Acelerado de Barras de Argamassa ABNT/CB-18 NBR 15577
 - É o mais utilizado no Brasil e no mundo, por possibilitar a rápida classificação dos agregados em potencialmente reativos ou não.
 - Consiste na imersão de barras de argamassa em solução alcalina (NaOH), numa temperatura de 80°C, por 28 dias – este método foi desenvolvido numa tentativa para tentar resolver as discrepâncias entre os dados de campo e os do laboratório.

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):



ABNT/CB-18 NBR
15577



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA):

Método de Prismas de Concreto

É o mais confiável na atualidade, porque apresenta melhor correlação com os dados de campo.

No entanto este método requer o período de um ano para a análise dos dados e para a classificação dos agregados em potencialmente reativos ou não, prazo inconveniente para o andamento de uma obra.



Sanchez (2008)

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO:

Mais importante fenômeno quanto a durabilidade das estruturas, é a principal causa que leva a falência e determina a necessidade de reparos estruturais.

Corrosão é **alavancada por outros fenômenos** de decomposição do concreto.

É um **fenômeno eletroquímico**, necessita de: **água** como “eletrólito”, ar (fornecimento de O_2), **íons negativos** como Cl^- , OH^- e SO_4^- ou metais diferentes em **contato com o aço**, para formar a “micropilha” ou célula de corrosão.

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO:

A corrosão de armaduras pode ser classificada em:

- Corrosão generalizada
- Corrosão por pite (ou puntiforme)
- Corrosão sob tensão fraturante:
 - Ocorre eminentemente em estruturas protendidas
 - Podem ocorrer em estruturas de concreto armado
 - Sua ocorrência é grande em ambientes ricos em cloretos e com níveis elevados de tensão.

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO:

Concreto novo é um meio bastante alcalino ($\text{pH} \approx 12,5$)

As armaduras estão passivas à corrosão.

Com o tempo pode ocorrer a perda de passivação das armaduras por:

- Carbonatação do concreto
- Presença de íons cloreto

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO:

DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Carbonatação

Em superfícies expostas, a alta alcalinidade o Ca(OH)_2 liberado na hidratação é reduzido pela ação do CO_2 do ar e outros como SO_2 e H_2S , tendo como efeito a diminuição do pH.

A carbonatação em geral é condição essencial para o início da corrosão das armaduras.

Processo de carbonatação é lento, atenuando-se com o tempo devido a hidratação e pelos próprios produtos da carbonatação (CaCO_3), que colmatam os poros superficiais, dificultando a entrada de CO_2 do ar.

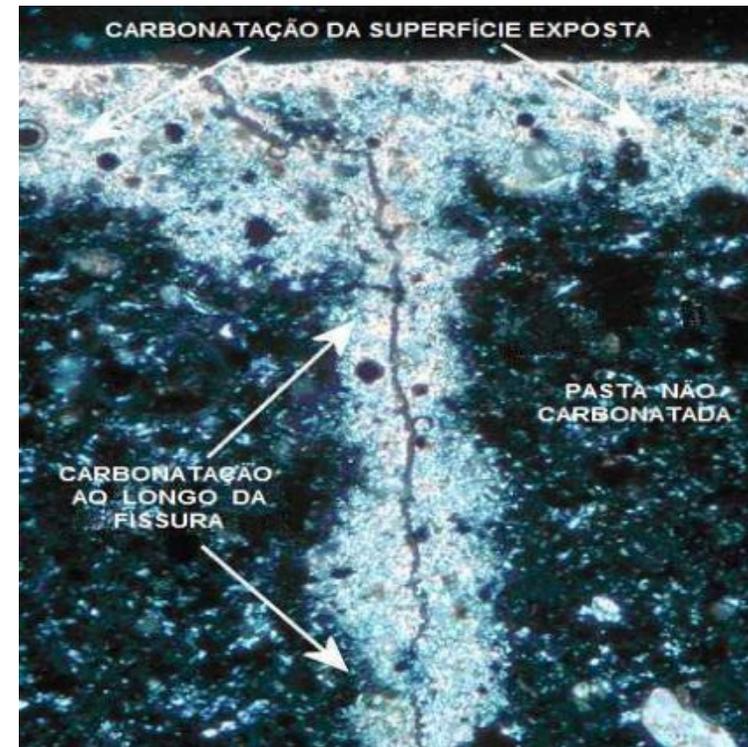
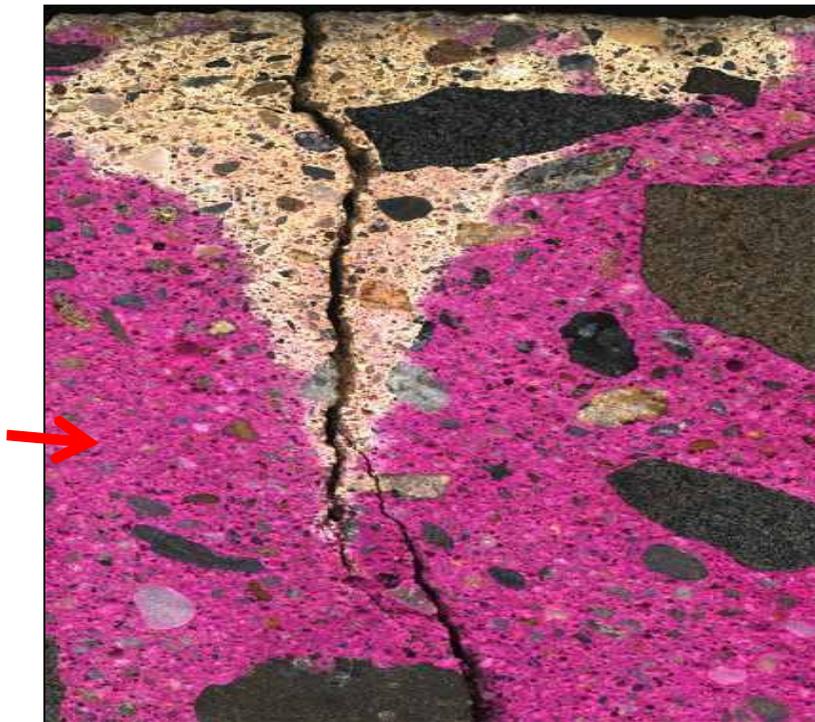
REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO:

DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Carbonatação avançando pela superfície e microfissuras do concreto.

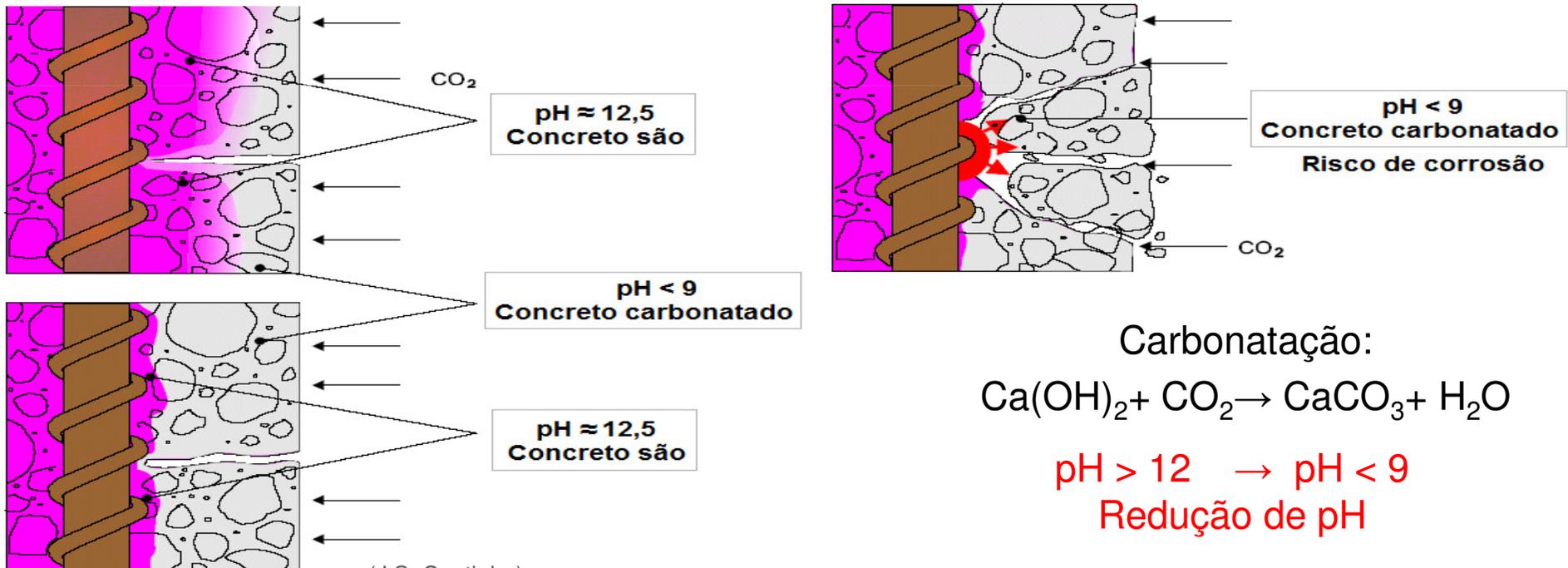
Corante químico fenolftaleína



CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO: DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

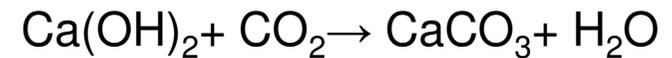
Em concretos novos, ambiente alcalino $\text{pH} \approx 12,5$; sem a presença de cloro o aço está PASSIVO ao fenômeno.

CARBONATAÇÃO – reduz o pH e despassa o aço.



(J.S. Coutinho)

Carbonatação:



$\text{pH} > 12 \rightarrow \text{pH} < 9$

Redução de pH

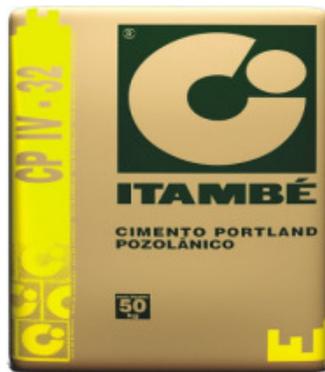
CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO: FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Tipo de cimento:

Influencia a velocidade de carbonatação já que a reserva alcalina é função da composição química do cimento e das adições.

CIMENTO COM ADIÇÕES

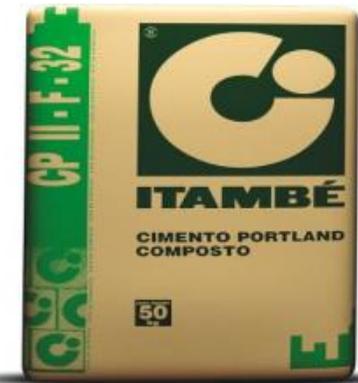
- CP III
- CP IV



>

CIMENTO SEM ADIÇÕES

- CP II F



CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO:

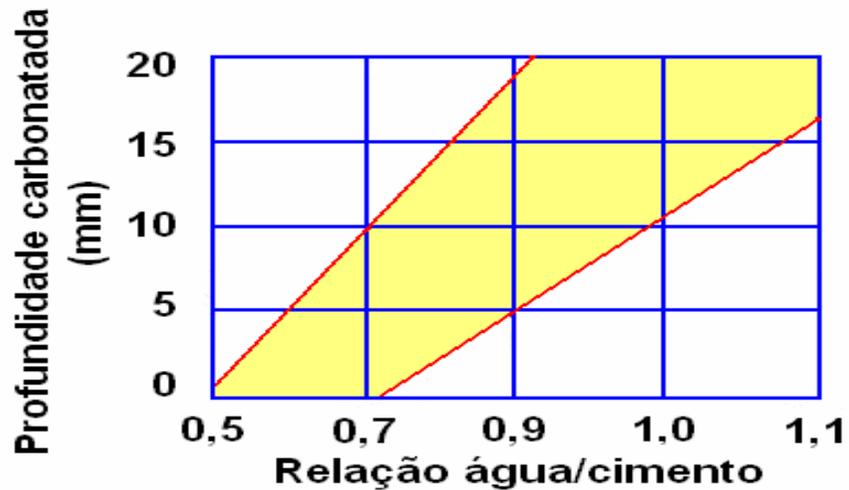
FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Qualidade do concreto:

Porosidade / Permeabilidade do concreto:

- Relação água/cimento
Maior, mais poroso e permeável;

- Cura adequada
Menos fissuração na superfície;



(Helene, P. R. L.; 1986)

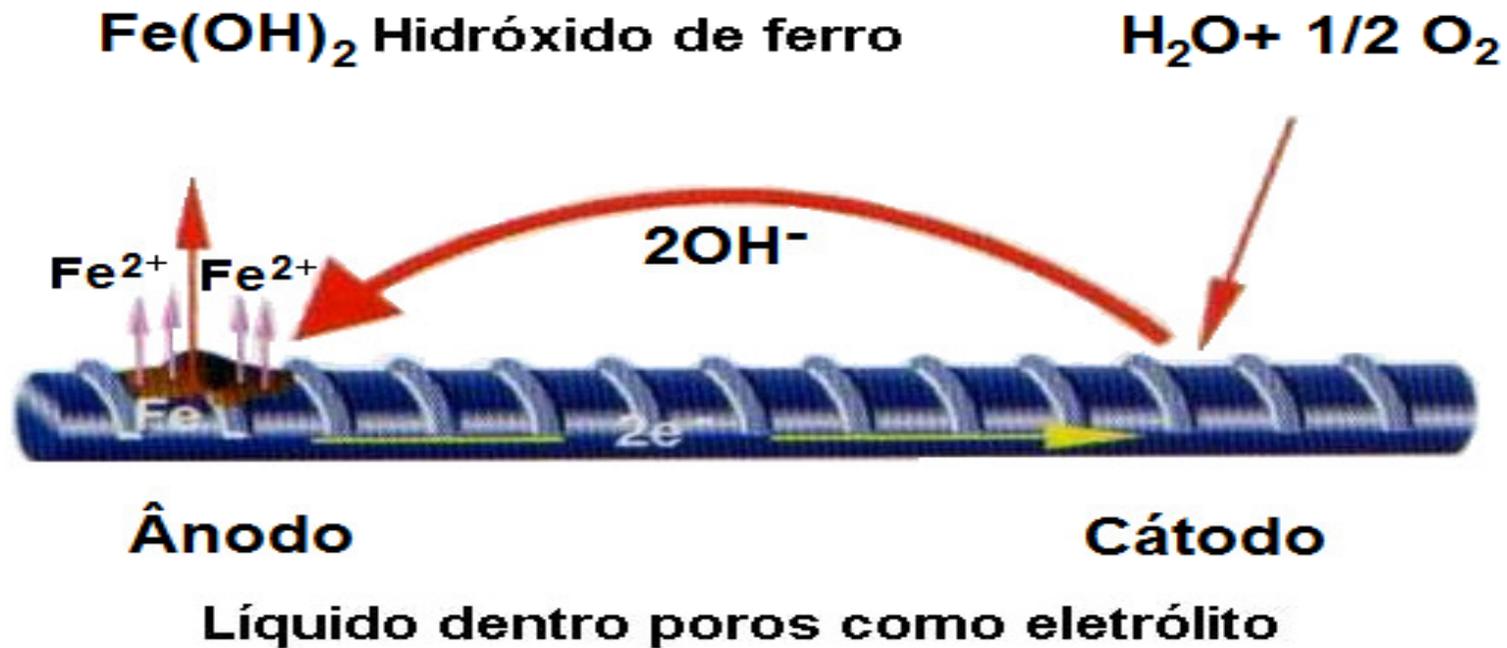


REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

Corrosão das armaduras

DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

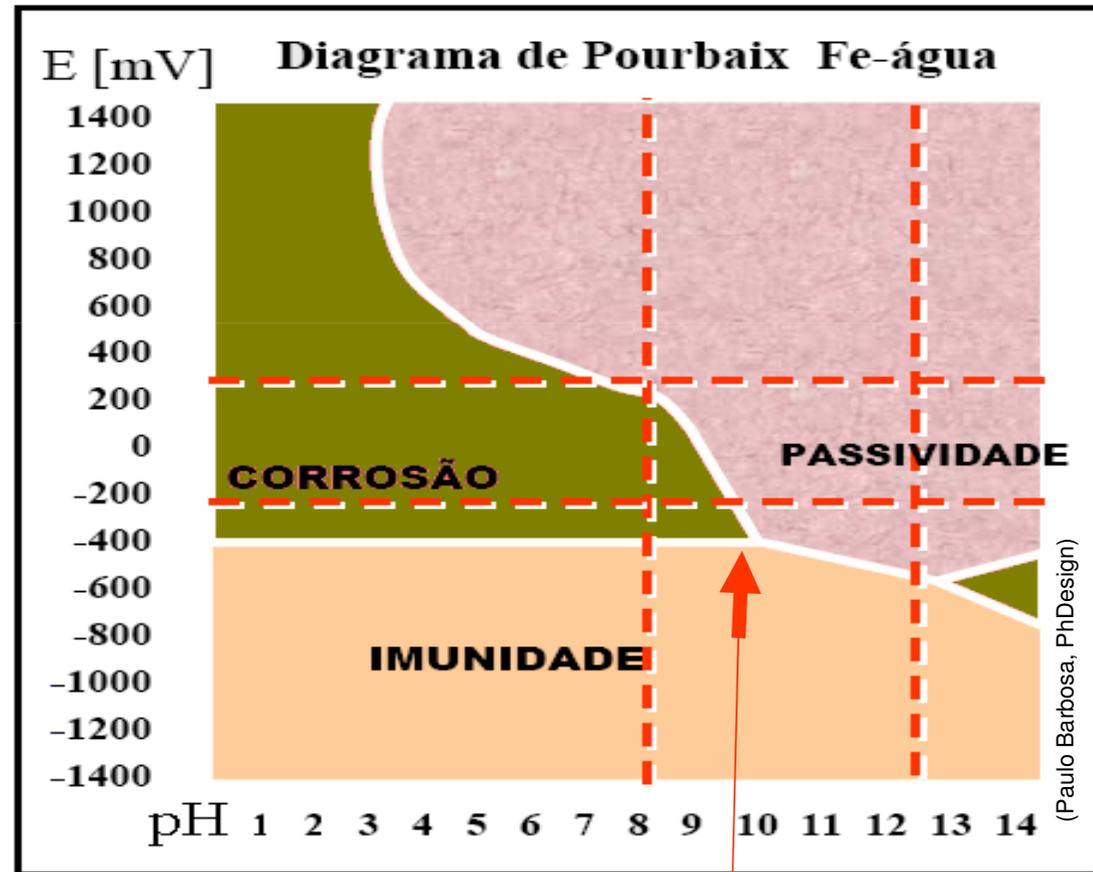
Pilha de corrosão



Corrosão das armaduras

DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Diagrama de Pourbaix Fe-
 água
 (sem cloro)

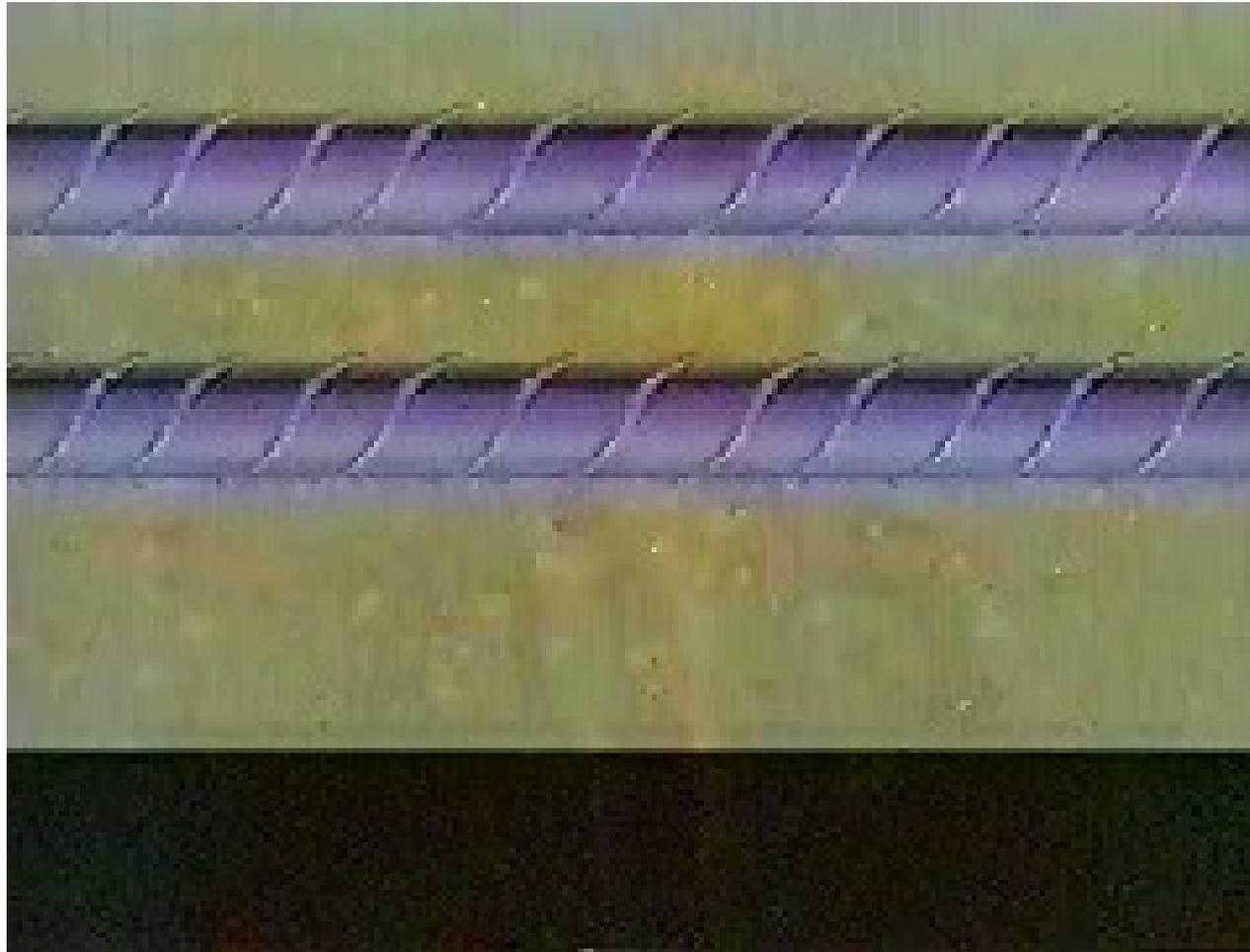


Limite de pH para haver corrosão

Carbonatação do concreto



Sequencia da corrosão das armaduras



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

Corrosão das armaduras

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Cloretos promovem a despassivação precoce do aço, mesmo em ambientes alcalinos.

Teor crítico 0,3% m.c. (CYTED, 1997)

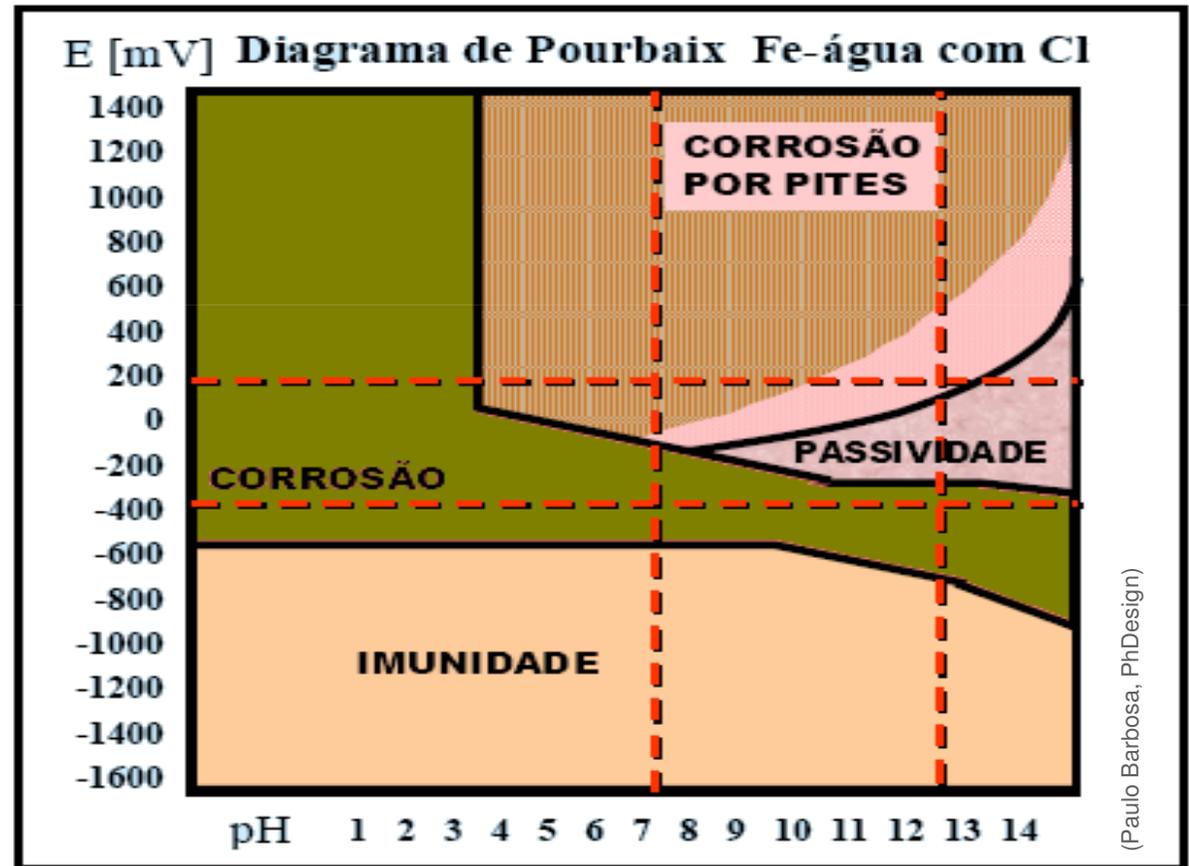
Origem dos cloretos:

- Difusão de íons a partir do exterior (atmosfera marinha)
- Aditivos aceleradores de pega (CaCl_2)
- Areia ou água contaminada por sal (NaCl)
- Tratamentos de limpeza com ácido muriático (HCl)
- Sal (NaCl) como agente anticongelante

Corrosão das armaduras de concreto armado

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Diagrama de Pourbaix
 água com Cl Fe-



Corrosão acontece sob qualquer pH

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

Corrosão das armaduras

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Pilha de corrosão



(Haddad, M., 2008)

Na presença de íons Cl⁻ a Corrosão acontece sob qualquer pH

REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

Corrosão das armaduras

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS



Areia marinha
contaminada com
cloro

(CYTED, 1998)

CORROSÃO DAS ARMADURAS

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

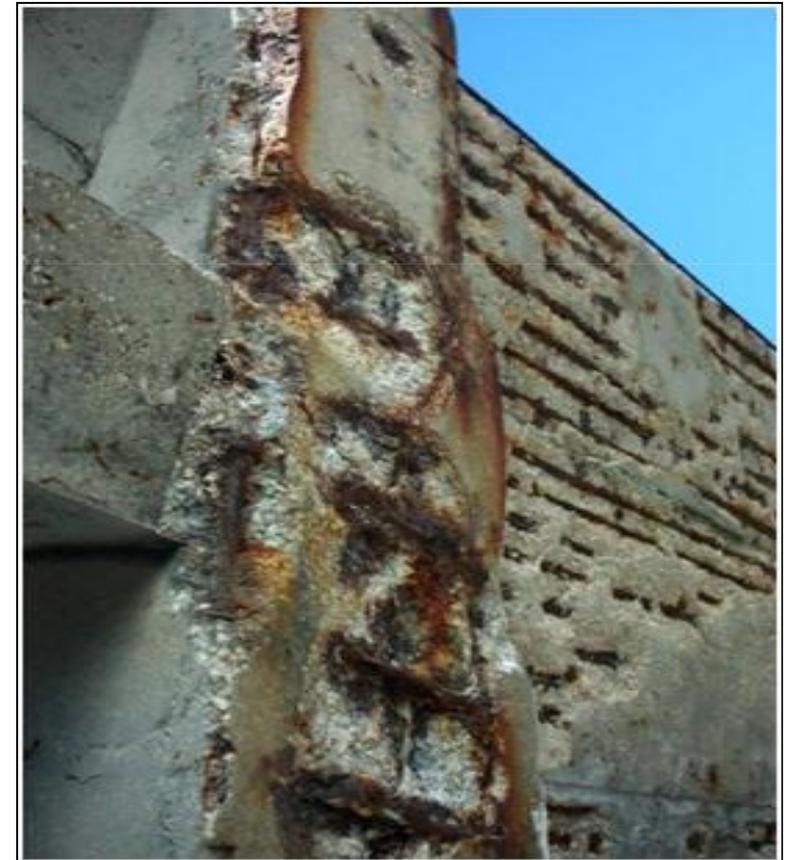
Ação dos Cloretos (Cl⁻):

Os íons cloretos eram introduzidos intencionalmente nas estruturas de concreto como agente acelerador de pega e endurecedor.

Aparecem também através de agregado ou água contaminados.

Em climas frios, podem vir através dos sais anticongelantes.

Também através de salmouras industriais e maresias.



REAÇÕES FORMADORAS DE PRODUTOS EXPANSIVOS

CORROSÃO DAS ARMADURAS

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Ação dos Cloretos (Cl⁻):

Mecanismos de transporte dos íons dos cloretos (Cl⁻):

- Permeabilidade sob pressão;
- Absorção capilar;
- Difusão iônica;
- Migração iônica.

CORROSÃO DAS ARMADURAS

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Mecanismos de transporte dos íons dos cloretos (Cl⁻):

Permeabilidade

A permeabilidade é um dos principais parâmetros de qualidade de um concreto e representa a facilidade de um líquido penetrar no seu interior através da pressão hidrostática.

Absorção capilar

A absorção capilar é a primeira porta de entrada dos íons cloreto, provenientes, por exemplo, de névoa marítima.

Depende da porosidade, viscosidade e tensão superficial do líquido.

Corrosão das armaduras de concreto armado

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Mecanismos de transporte dos íons dos cloretos (Cl⁻):

Difusão iônica

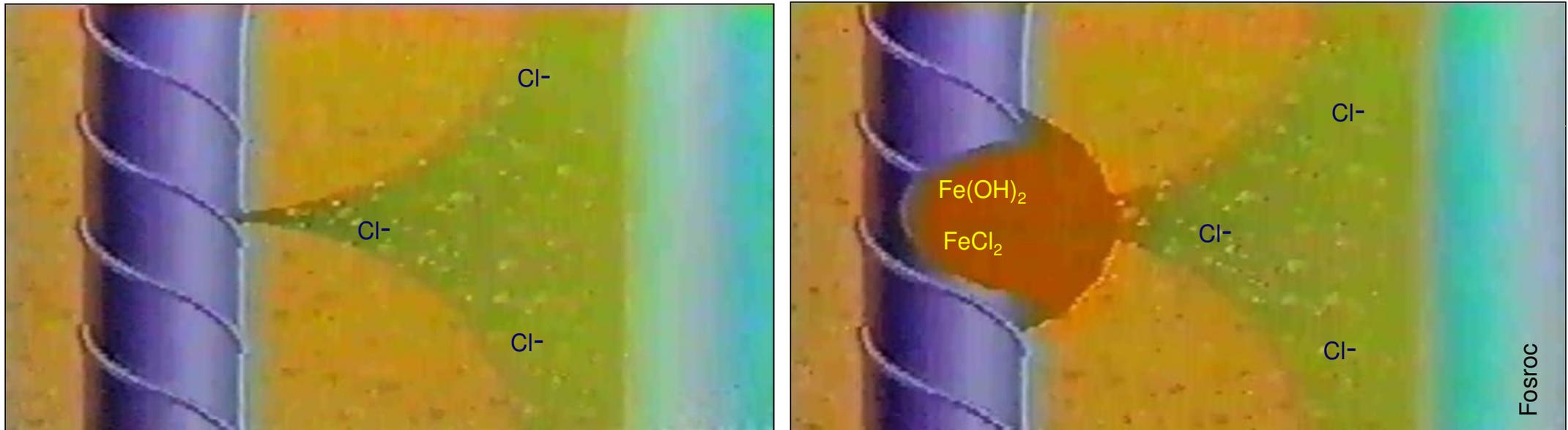
A absorção capilar ocorre na superfície do concreto, sendo que a difusão iônica é o principal mecanismo de transporte no interior da estrutura, em meio aquoso.

Migração iônica

Os íons cloretos por serem cargas negativas, promovem migração iônica, o qual pode se dar pelo próprio campo gerado pela corrente elétrica do processo eletroquímico, como por ação de campos elétricos externos.

CORROSÃO DAS ARMADURAS

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS



O ânodo formado atrai Íons de cloro, de carga negativa, continuamente para o mesmo ponto causando uma corrosão localizada e profunda (pite).

CORROSÃO DAS ARMADURAS

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS



Corrosão por pites
(alta concentração de cloro)

(Paulo Barbosa, PhDesign,2006)

Ataque por cloretos



Arquivo: Filmes concreto / Fosroc / v109 Ataque cloretos

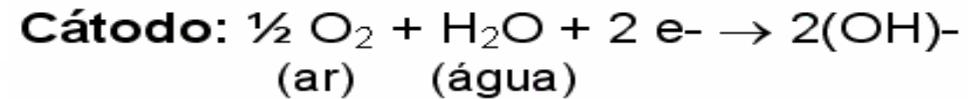
Ataque por cloretos



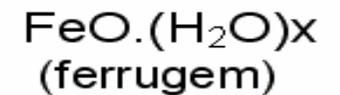
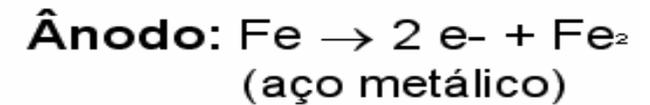
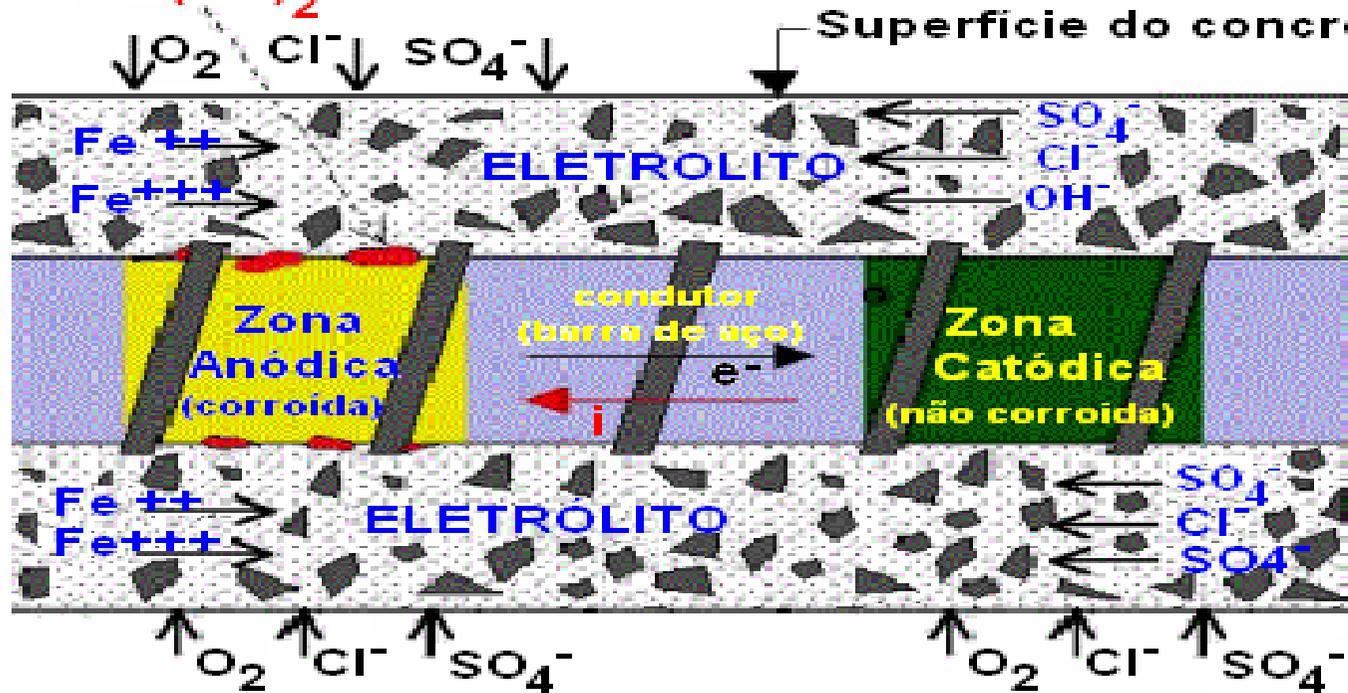
Arquivo: Filmes concreto / Fosroc / v9 - Ataque cloreto

CORROSÃO DAS ARMADURAS

FORMAÇÃO DA PILHA DE CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO



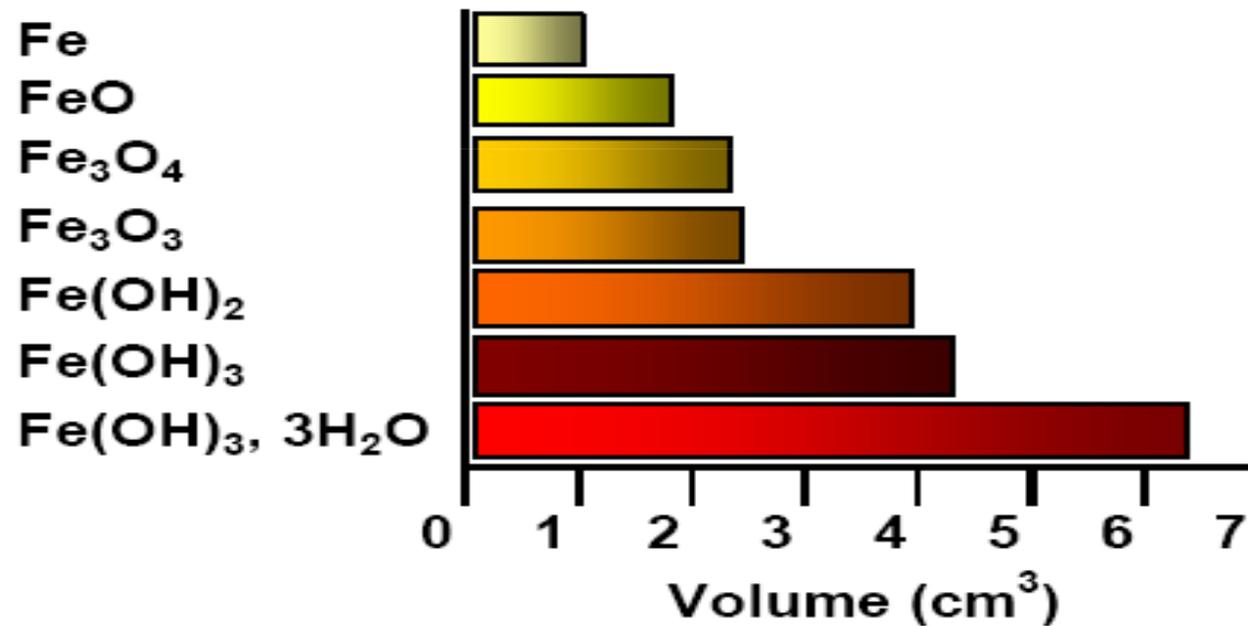
Produto de corrosão



CORROSÃO DAS ARMADURAS

Corrosão do aço carbono – REAÇÃO EXPANSIVA

Óxidos e hidróxidos de ferro e seus volumes relativos:

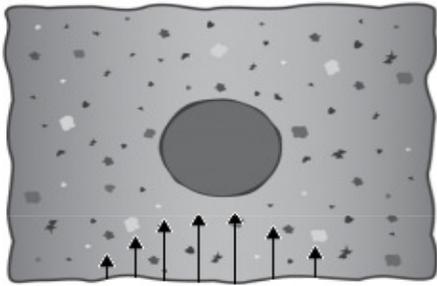


Volumes relativos do ferro e de alguns de seus produtos de corrosão.

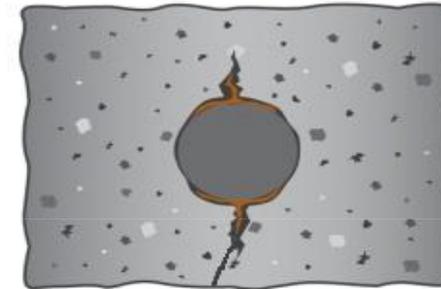
CORROSÃO DAS ARMADURAS

Corrosão do aço carbono – REAÇÃO EXPANSIVA

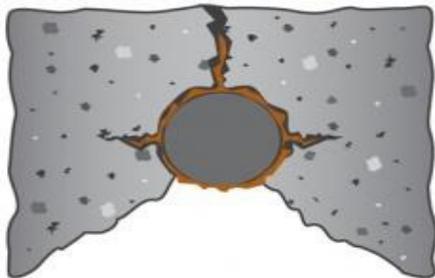
Progressão da deterioração da estrutura devido à corrosão das armaduras



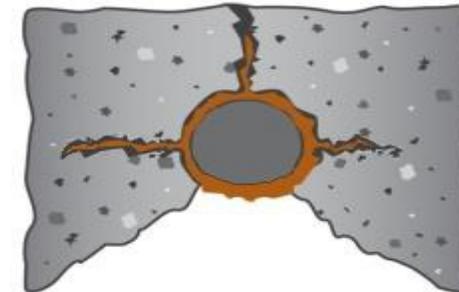
a) Penetração de agentes agressivos por difusão, absorção ou permeabilidade.



b) Fissuração devida às forças de expansão dos produtos da corrosão.



c) Lascamento do concreto e corrosão acentuada.

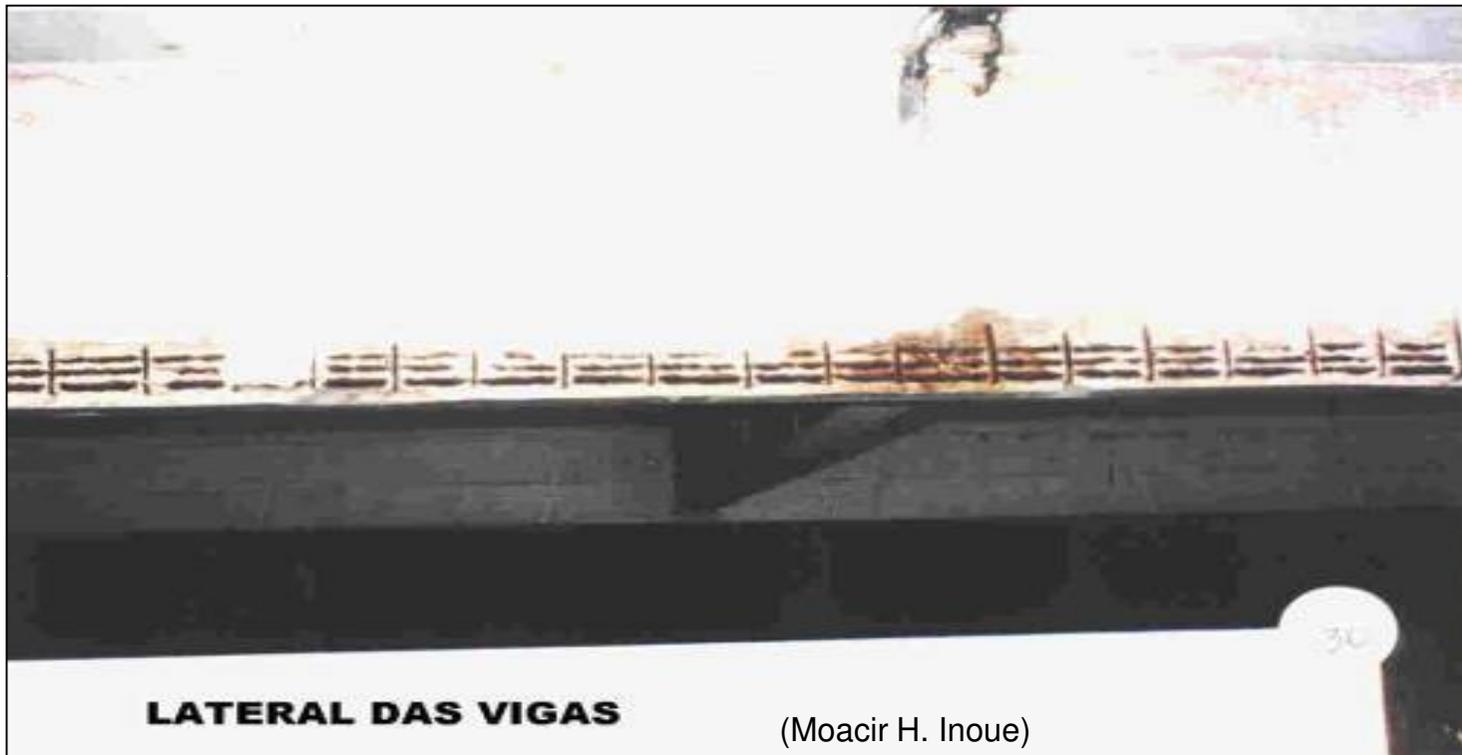


d) Lascamento acentuado e redução significativa da seção da armadura.

(adapt. de Helene, P. R. L.; 1986)

CORROSÃO DAS ARMADURAS

Corrosão do aço carbono – REAÇÃO EXPANSIVA



Viga em ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC

Corrosão pelo ataque químico



Arquivo: Filmes concreto / Fosroc / v7 - Ataque químico

Lascamento pela expansão



Arquivo: Filmes concreto / Fosroc / v6 Corrosão - lascamento

CORROSÃO DAS ARMADURAS

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cuidados Necessários:

- Cuidados no uso de aditivos que contenham em sua fórmula o cloreto de cálcio;
 - Cobrimento das armaduras adequado;
- Cuidados especiais se o concreto estiver sujeito à correntes elétricas;
- Utilizar dosagem adequada, com o mínimo de água para a hidratação.

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cobrimento

- Maior tempo p/ camada carbonatada chegar ao aço

Concreto menos permeável

- Menor relação a/c e maior f_{ck}

Cuidados com formas arquitetônicas, drenagem e detalhes construtivos

Proteção superficial do concreto - revestimentos

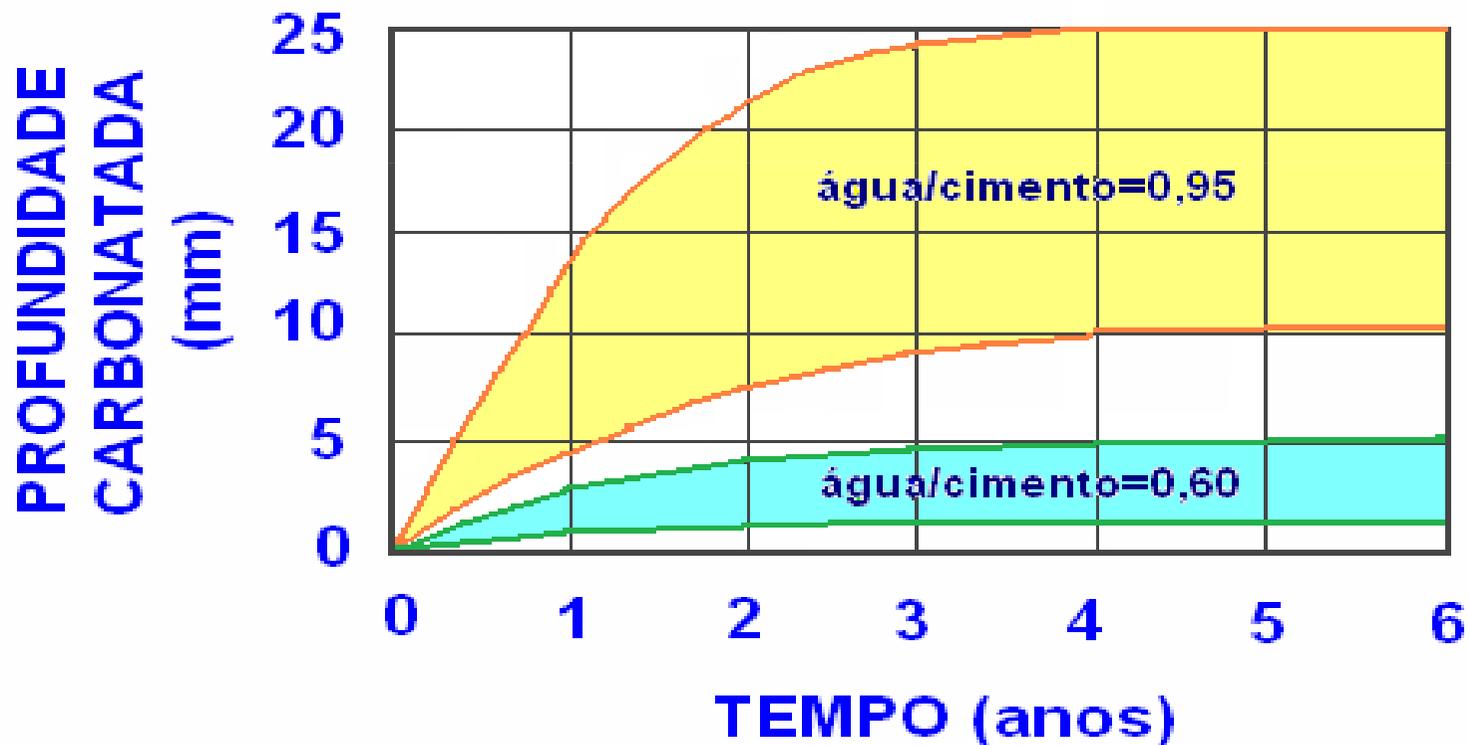
Armaduras especialmente passivas

- Aços revestidos (epóxi, galvanização)
- Aços inoxidáveis
- Armaduras de fibras (carbono, vidro, kevlar);

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cobrimento - **Maior tempo p/ camada carbonatada chegar ao aço**

Profundidade de carbonatação com o tempo a relação a/c



Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

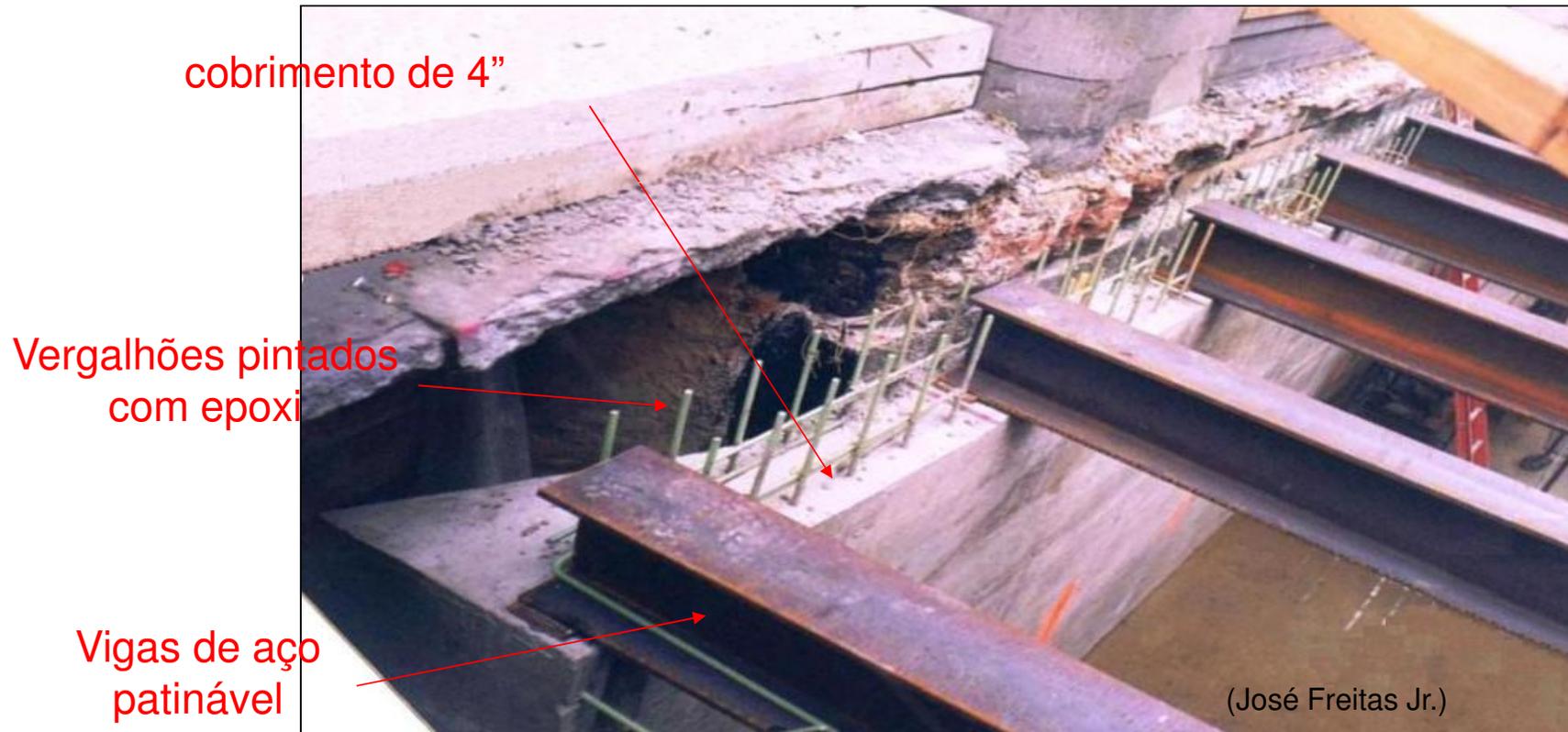
Cobrimento - **Maior tempo p/ camada carbonatada chegar ao aço**
NBR 6118 (2014)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ^a	Todos	30	35	45	55

- a. Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.
- b. Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.
- c. Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV. d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

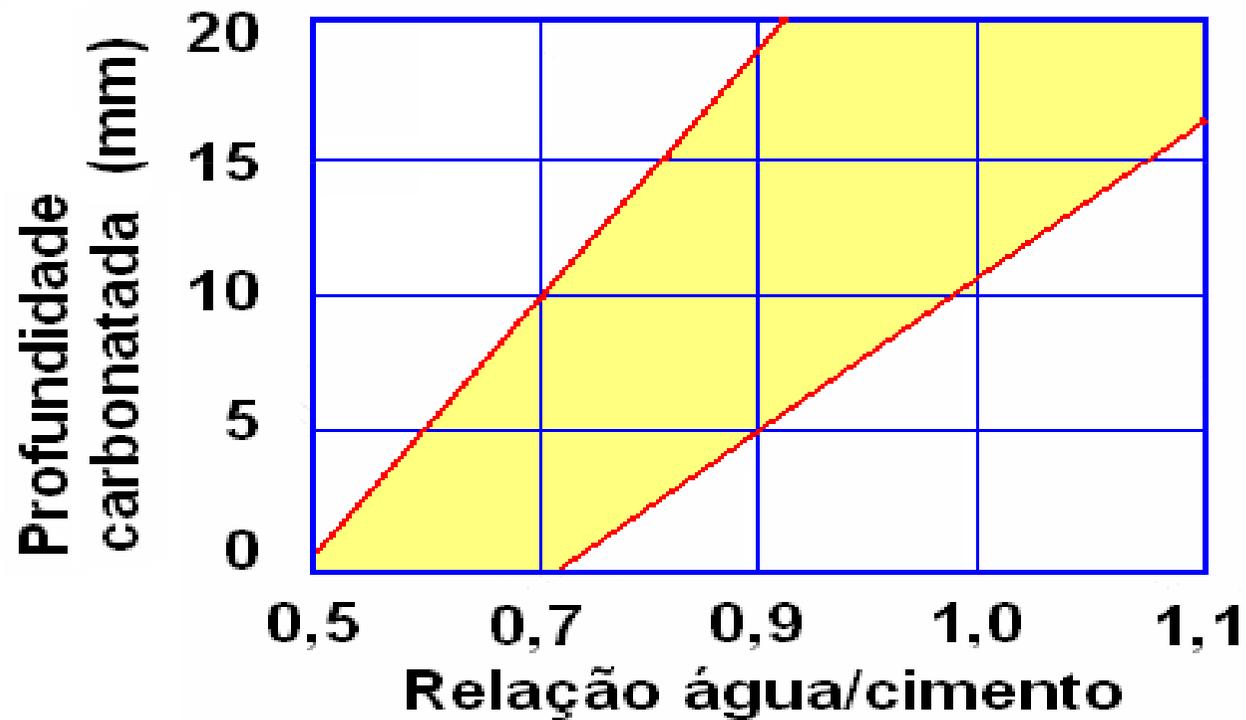
Galeria de água de Nova York, (sistema unitário, pluvial + esgoto) com cortinas de concreto armado, cobrimento de 4", vergalhões pintados com epóxi e vigas de aço patinável.



Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Concreto menos permeável - **Menor relação a/c e maior f_{ck}**

Influência da relação a/c na profundidade de carbonatação



(P.Helene, 1986 de Soretz, 1967)

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Concreto menos permeável - Menor relação a/c e maior f_{ck}

Relações a/a máximas e f_{ck} mínimo - NBR 6118 (2014)

Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 1)			
		I	II	III	IV
Relação água/aglomerante em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS:

a.O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

b.CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

c.CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

a/a = água/aglomerante

a/c= água/cimento

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

FORMAS ARQUITETÔNICAS E DRENAGEM



(José Freitas Jr.)

Marquise desabou na Avenida Churchill 97,
RJ. 19/12/2008

- Marquises em balanço
- Lajes s/ vigas !!
 - Drenagem / limpeza ?
 - Impermeabilização ?
 - Cobrimento ?



O DIAONLINE

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

DETALHES CONSTRUTIVOS



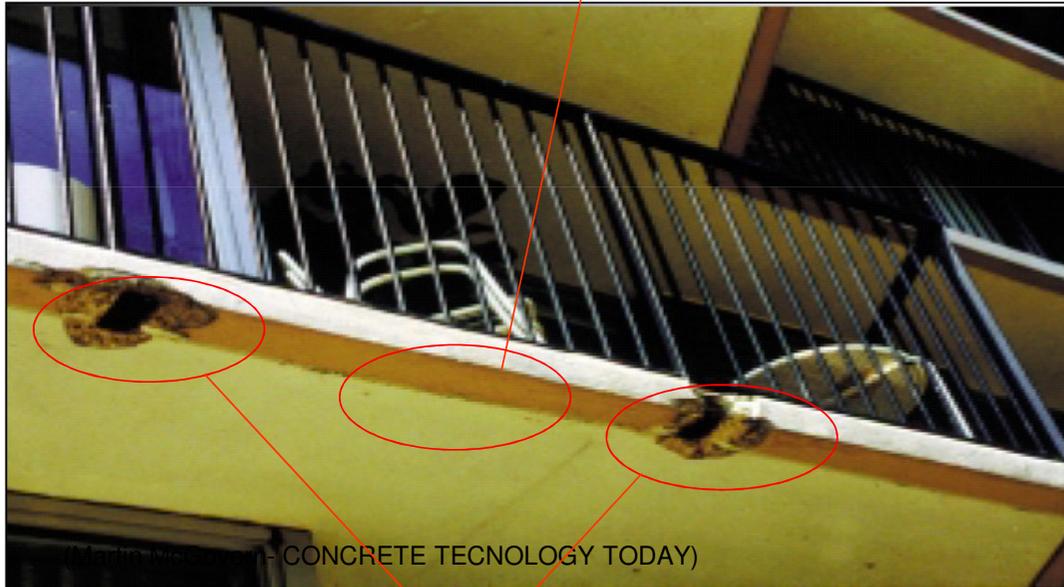
Brise unido com as armaduras
(corrosão galvânica)



Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

DETALHES CONSTRUTIVOS

Carência de pingadeira



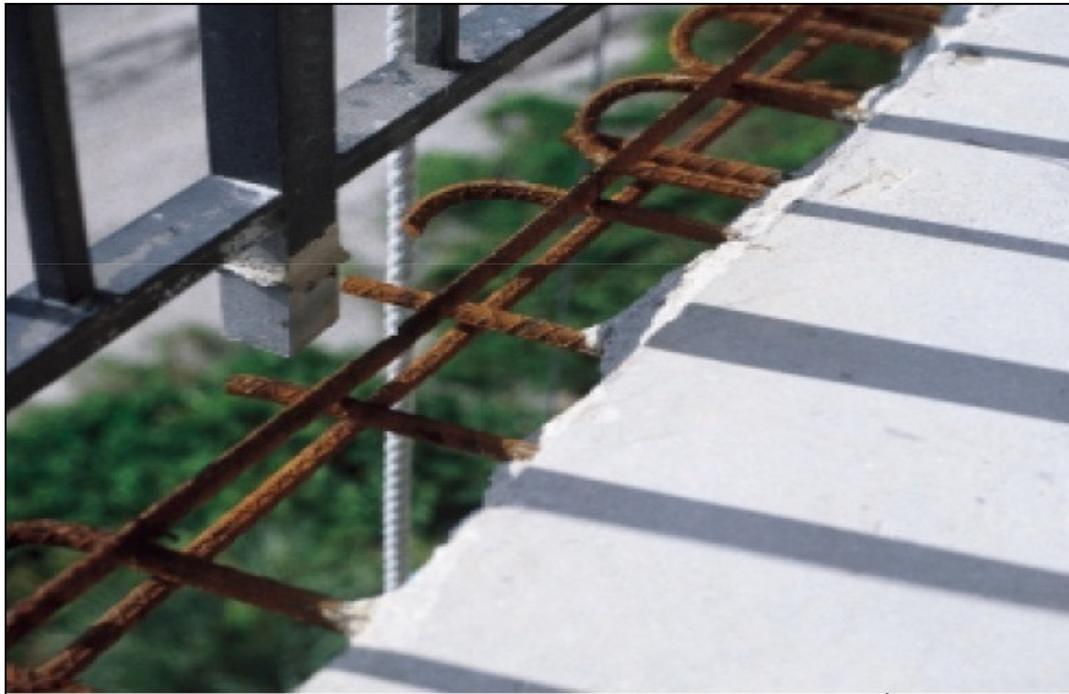
Gradil unido c/ as armaduras
(corrosão galvânica)



(Granato - Basf)

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

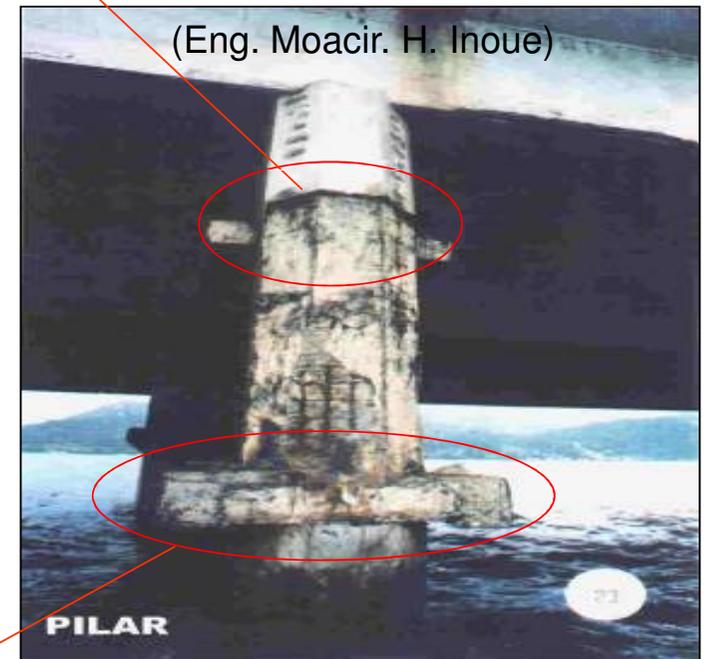
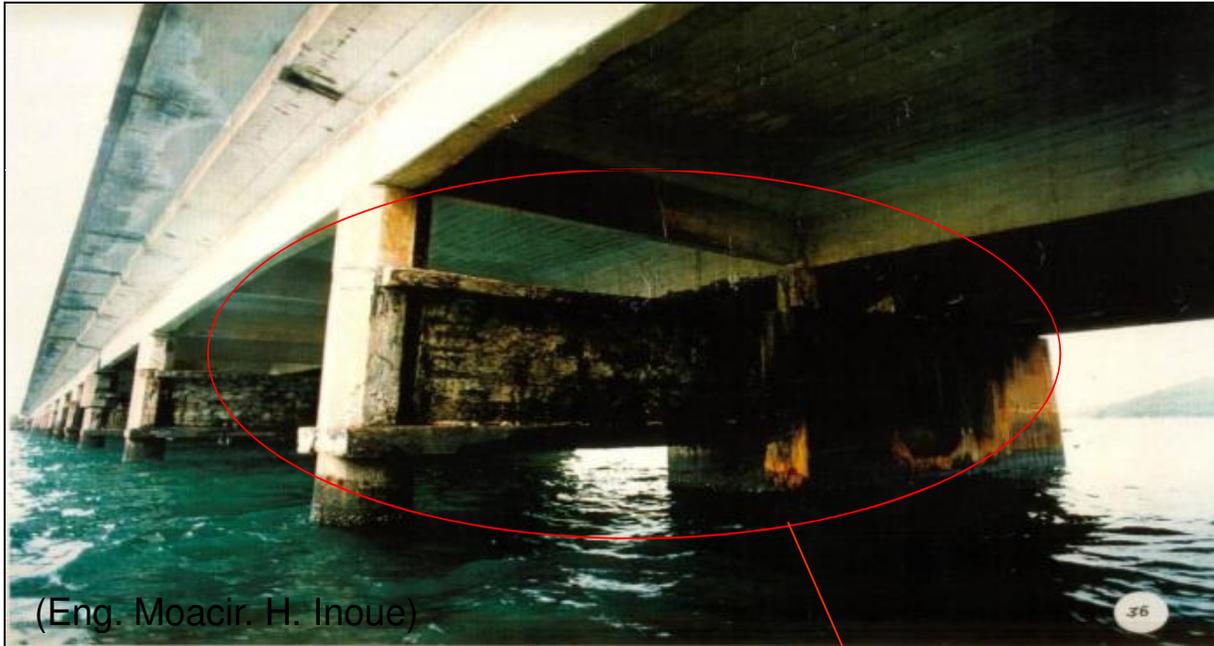
DETALHES CONSTRUTIVOS



União do gradil às armaduras provocou corrosão galvânica nestas.

Prevenção da corrosão das armaduras de CA: **FORMAS ARQUITETÔNICAS E DRENAGEM**

Infiltrações nas juntas e apoios de neoprene



Superfícies horizontais acumulam água

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

- Revestimento da estrutura – cerâmicas, argamassas, ...
- Pinturas hidrofugantes – permitam a saída e não entrada de água -
silicones, siloxanos;
- Revestimento das armaduras – pintura epóxi, galvanização;
- Armaduras especiais – aço inox, armaduras de fibras;
- Proteção catódica – ânodos de sacrifício;

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Argamassas e pintura

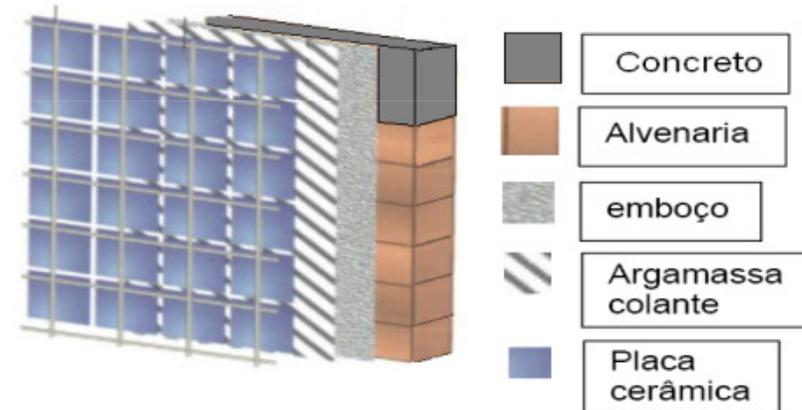
Protegem contra fatores agressivos externos como água, temperatura e gases, que possam ocasionar danos às estruturas e alvenarias.

Revestimentos

Cerâmica



(J. Freitas Jr.)



Camadas do revestimento da fachada

(J. Freitas Jr. - Adaptação)

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Pintura do concreto

Maneira econômica de se proteger o concreto armado da carbonatação e da agressividade química ambiental.

Desempenho de uma pintura para este fim, depende de sua capacidade de impedir a penetração de gases agressivos para o interior do concreto.

Todas as tintas e vernizes permitem a migração do vapor d'água em determinado grau; existem produtos mais permeáveis e outros menos.

Sobre concretos novos é importante salientar que uma tinta pouco permeável sofrerá pressões de vapor (tendência a formar bolhas).

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Pinturas hidrofugantes

Repelem eletricamente a água e reduzindo a penetração de umidade, permitindo a saída da água.

Não funcionam bem com relações a/c ou consumos de cimento muito altos, por ter sua eficiência prejudicada pela fissuração do concreto.

Selagem de concreto com silano para minimizar a penetração de água.



(B.Fournier, M.A. Bérubé, M.D.A. Thomas e K.J.Folliard)

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Armaduras revestidas

Pintura por termofusão epóxi

A película epóxi isola eletricamente as armaduras do eletrólito.



Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Armaduras revestidas

Galvanização

A película de zinco funciona como metal passivante.

Vergalhões galvanizados



Cordoalhas galvanizadas



Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Armaduras revestidas Galvanização



Devido a diferenças de potencial elétrico, o contato direto entre vergalhões galvanizados e não galvanizados promove a migração de íons de zinco para fora do concreto gerando manchas em sua superfície.

Caso sejam colocados em contato, estes materiais devem ser isolados eletricamente.

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Armaduras especiais

Armaduras de/ou revestidas com aço inox

Aços de elevada resistência à corrosão devido ao conteúdo de cromo presente na liga.



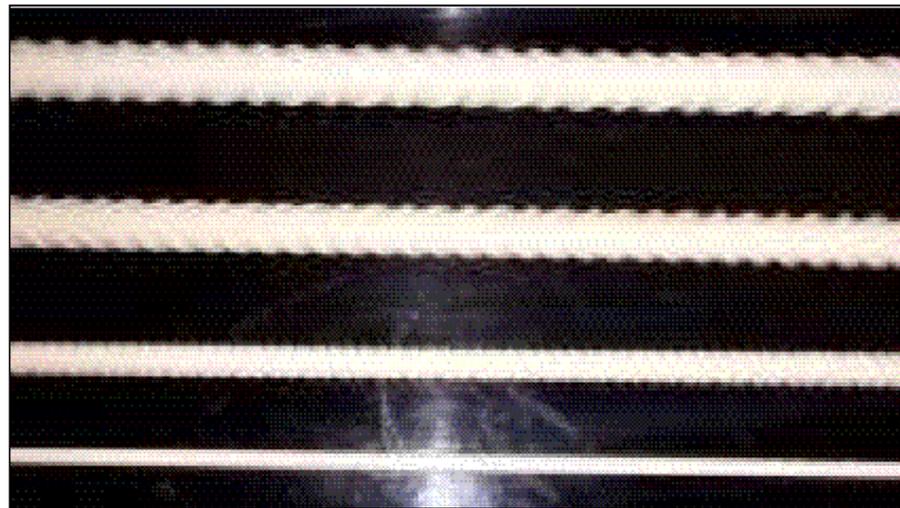
Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Armaduras especiais

Armaduras revestidas com nylon

Camada de nylon sobre as barras de aço protege contra a corrosão. Nylon tem melhor aderência que o epóxi ao concreto, embora seja de aplicação bem mais difícil. E.U.A e Alemanha.



(Ghaly, A. M.; Cahill, J. D. IV)

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Armaduras especiais

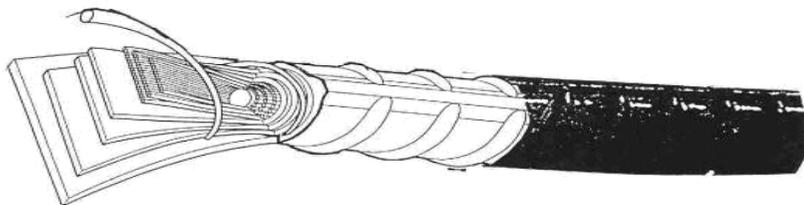
Armaduras plásticas reforçadas com fibras

Fibras de vidro (GFRP), carbono (CFRP) e aramida (AFRP), montadas com resinas de poliéster ou poliuretano formando vergalhões de compósitos.

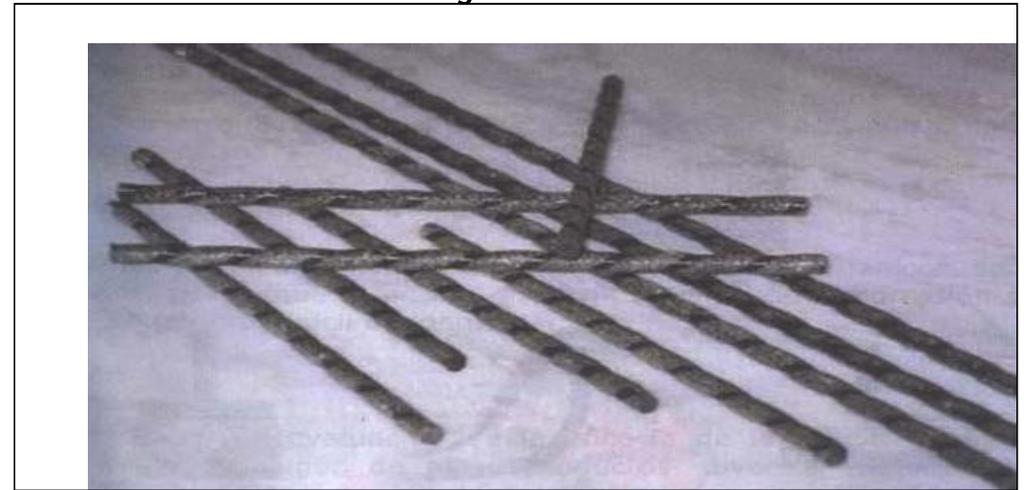
Resistência à tração superior a dos aços carbono.

Módulos de elasticidade elevados mas inferiores ao do aço.

Baixa resistência ao calor.



Marshall - CBAR



GONÇALVES, 2003

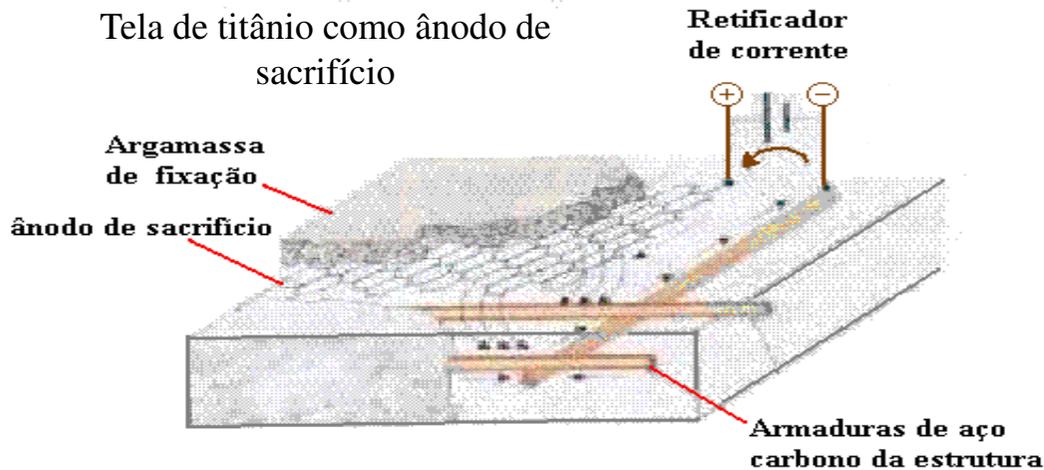
Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Proteção Catódica

Direciona a corrosão para um metal (ânodo) de sacrifício

Proteção com
corrente impressa



Proteção galvânica

Pastilha de zinco



Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Proteção Catódica

Direciona a corrosão para um metal (ânodo) de sacrifício

Quando se instala um anodo de sacrifício (pastilha ou tela), se cobre esta região com concreto com o mesmo traço do concreto anterior, o metal anódico empregado estará enviando corrente para a armadura, retornando a corrente para o anodo através dos arames de fixação.



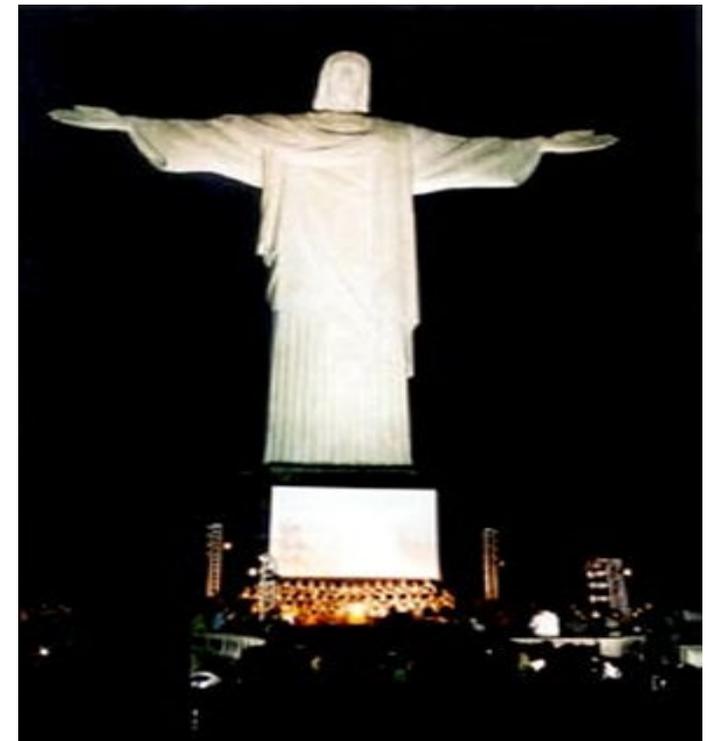
Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

MEDIDAS ESPECIAIS

Proteção Catódica

Direciona a corrosão para um metal (ânodo) de sacrifício

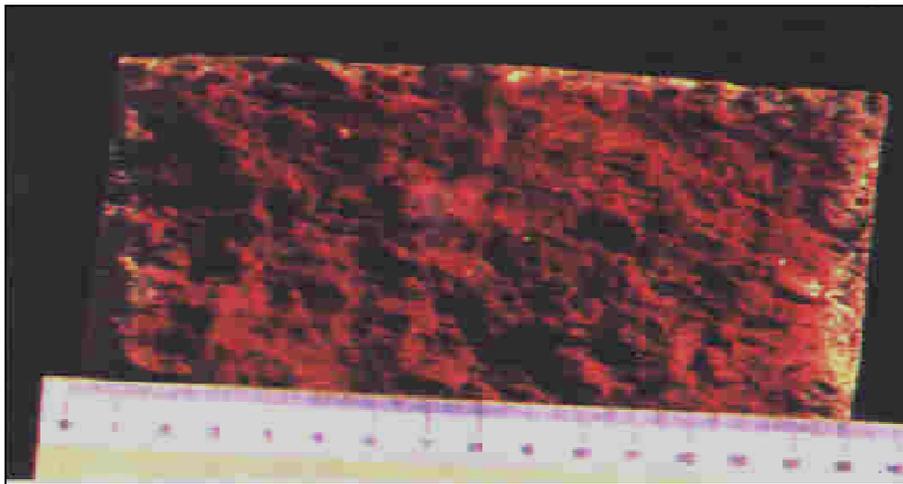
Na estátua foi instalada em 2002 uma tela de titânio ligada a uma corrente impressa para funcionar como proteção catódica. Quando eletrificada ela ganha carga positiva atraindo as partículas de cloreto de sódio que são negativas, retirando o sal da argamassa do Cristo, protegendo o monumento contra a corrosão.



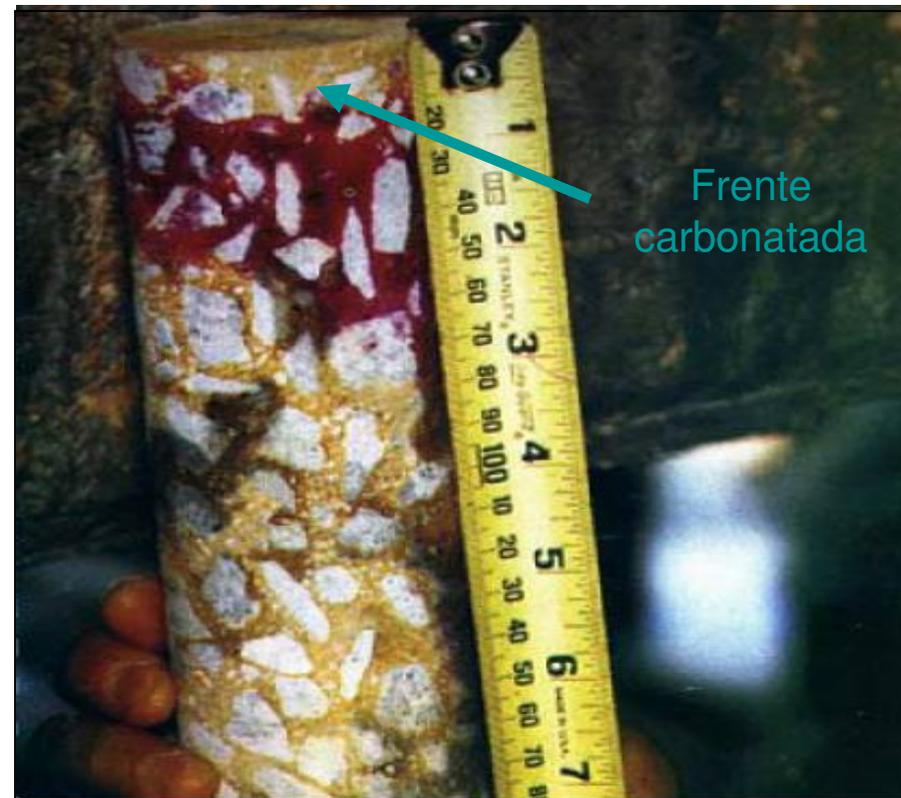
Avaliação da corrosão das armaduras de CA:

Avaliação: PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Fenolftaleína reage com o hidróxido de cálcio e fica na cor “vinho” indicando $\text{pH} > 8,5$.



(P.Helene, 1986)



Fenolftaleína em corpo de prova
ROCHA, 2005

Avaliação da corrosão das armaduras de CA:

Avaliação: POTENCIAL DE CORROSÃO

O potencial de corrosão das armaduras indica a situação de corrosão ou passividade destas, fornecendo informações qualitativas para serem utilizadas como complemento de outros ensaios.

Não dá informações sobre o quanto corroeu ou está corroendo, fornece somente a probabilidade do processo estar ocorrendo ou não.

É função de um grande número de variáveis: % umidade e oxigênio no concreto, cobrimento, fissuras e correntes erráticas.

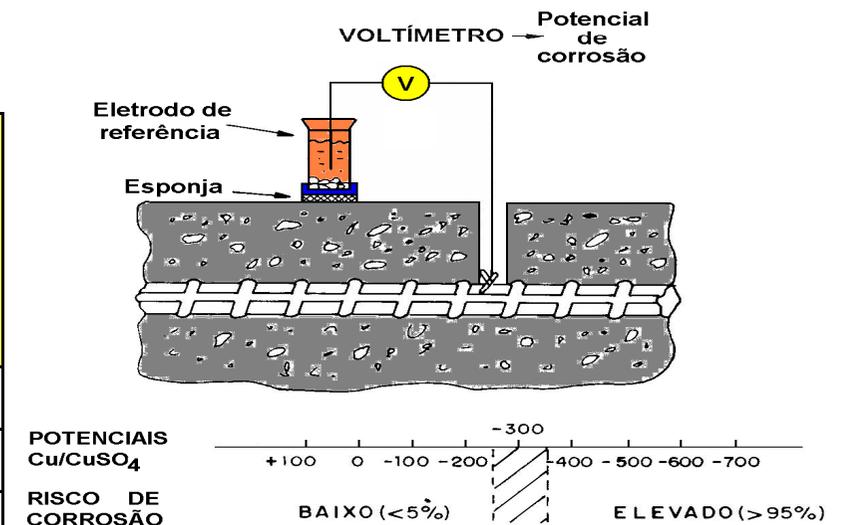


Avaliação da corrosão das armaduras de CA:

Avaliação: POTENCIAL DE CORROSÃO

Mede-se a ddp elétrica entre as armaduras e um eletrodo de referência que se coloca em contato com a superfície do concreto.

POTENCIAL DE CORROSÃO RELATIVO AO ELETRODO DE REFERÊNCIA DE COBRE-SULFATO DE COBRE-ESC (mV)	PROBABILIDADE DE CORROSÃO (%)
Mais negativo que -350	95%
Mais positivo que -200	5%
De -200 a -350	Incerta



(P.Helene, 1992)

Avaliação da corrosão das armaduras de CA:

Avaliação: RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica do concreto (condutividade iônica do eletrólito) é um parâmetro que em conjunto com a disponibilidade de oxigênio, controla a velocidade de corrosão do aço.

A resistividade depende fundamentalmente da umidade contida nos poros do concreto.

Existem dois métodos:

- a) Método dos “Quatro Eletrodos” ou método de Wenner
- b) Método da ABNT que emprega três eletrodos

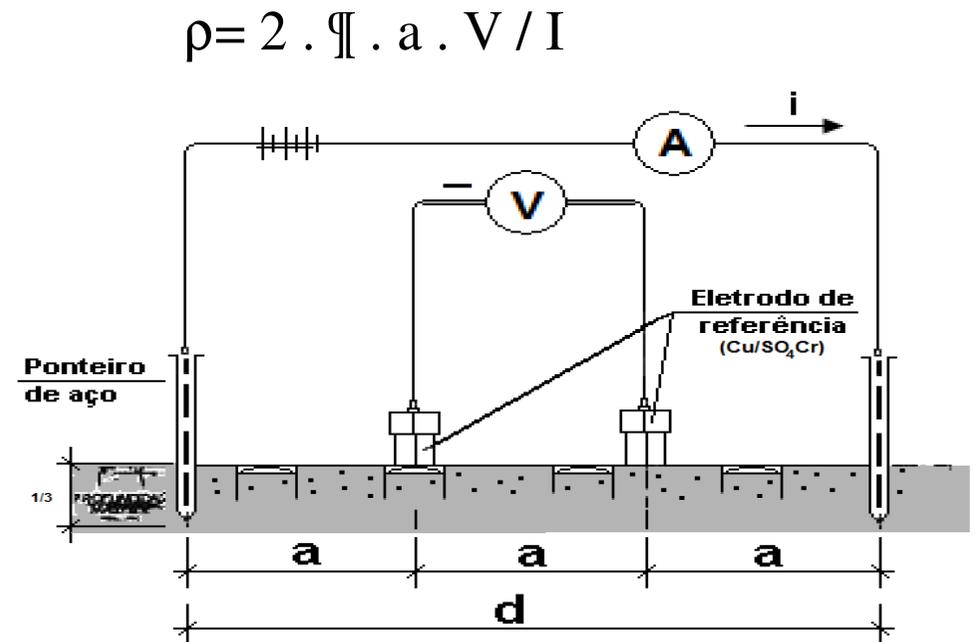


Avaliação da corrosão das armaduras de CA:

Avaliação: RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Uma corrente elétrica é aplicada entre os eletrodos externos. A diferença de potencial gerada entre os eletrodos internos propicia a medida da resistividade.

Balestra et al. (2019) (kΩ.cm)	Rilem TC154 (2000) (kΩ.cm)	Broomfield e Millard (2002) (kΩ.cm)	Probabilidade de corrosão
> 80	>100	-	Muito baixa
55 a 80	50 a 100	> 20	Baixa
20 a 55	10 a 50	5-20	Moderada
15 a 20	< 10	< 5	Alta
< 15	-	-	Muito alta



(P.Helene, 1992)

Avaliação da corrosão das armaduras de CA:

Avaliação: RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Rp representa a inércia do sistema em desenvolver processo eletroquímico de corrosão.

Aço passivado apresenta Rp muito maior que aço sofrendo corrosão.

Aplica-se um pequeno sinal à armadura em análise e, que exerce pequena polarização no aço, em torno do potencial livre que ele se encontra.

Caso esteja ocorrendo a corrosão, seu potencial livre é o próprio potencial de corrosão.

Avaliação da corrosão das armaduras de CA:

Avaliação: RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO

Para obtenção da R_p emprega-se um potenciostato.

Interliga-se eletrodo de referência às armaduras e um contra-eletrodo.

Fecha o circuito permitindo a circulação de corrente.



GRAU DE CORROSÃO	TAXA DE CORROSÃO	
	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{ano}$
Desprezível	0,1 a 0,2	1,1 a 2,2
Início de corrosão ativa	$>0,2$	$> 2,2$
Ataque importante mas não severo	$\sim 1,0$	$\sim 11,0$
Ataque muito importante	$> 10,0$	$> 110,0$

CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO PROTENDIDO

Corrosão sob-tensão

“Processo destrutivo de um metal ou liga metálica resultante da ação simultânea de um meio agressivo (específico para cada metal) e de tensões de tração estáticas residuais ou aplicadas sobre o metal ou liga”. (Wolyneec, 1979)

Características:

- Nem todos os metais ou ligas são suscetíveis (Ex. aço carbono não submetido ao processo de trefilação).
- Manifesta-se na forma transgranular ou transcristalina.
 - A fratura não apresenta estrição (fragilidade alta).

CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO PROTENDIDO

Corrosão sob-tensão

Características:

Produtos formados durante o processo corrosivo normalmente são invisíveis.

É possível ter peças trincadas ou rompidas por corrosão sob-tensão sem que a superfície denote evidência de processo corrosivo generalizado.

A corrosão sob-tensão somente ocorre quando ambas a tensão de serviço do metal e a concentração do agente agressivo ultrapassam certos valores críticos (somente ocorre em condições altamente específicas).

CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO PROTENDIDO

Corrosão sob-tensão

Se manifesta em fios e cordoalhas de concreto protendido.

- Ocorre a formação de trincas no interior dos grãos que rapidamente reduzem a seção da peça de aço.



RIMT®

Cordoalhas de concreto protendido

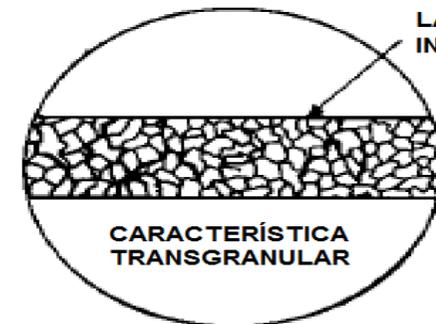
ASPECTO MACROGRÁFICO

SUPERFÍCIE DE INICIAÇÃO



ASPECTO MICROGRÁFICO

LADO DE INICIAÇÃO



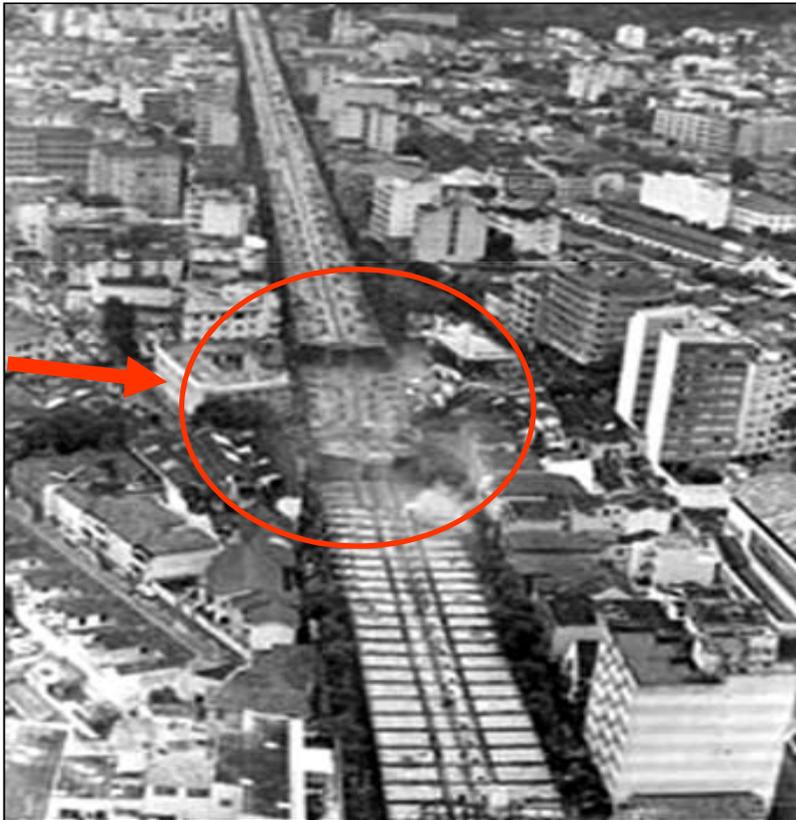
ESPESSURA

CARACTERÍSTICA TRANSGRANULAR

(C. T. Tebecherani)

CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO PROTENDIDO

- CASO: Corrosão transgranular ou transcristalina
 - Corrosão sob-tensão



Elevado Paulo de Frontin

Conclusões preliminares:

Corrosão das cordoalhas de protensão, janela de inspeção mantida aberta.

11/1971, Rio de Janeiro, 122 m do Elevado Paulo de Frontin, em construção, desabaram. Tragédia causou a morte de 28 e deixou 30 feridas, destruindo 17 carros, três táxis, um caminhão e um ônibus.

Desmoronamento aconteceu na hora em que um caminhão, carregado de concreto, passava sobre o trecho.

CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO PROTENDIDO

- CASO: Corrosão transgranular ou transcristalina
- Corrosão sob-tensão



Ponte dos Remédios

O acidente que parou São Paulo

3/6/97, São Paulo. Ponte com 29 anos de idade, 26 cabos de protensão rompidos.

Tecnologia do cimento da época é uma das causas da baixa durabilidade. Aço não era aliviado de tensões, relaxamento muito maior que o previsto. Bainhas não garantiam a vedação na concretagem, criavam atritos que reduziam a eficiência da protensão. Injeções de nata de cimento, com bombas manuais, não garantiam nem a aderência da armadura, nem a proteção contra *stress corrosion*.



CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO PROTENDIDO

Avaliação: AUSCULTAÇÃO DE CABOS PROTENDIDOS

R.I.M.T. - "Reflectometric Impulse Measurement Technique"

Verifica:

- Indícios de corrosão em cabos de C.P.
- O total preenchimento das bainhas pela calda de cimento.

Detectar corrosão em armaduras de C.A. é simples (aumento do volume do aço, e a expansão do cobrimento).

Os cabos de C.P ficam dentro de bainhas que não deixam aparecer os resíduos da corrosão.

Os fios e cabos sofrem de corrosão sob-tensão, que quase não tem sinais externos.

CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO PROTENDIDO

Avaliação: AUSCULTAÇÃO DE CABOS PROTENDIDOS

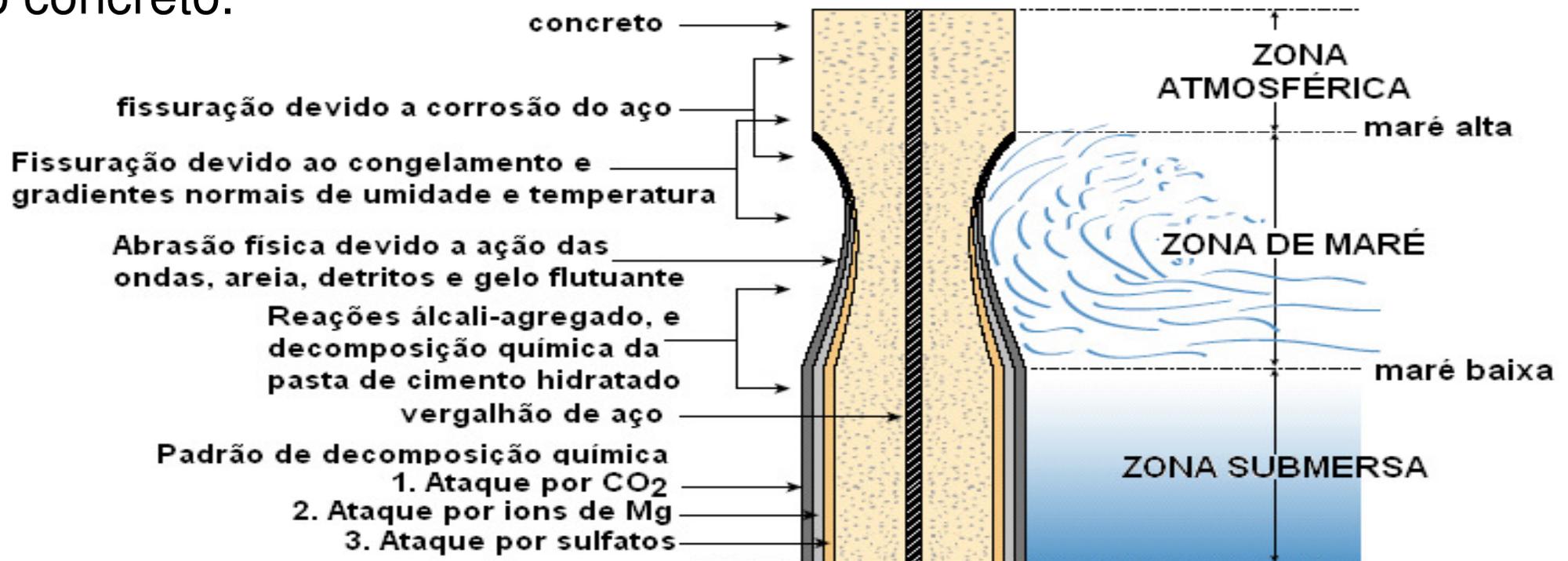
O R.I.M.T. se baseia na transmissão e captura de ondas eletromagnéticas de curtíssima duração, mediante o impulso enviado ao longo do cabo protendido pelo equipamento.



(Siqueira, Carlos H.)

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Estruturas de concreto em zonas costeiras são atacadas por diversos fenômenos simultaneamente, tornando o meio extremamente agressivo ao concreto.



(Mehta e Monteiro, 2006)

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Principais fenômenos atuantes:

Físicos:

Erosão, fissuração pela cristalização de sais nos poros, fissuração pelo gelo-degelo;

Químicos:

Ataque por sulfatos, baixo pH da água (baías e braços de mar), lixiviação e carbonatação, íons de cloro nas armaduras, reações álcali-sílica;

pH normal da água do mar - 7,5 a 8,4,

Matéria orgânica, em braços de mar e baías < 7,5.

A presença de sulfatos é moderada.

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

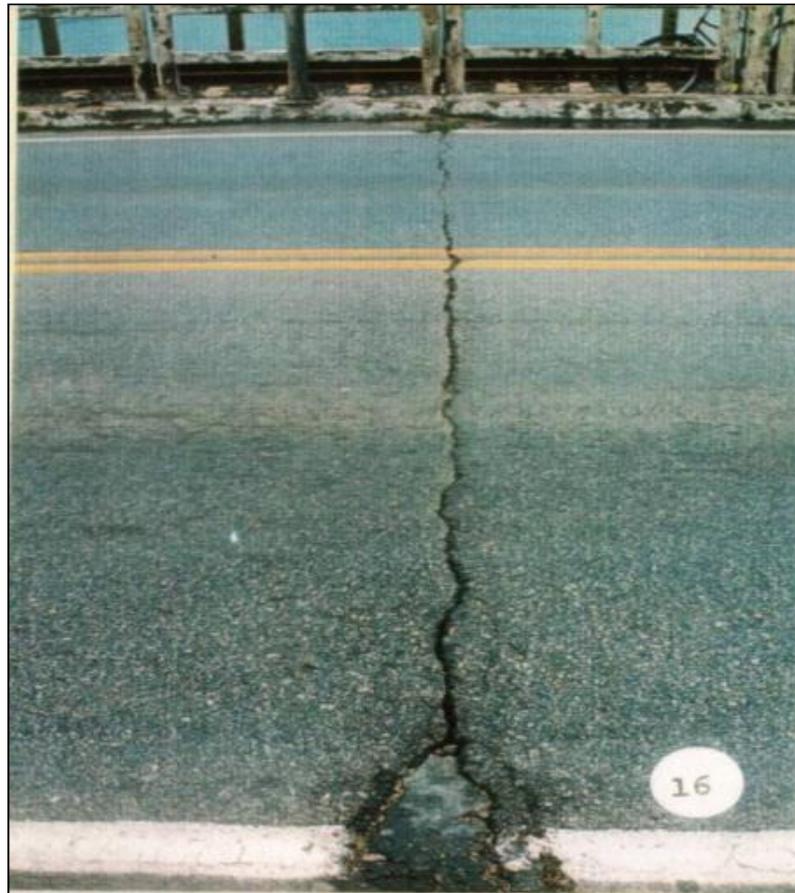
Atracadouro de barcos no litoral-PR
com 10 anos de idade



Instalação portuária com ataque
típico na zona de marés

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC



(Eng. Moacir H. Inoue)

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC

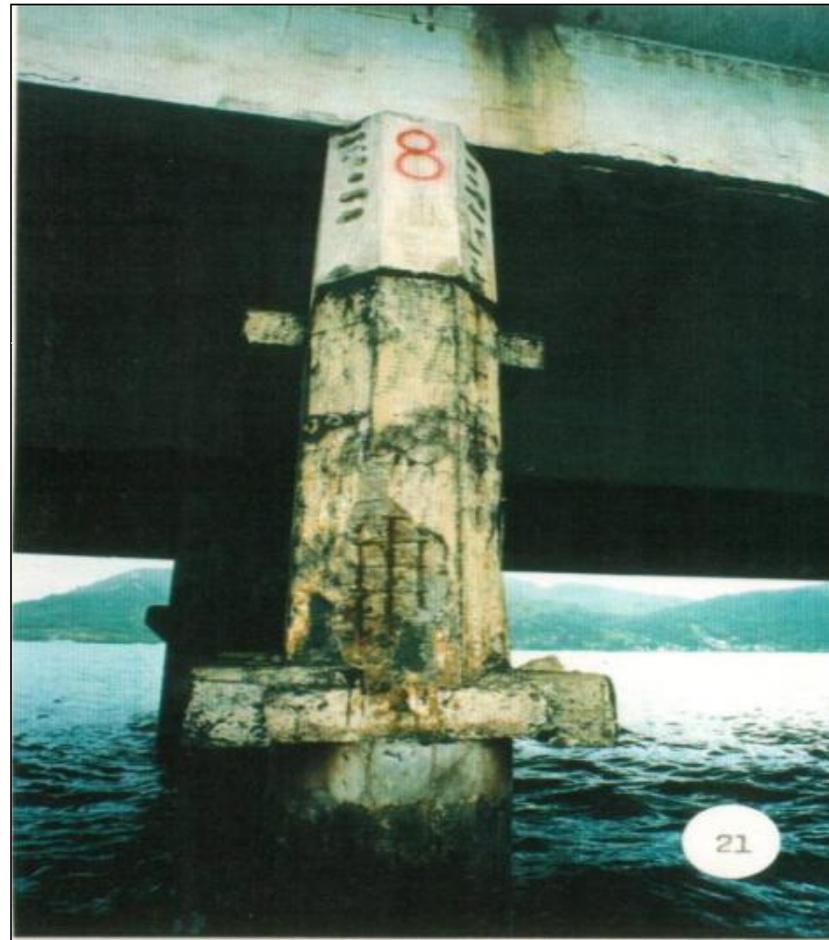


(Eng. Moacir H. Inoue)

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC

(Eng. Moacir H. Inoue)



ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC



ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC



Reparo inadequado

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC



(Eng. Moacir H. Inoue)

ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ZONA DE MARÉ:

Ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC



(Eng. Moacir H. Inoue)

Enquanto isso, na obra, na sacada com as armaduras corroídas...



Arquivo: Filmes concreto / Filmes engraçados / falha de sacada

*Problemas de durabilidade dos viadutos
Apresentando o viaduto mais forte do mundo...*



Materiais de Construção DURABILIDADE DO CONCRETO

Referências Bibliográficas:

- CONCRETO, ESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS, P. Kumar Mehta e Paulo J.M. Monteiro, São Paulo – Pini, 1994.
- MANUAL PARA DIAGNÓSTICO DE OBRAS DETERIORADAS POR CORROSÃO DE ARMADURA, Maria Del Carmen Andrade, São Paulo – Pini - 1992.
- MANUAL PARA REPARO, REFORÇO E PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO, Paulo Helene, São Paulo -Pini – 1992.
 - NBR-6118/2003
- FISURAS E GRIETAS EM MORTEROS Y HORMIGONES – Sus Causas y Remédios, Albert Joisel, Ed. Técnicos Asociados – Barcelona, España – 1972.
 - PATOLOGIA E TERAPIA DO CONCRETO ARMADO, Manuel Fernández Canovas, São Paulo - Pini - 1988.
- AÇÃO DO MEIO SOBRE O CONCRETO, Maria Alba Cincotto, Anais do Workshop sobre Durabilidade das Construções, ANTAC –1997
- MANUAL DE INSPECCION, EVALUACION Y DIAGNOSTICO DE CORROSION EM ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO, CYTED - Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnologia para el Desarrollo, Julio de 1998.
 - MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 1, L. A. Falcão Bauer, Rio de Janeiro, LTC – 1987.
- CONCRETOS – MASSA, ESTRUTURAL, PROJETADO E COMPACTADO COM ROLO – ENSAIOS E PROPRIEDADES, Equipe de Furnas, Laboratório de Concreto, Walton Pacelli de Andrade, São Paulo: Pini,1997.
- Produtos da reação álcali-silicato em concretos de edificações da região do Grande Recife – PE, Pecchio, M.; Kihara, Y.; Battagin, A. F.; Andrade, T., IBRACON 2006, Rio de Janeiro.