

Seminário: desafios do projeto,
produção e aplicação do concreto

Concretos Duráveis: o Novo Desafio da Engenharia



Oswaldo Cascuo
Universidade Federal de Goiás
PPG-GECON/UFG

São Paulo, 15/10/2015

Retração por secagem

Incidência de DURABILIDADE



Retração térmica -
calor de hidratação



Ações Físicas

Ações Químicas



Ataque por Sulfatos





Syracuse University - New York

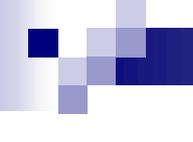
**CORROSÃO
DAS
ARMADURAS**



Zona de respingo de maré



Zona de respingo de maré



ACIDENTES ESTRUTURAIIS

Palace II - Rio de Janeiro



Custo Social

Colapso: 22/02/98

- 8 vítimas fatais
- 176 famílias desabrigadas

Ed. Areia Branca - Recife (2004)



Custo Social



21 1 2005

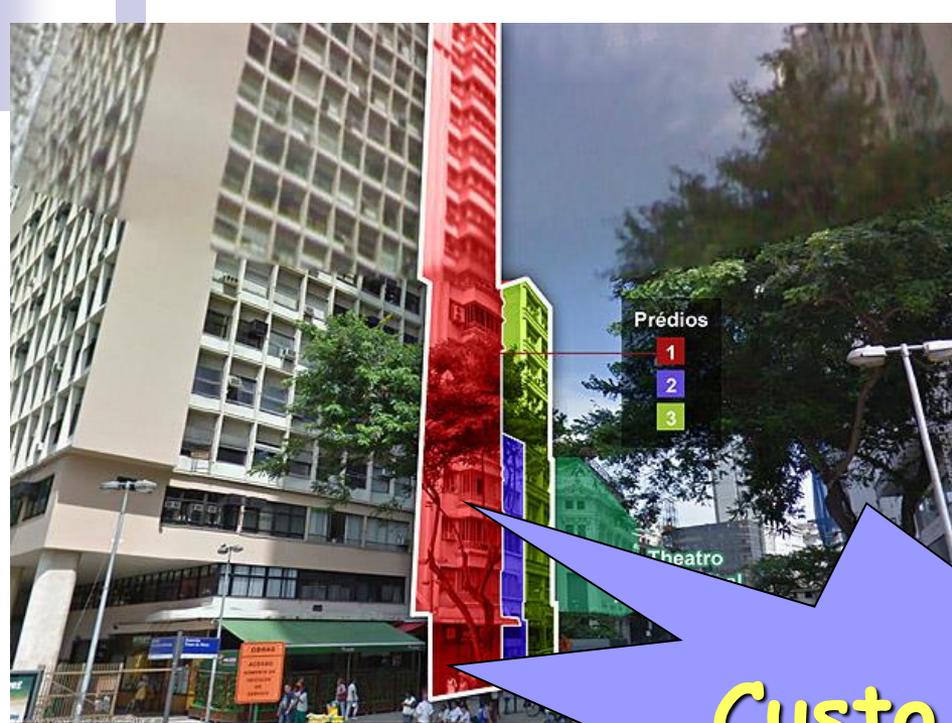
Colapso no Centro do Rio de Janeiro

Desabamento de 3 edifícios
(20, 10 e 4 pavimentos)

Custo Social



Colapso: 25/01/2012
• 17 vítimas fatais



Viaduto Batalha dos Guararapes - Belo Horizonte (2014)



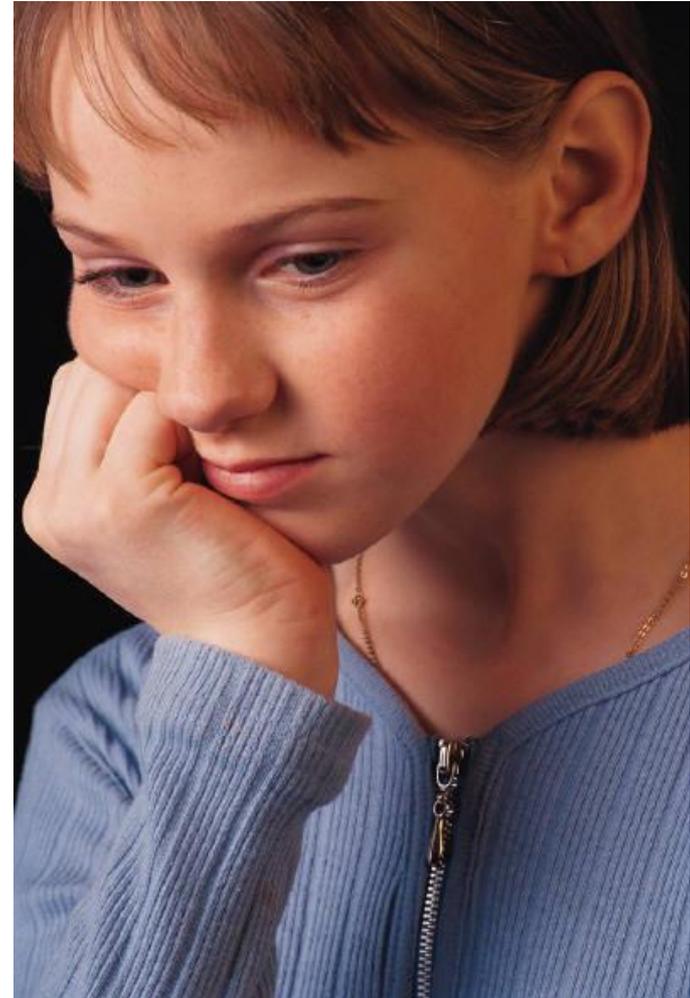
Custo Social

Viaduto Batalha dos Guararapes



**Desabamento em
03/07/2014**

- 2 vítimas fatais
- 22 feridos



Hora de
mudar esse
status quo?

Contemporaneidade...

Concepção Estrutural e
Especificação do
Concreto baseadas no
DESEMPENHO

Abordagem prescritiva X Abordagem de desempenho

- As normas prescritivas estabelecem requisitos com base no uso consagrado de materiais, produtos ou procedimentos, por meio do controle de parâmetros ou propriedades básicas ➡ o atendimento aos requisitos dos usuários se dá de forma indireta;
- A abordagem de desempenho traduz requisitos dos usuários em critérios e especificações, por meio de parâmetros e propriedades estritamente ligadas aos aspectos de desempenho estabelecidos ➡ o atendimento aos requisitos dos usuários se dá de forma direta.

Durabilidade - Abordagem Baseada no Desempenho

- ✓ Não **compete** ou não se **conflita** com a abordagem **prescritiva**;
- ✓ **Atem-se** aos aspectos diretamente **ligados** ao fenômeno de **deterioração**;
- ✓ Prevê que as **solicitações** prováveis no campo da **durabilidade**, associadas à **agressividade ambiental**, sejam claramente **entendidas** e **caracterizadas**;
- ✓ Prevê uma reflexão sobre as propriedades de **transporte de massa** no concreto e sobre os **mecanismos de deterioração e envelhecimento**;
- ✓ Promove uma "**busca**" em relação aos **parâmetros de desempenho** (**indicadores de durabilidade**);
- ✓ Propicia a análise **preditiva de vida útil** das estruturas.

Desempenho

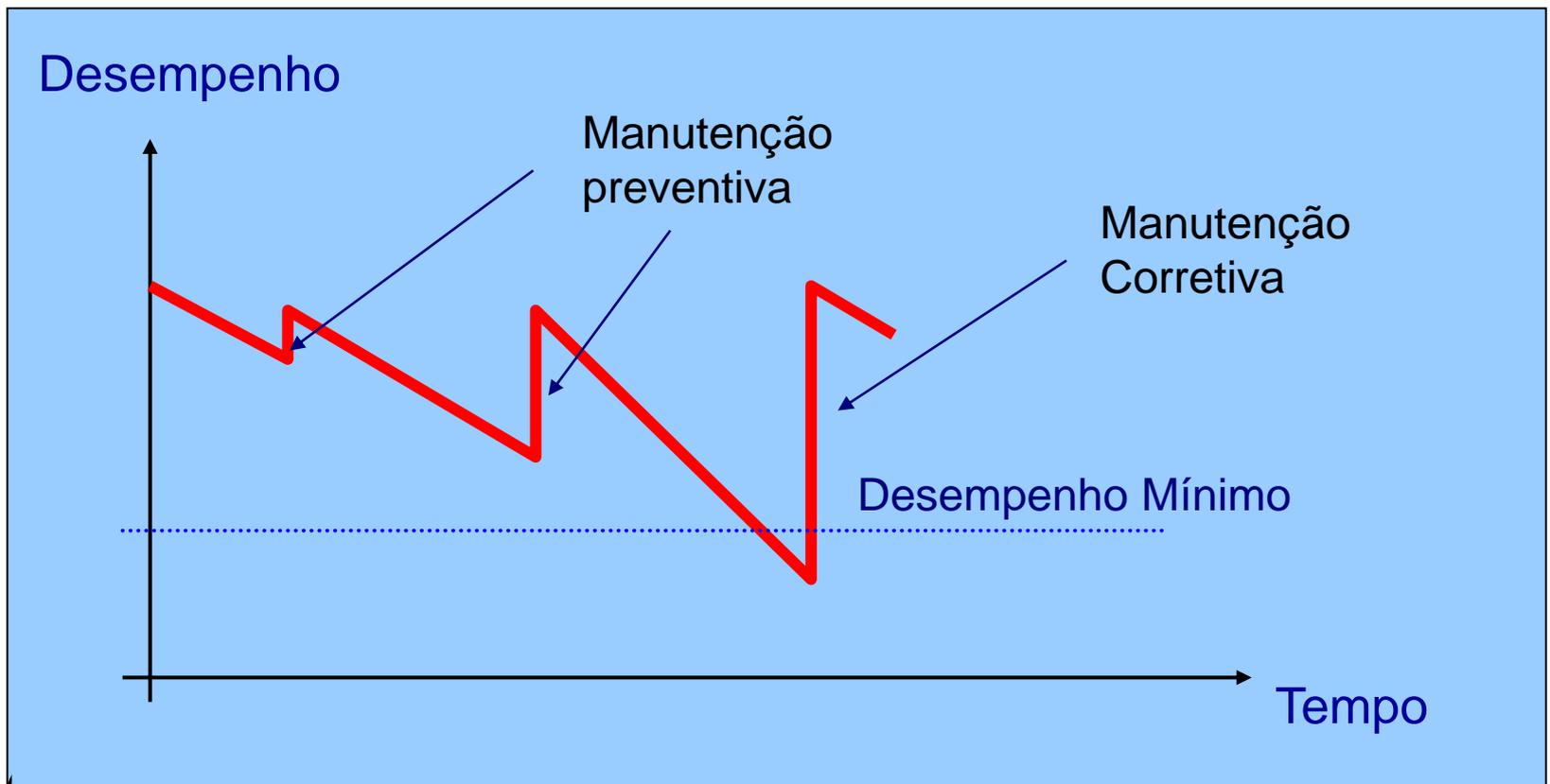
"A ideia do conceito de desempenho é exatamente a de verificar como é que a edificação ou obra de arte **responde** a um **conjunto de solicitações** a que estará submetida e se ela atende ou não às **exigências dos usuários** que estarão usufruindo dela."



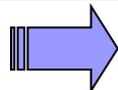
Desempenho remete ao cumprimento de **objetivos** e **funções** ao longo de um **período de tempo** (vida útil)

DESEMPENHO

“Comportamento de um produto em uso”



Desempenho ruim



manutenção mais intensa

Níveis de Abordagem para a Concepção de Estruturas de Concreto Duráveis

Nível 1

➔ **Abordagem prescritiva**: C_{cim} mín, a/c máx, cobrim. mín, f_{ck} mín, tipo de cimento, etc. Adequado para $VUP \leq 50$ anos

Nível 2

➔ **Abordagem mista**: utiliza os indicadores de durabilidade ($K_{água}$, $K_{gás}$, D_{Cl^-} , $\rho_{elétr}$, etc.). Adequado para VUP entre 50 e 100 anos

Nível 3

➔ **Abordagem de desempenho**: emprega modelos preditivos de vida útil (modelos de carbonatação, de cloretos). Modelos mais simples (Leis de Fick) ou mais complexos. Modelos determinísticos. Adequado para $VUP \geq 100$ anos

Nível 4

➔ **Abordagem de desempenho**: emprega modelos preditivos de vida útil mais sofisticados. Modelos probabilísticos ou semi probabilísticos. Adequado para $VUP \geq 100$ anos

Durabilidade - Abordagem Prescritiva (Nível 1)

- ❑ No Brasil: grande avanço NBR 6118/2003 (2007, 2014).
 - 4 CAA: I, II, III e IV;
 - Controle da qualidade do concreto: rel. a/c máx e f_{ck} mín;
 - Controle do cobrimento;
 - Controle da abertura de fissura máx. característica.
- ❑ No contexto internacional: conteúdo consistente de orientação qto à durabilidade (Ex. norma europeia EN 206-1).
 - EN 206-1: 18 classes de exposição (CE), agrupadas em 6 famílias;
 - Para cada CE, a norma descreve o ambiente e o tipo de concreto, dando exemplos de estruturas ou de parte delas a título informativo;
 - Parâmetros de controle: rel. a/c máx, C_{cim} mín, f_{ck} mín, e, em alguns casos, o teor de ar mín do concreto (gelo-degelo).

Durabilidade - Abordagem Prescritiva

Classes de Exposição - Visão Brasileira

Classes de Agressividade Ambiental – NBR 6118/2014

Classe de agressividade ambiental (CAA)	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Moderada	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Durabilidade - Abordagem Prescritiva

Isto é necessário!!!

Prescrições de rel. a/c máx. e f_{ck} mín. função da CAA

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:

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.

CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

É suficiente???

Durabilidade - Abordagem Prescritiva

Classes de Exposição segundo a norma europeia EN 206-1:

X0: nenhum risco de corrosão e nem de ataque;

XC1 a XC4: corrosão por carbonatação;

XS1 a XS3: corrosão por cloretos presentes na água do mar;

XD1 a XD3: corrosão por cloretos de outra origem que não a marinha;

XF1 a XF4: ataque gelo-degelo com ou sem agente de degelo;

XA1 a XA3 : ataques químicos.

"Uma visão prescritiva, baseada na resistência à compressão, pode produzir 2 concretos similares em termos deste parâmetro (resistência), porém com durabilidades potenciais muito diferentes."

Visão prescritiva da NBR 6118 em relação à durabilidade:



Não assegura Vida Útil de Projeto



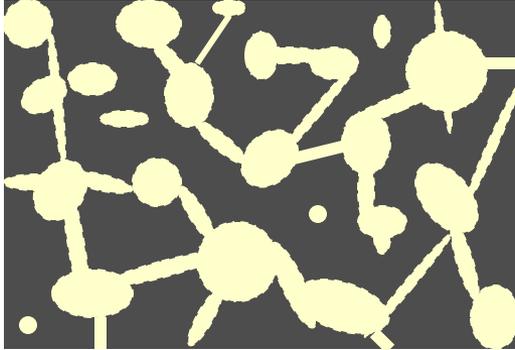
Precisa ser cumprida

Não está sendo cumprida !!!

MUITO IMPORTANTE
(medidas qualificadoras do concreto)

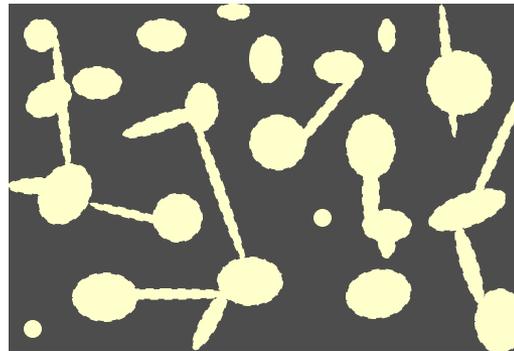


$a/c = 0,75$

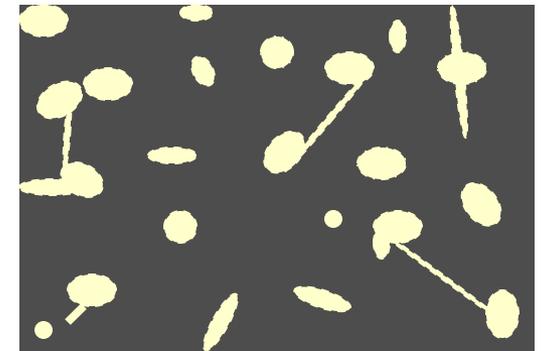


Porosidade do concreto - após o endurecimento

$a/c = 0,55$



$a/c = 0,35$



OBS.:

Rel. $a/c > 0,50$: poros começam a ficar interconectados

Rel. $a/c > 0,70$: poros 100% interconectados (concreto permeável)

Requisitos de Vida Útil

Norma de desempenho

**ABNT NBR 15575: 2013 - Edificações habitacionais -
Desempenho**

Critérios de VUP (Vida Útil de Projeto) segundo a
NBR 15575/2013:

- Desempenho mínimo: $VUP \geq 50$ anos;
- Desempenho intermediário: $VUP \geq 63$ anos;
- Desempenho superior: $VUP \geq 75$ anos.

Durabilidade - Abordagem Mista (Nível 2)

- A prescrição do concreto se dá por meio dos indicadores de durabilidade (ou parâmetros de desempenho);
- A chance de errar na previsão é muito menor (em relação a uma visão estritamente prescritiva), haja vista a proximidade dos indicadores de durabilidade com os mecanismos de transporte ou com os mecanismos de deterioração e envelhecimento;
- Principais indicadores de durabilidade: (**grandezas físicas mensuráveis**): permeabilidade aos líquidos e gases, coeficiente de carbonatação acelerada, coeficiente de difusão de cloretos, resistividade elétrica do concreto, porosidade, absorção de água, etc.

Corrosão Induzida por Carbonatação (c=30 mm)

Durabilidade potencial baixa
Durabilidade potencial média
Durabilidade potencial elevada
Durabilidade potencial muito elevada

Tipo de ambiente	1	2	3	
Vida útil exigida <i>Categoria da estrutura</i> Nível de exigência	Seco e muito seco (UR < 65%) ou úmido continuamente	Úmido (UR > 80%)	Moderadamente úmido (65% < UR < 80%)	Ciclos frequentes de umidificação-secagem
< 30 anos Nível 1	$p_{\text{água}} < 16$	$p_{\text{água}} < 16$	$p_{\text{água}} < 15$	$p_{\text{água}} < 16$
De 30 a 50 anos Edificação Nível 2	$p_{\text{água}} < 16$	$p_{\text{água}} < 16$	$p_{\text{água}} < 14^{(5)}$	$p_{\text{água}} < 14^{(6)}$
De 50 a 100 anos Edificação e demais obras civis Nível 3	$p_{\text{água}} < 14^{(5)}$	$p_{\text{água}} < 14^{(5)}$	$p_{\text{água}} < 12^{(7)}$ $k_{\text{gás}} < 100^{(8)}$	$p_{\text{água}} < 12^{(7)}$ $k_{\text{liq}} < 0,1^{(9)}$
De 100 a 120 anos Grandes estruturas/ Obras de grande porte Nível 4	$p_{\text{água}} < 12$ $k_{\text{gás}} < 100$	$p_{\text{água}} < 12$ $k_{\text{gás}} < 100$	$p_{\text{água}} < 9$ $k_{\text{gás}} < 10^{(4)}$	$p_{\text{água}} < 9$ $k_{\text{gás}} < 10$ $k_{\text{liq}} < 0,01$
> 120 anos Estruturas excepcionais Nível 5	$p_{\text{água}} < 9$ $k_{\text{gás}} < 10$	$p_{\text{água}} < 9$ $k_{\text{liq}} < 0,01$	$p_{\text{água}} < 9$ $k_{\text{gás}} < 10$ $k_{\text{liq}} < 0,01$	$p_{\text{água}} < 9$ $D_{a(\text{mig})} < 1$ $k_{\text{gás}} < 10$ $k_{\text{liq}} < 0,01$

Proposta do Guia da Association Française de Génie Civil (AFGC)

Em que:

$p_{\text{água}}$: (%)

$D_{a(\text{mig})}$: ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$k_{\text{gás}}$: (10^{-18} m^2)

k_{liq} : (10^{-18} m^2)

Corrosão Induzida por Cloretos (c=50 mm)

Durabilidade potencial baixa
Durabilidade potencial média
Durabilidade potencial elevada
Durabilidade potencial muito elevada

Tipo de ambiente	5		6	
Vida útil exigida	Exposição a sais marinhos ou de degelo		Imersão em água contendo cloretos	Zona de maré
<i>Categoria da estrutura</i>	5.1	5.2		
Nível de exigência	[Cl ⁻] baixa ⁽¹⁾	[Cl ⁻] alta ⁽²⁾		
< 30 anos Nível 1	p _{água} < 16	p _{água} < 14	p _{água} < 15	p _{água} < 14
De 30 a 50 anos <i>Edificação</i> Nível 2	p _{água} < 15	p _{água} < 11	p _{água} < 13	p _{água} < 11
De 50 a 100 anos <i>Edificação e demais obras civis</i> Nível 3	p _{água} < 14	p _{água} < 11 D _{a(mig)} < 2 k _{liq} < 0,1 ⁽³⁾	p _{água} < 13 D _{a(mig)} < 7	p _{água} < 11 D _{a(mig)} < 3 k _{liq} < 0,1 ⁽³⁾
De 100 a 120 anos <i>Grandes estruturas/ Obras de grande porte</i> Nível 4	p _{água} < 12 D _{a(mig)} < 20 k _{liq} < 0,1 ⁽³⁾	p _{água} < 9 D _{a(mig)} < 1 k _{gás} < 10 k _{liq} < 0,1	p _{água} < 12 D _{a(mig)} < 5	p _{água} < 10 D _{a(mig)} < 2 k _{gás} < 100 k _{liq} < 0,05
> 120 anos <i>Estruturas excepcionais</i> Nível 5	p _{água} < 9 D _{a(mig)} < 20 k _{gás} < 10 k _{liq} < 0,01	p _{água} < 9 D _{a(mig)} < 1 k _{gás} < 10 k _{liq} < 0,01	p _{água} < 9 D _{a(mig)} < 1	p _{água} < 9 D _{a(mig)} < 20 k _{gás} < 10 k _{liq} < 0,01

Proposta do Guia da Association Française de Génie Civil (AFGC)

Em que:

p_{água}: (%)

D_{a(mig)}: (10⁻¹² m².s⁻¹)

k_{gás}: (10⁻¹⁸ m²)

k_{liq}: (10⁻¹⁸ m²)

Durabilidade - Abordagem de Desempenho (nível 3)

Modelos Preditivos de Vida Útil - Determinísticos

- ❑ Vários modelos (abordagem empírica e os mais complexos);
- ❑ Os mais simples são baseados nas leis de Fick;
- ❑ Os mais complexos incorporam mecanismos físico-químicos;
- ❑ Nos modelos determinísticos, em geral, valores médios são atribuídos aos parâmetros de entrada;
- ❑ Há necessidade de parâmetros de calibração.

Durabilidade - Abordagem de Desempenho (nível 4)

Modelos Preditivos de Vida Útil - Probabilísticos

- ❑ Levam em conta a variabilidade dos fenômenos;
- ❑ Variável = lei de distribuição de seus valores possíveis (densidade de probabilidades);
- ❑ Avaliação mais rica, porém muito mais complexa (análise de todas as fontes de incertezas, necessidade de um grande volume de dados de entrada);
- ❑ Apesar disso, essa abordagem já começa a ser empregada na normalização internacional (como, p. ex., no Eurocode 2).

Desafios em curto prazo

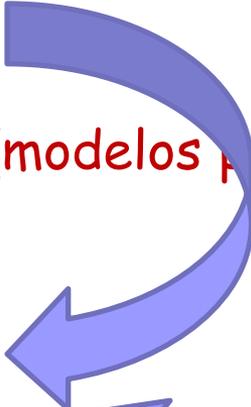


abordagem NÍVEL 2

Desafios em médio e longo prazo



NÍVEIS 3 e 4 (modelos predict. de VU)



$P_{(água)}$

$k_{água}$

$k_{gás}$

ρ_{eletr}

etc...



Alguns
Indicadores de
Durabilidade...



k_{carb}



D_{nss}

Coeficiente de Difusão de Cloretos - Ambientes Marinhos



Obra da Petrobrás em Macaé - RJ

Zonas de respingo de
maré

Classe de Agressividade
Ambiental (CAA) IV
pela NBR 6118/2014



Terminal Pesqueiro -
Santos/SP

19.10.2007

Atmosferas Marinhas

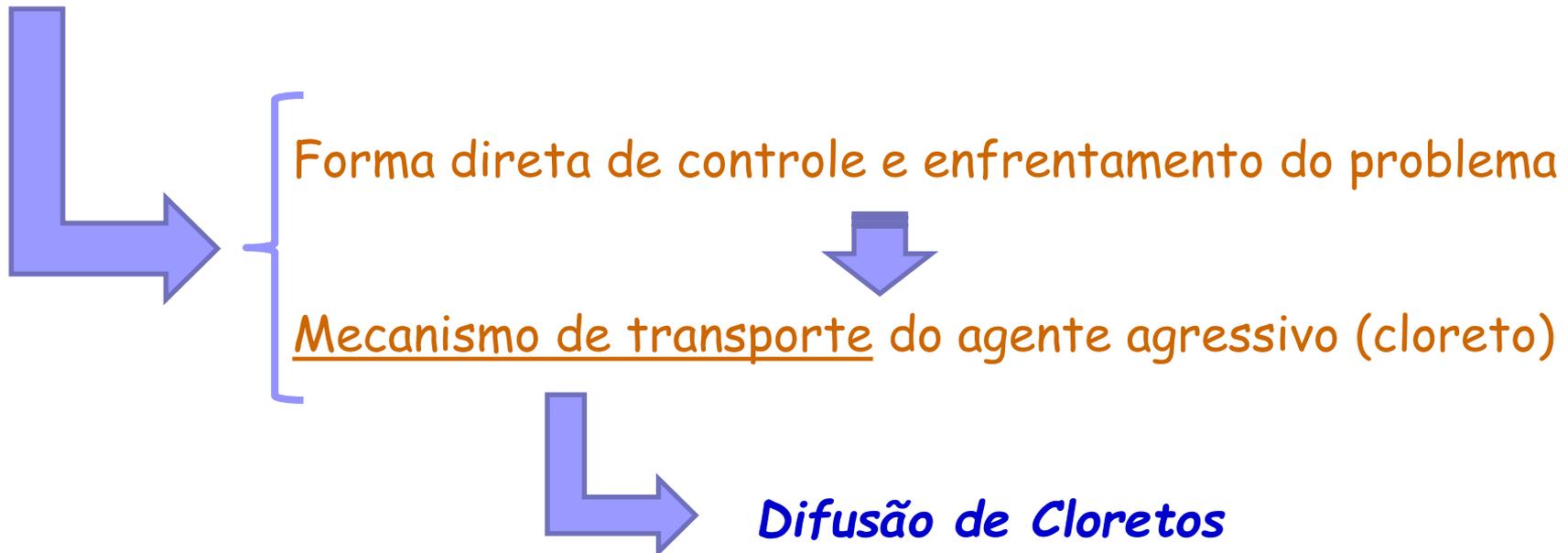


Zonas sujeitas à névoa salina ou spray marinho – ação de cloretos/corrosão das armaduras

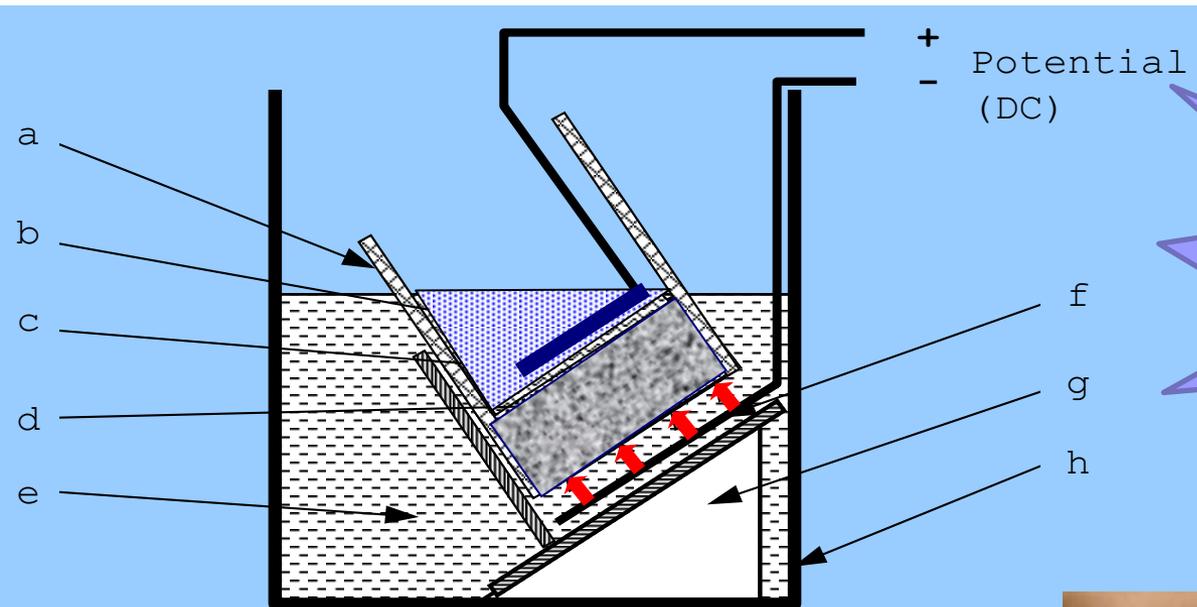
Requisito de desempenho: **baixa difusividade de íons Cl^-**

Parâmetro de desempenho: **coeficiente de difusão de Cl^-**

Abordagem de Desempenho



Coeficiente de Difusão em Regime não Estacionário - NT BUILD 492 (Ensaio de Migração)

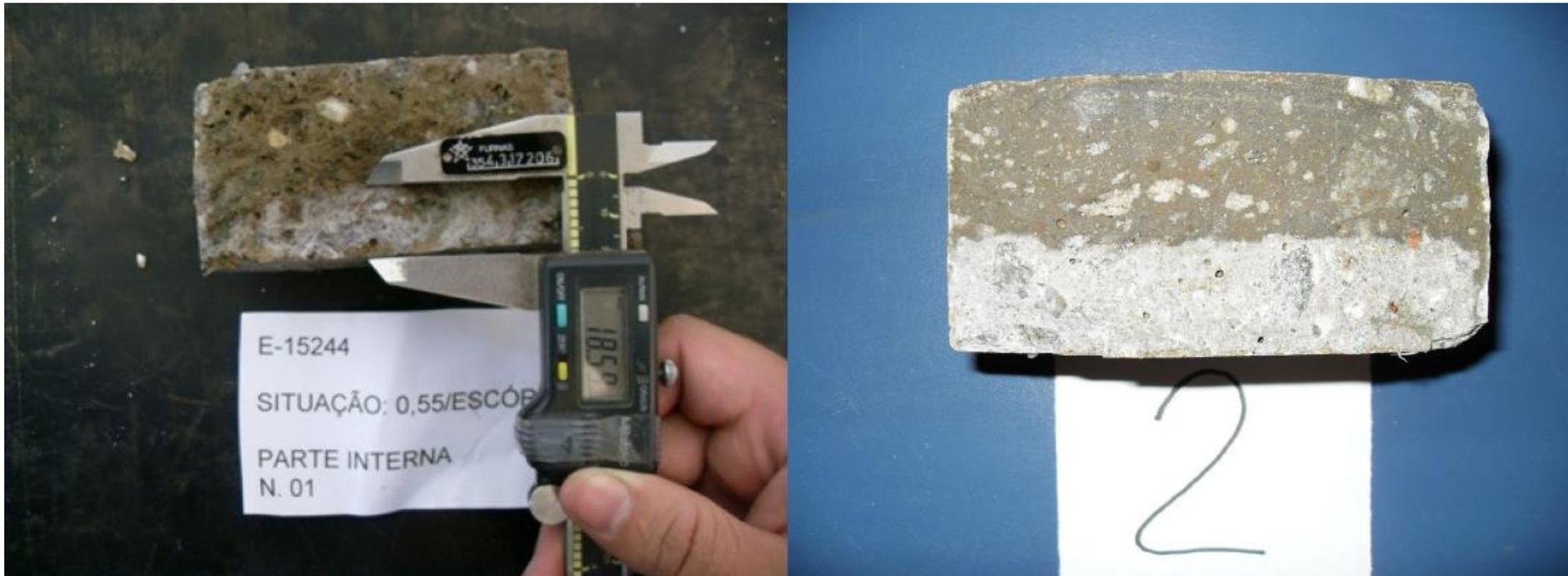


- a. Rubber sleeve
- b. Anolyte
- c. Anode
- d. Specimen
- e. Catholyte
- f. Cathode
- g. Plastic support
- h. Plastic box

Normalização atrasada no Brasil



Ensaio em Regime não Estacionário - NT BUILD 492



$$D = \frac{0.0279(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right)$$

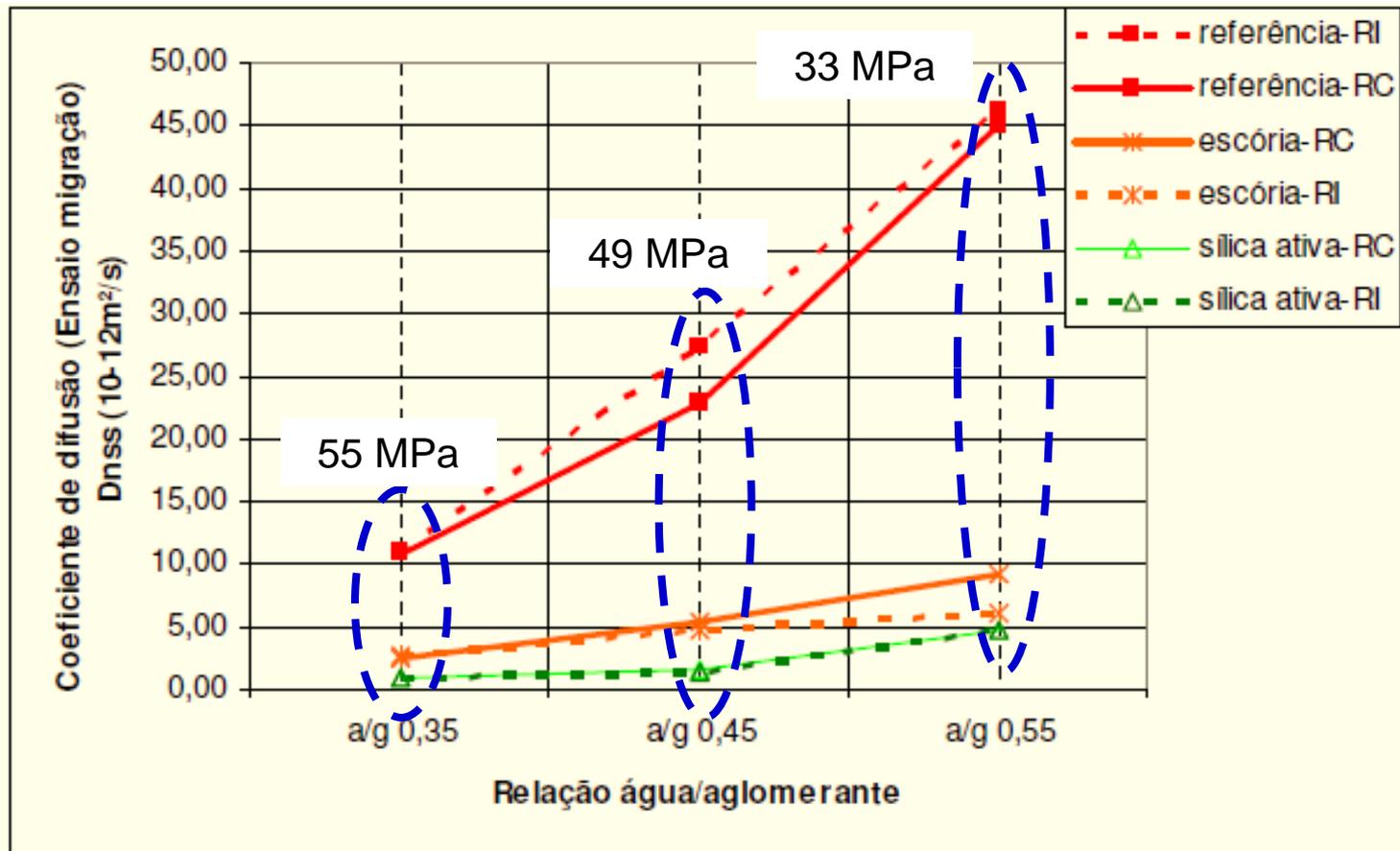
- D= coeficiente de difusão em regime não estacionário ($\times 10^{-12}$ m²/s);
U= valor da diferença de potencial do campo elétrico (V);
T= valor médio da temperatura inicial e final da solução anódica (°C);
L= espessura do corpo-de-prova (mm);
 x_d = valor médio da penetração de íons cloro (mm);
t= duração do ensaio (horas).

Classes de Resistência do Concreto à Penetração de Cloretos

(GJORV, 2001)

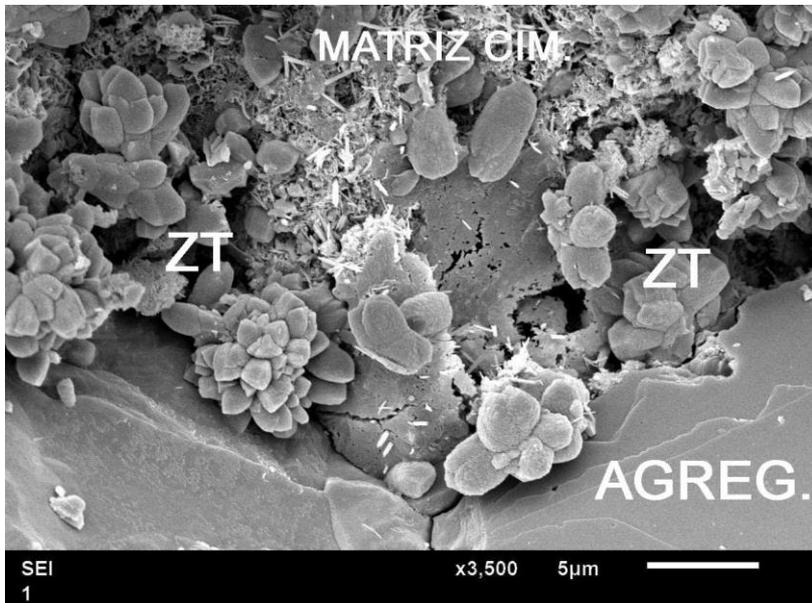
Coeficiente de Difusão em Estado não Estacionário - D_{ns}	Classes de Resistência à Penetração de Cloretos
$D_{ns} \geq 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Reduzida
$10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito Elevada
$D_{ns} \leq 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Ultra Elevada

Coeficientes de Difusão em função da Relação a/c e Adições Minerais



Risco da abordagem
meramente prescritiva!

(Mendes, Cascudo, Carasek, 2009)



Adições Minerais

(Sílica Ativa, Metacaulim, CCA...)

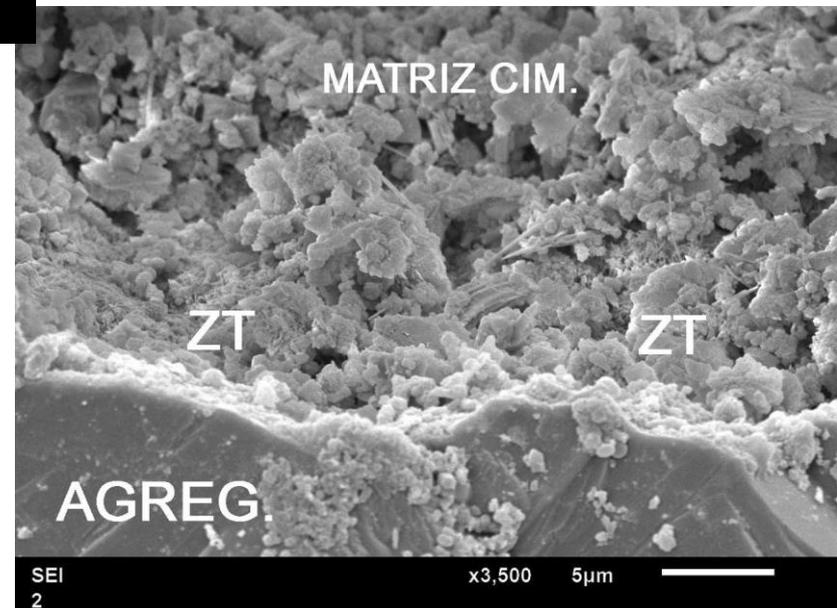
Interface pasta-agregado



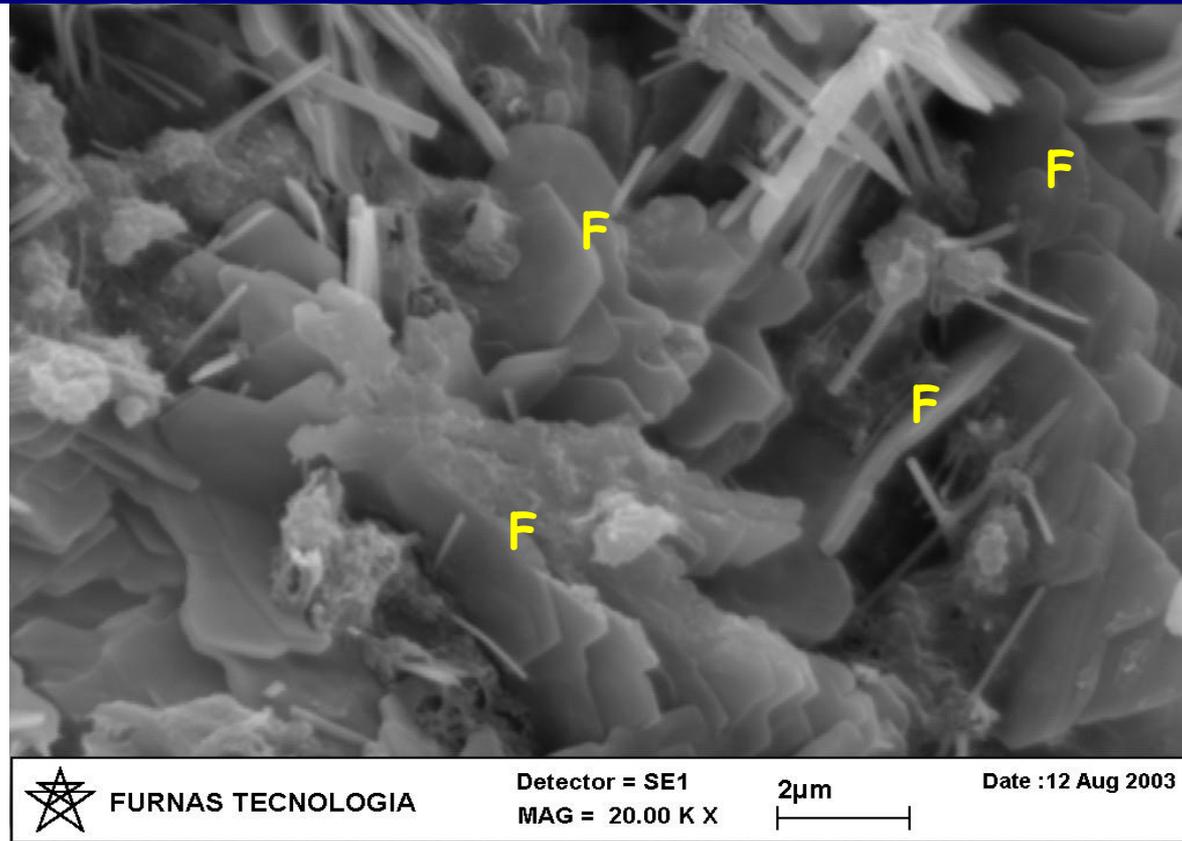
Sem adições



Com adições



Ação da Escória de Alto-Forno



Efetiva fixação de Cl^- na forma de "sal de Friedel"
(cloroaluminato de cálcio)



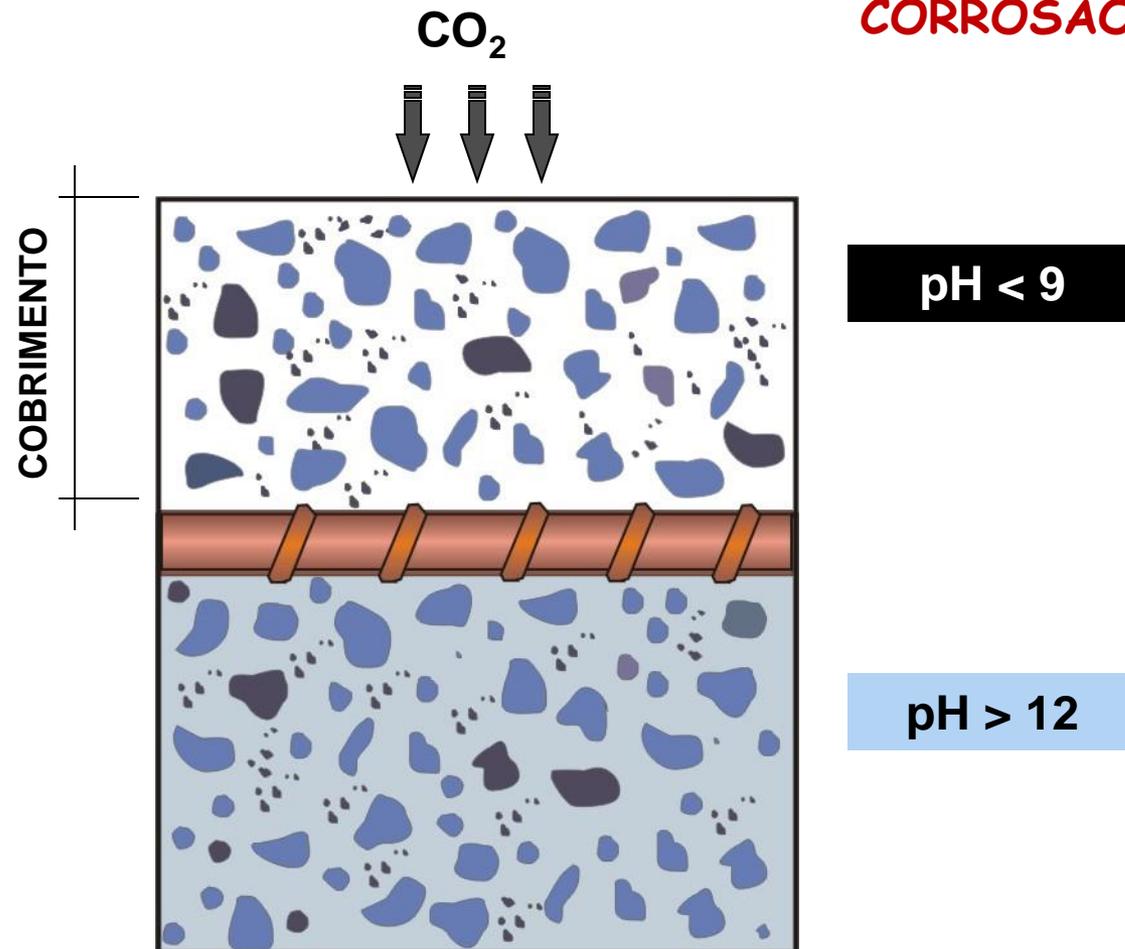
Atmosferas Urbanas e Urbanas/Industriais

Fenômeno preponderante:
Carbonatação do Concreto



Frente de Carbonatação

**CARBONATAÇÃO
COMO AGENTE DA
CORROSÃO**



(CASTRO, 2002)



Normalização
atrasada no
Brasil

Ensaio de carbonatação acelerada

Condições da câmara:

$\%CO_2 \leq 5$ a 6% ; $T=28^{\circ}C$ e $UR=65\%$

Pesquisa Experimental - Carbonatação Natural Após 14 anos

- ❑ Ampla espectro de resistências e de relação a/a_g : $f_{c_j} = 18 \text{ MPa}$ a 55 MPa ;
- ❑ 5 diferentes tipos de adições minerais (+ Ref.) e 2 situações extremas de cura;
- ❑ 36 situações individuais de análise: 108 protótipos de viga de $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$;
- ❑ Condições de armazenamento: externo abrigado (clima do Centro-Oeste Brasileiro);
- ❑ Avaliação da carbonatação natural a longo prazo: previsão = 25 anos;
- ❑ Equipe: O. Cascudo (UFG), H. Carasek (UFG), A. Castro (Furnas), M. Batista, J. P. Ollivier (INSA/Toulouse).



Pesquisa Experimental - Carbonatação Natural Após 14 anos

VARIÁVEIS

Cura

- Cura úmida (UR=90%)
- Cura em local seco e protegido de intempéries

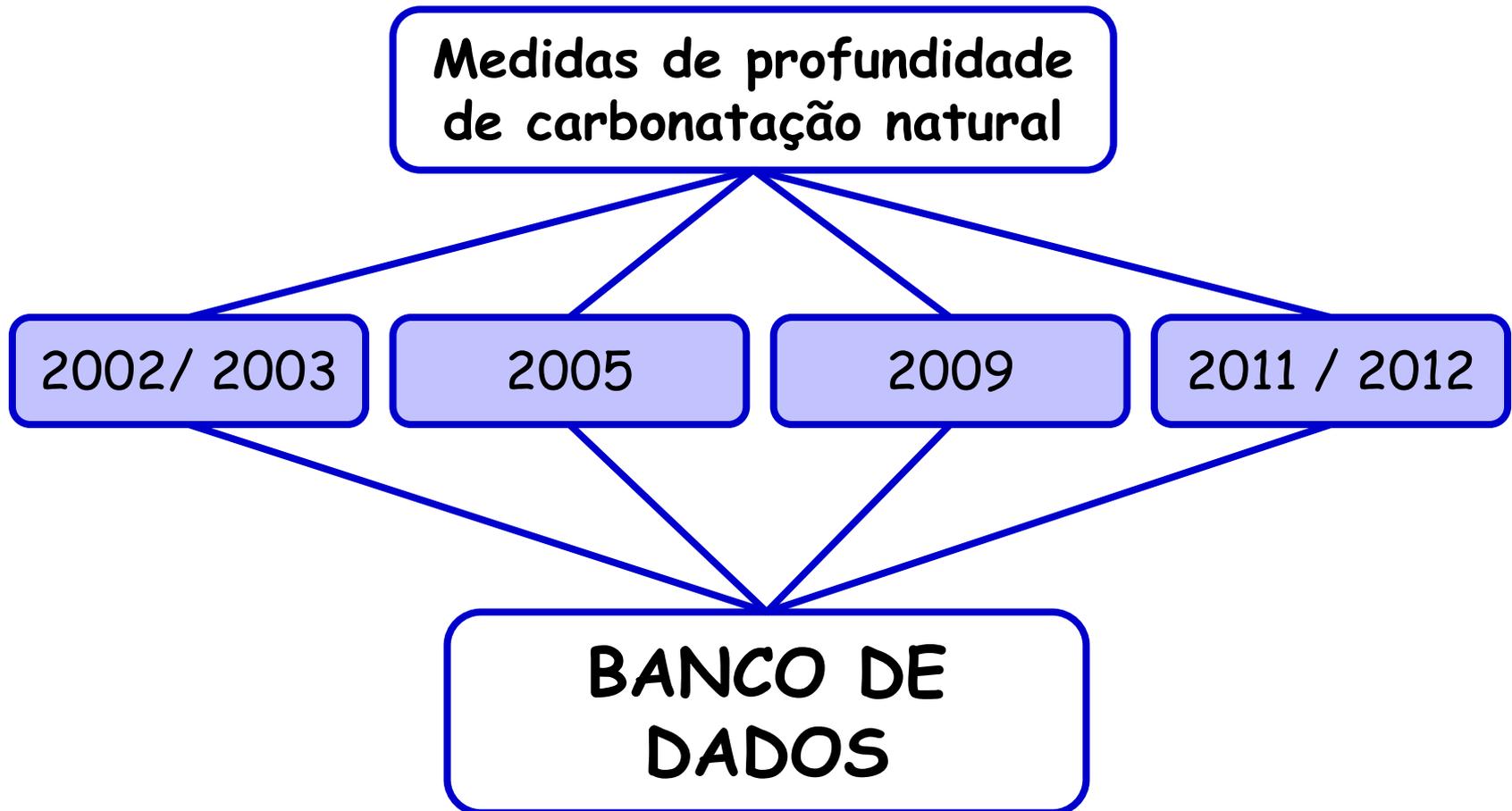
Adições minerais

- Sílica ativa (10%)
- Cinza de casca de arroz (10%)
- Metacaulim (10%)
- Cinza volante (25%)
- Escória de alto-forno (65%)
- Sem adição (Referência)

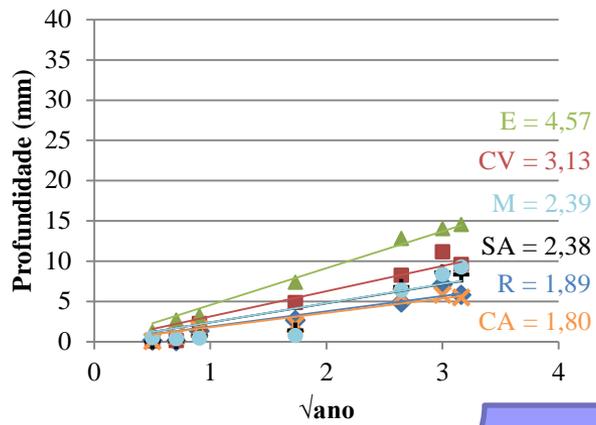
Relação a/ag

- 0,40
- 0,55
- 0,70

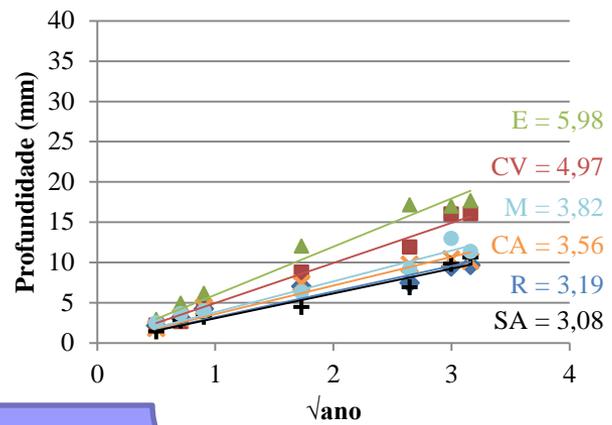
Pesquisa Experimental - Carbonatação Natural Após 14 anos



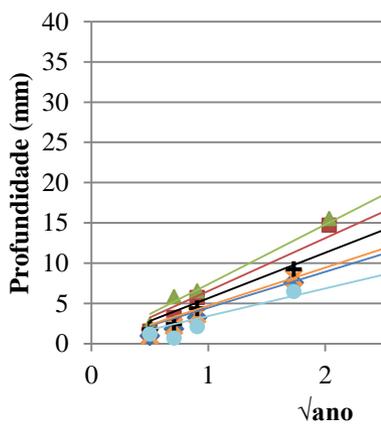
Coefficientes a/ag = 0,40 - cura úmida



Coefficientes a/ag = 0,40 - cura seca

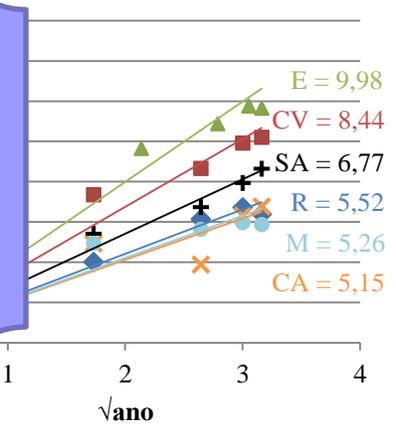


Coefficientes a/ag = 0,55 - cura úmida

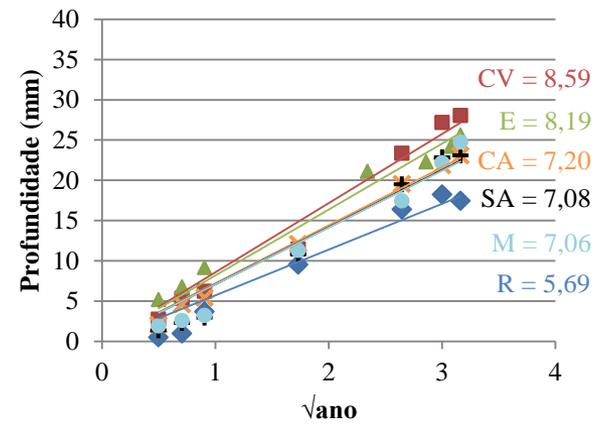


**Expressivo
caráter
preditivo de
vida útil**

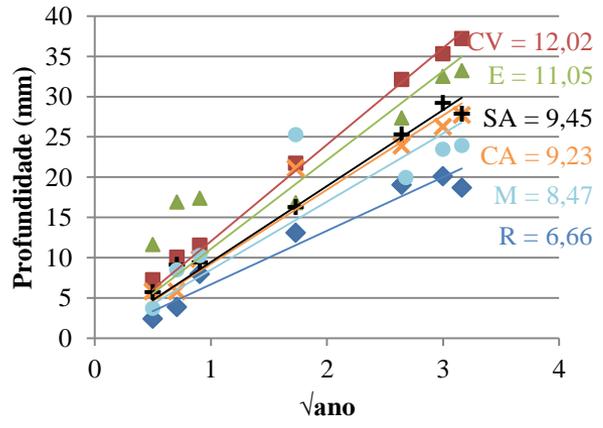
Coefficientes a/ag = 0,55 - cura seca



Coefficientes a/ag = 0,70 - cura úmida



Coefficientes a/ag = 0,70 - cura seca



Modelo de Carbonatação - Previsão de Vida Útil

$$e_c = k_c \sqrt{t}$$

$$k_c = 1,8 \text{ a } 12,0 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$$

(BATISTA; CASCUO; CARASEK, 2013)

Grandes
variações



Considerando: $e_c = 25 \text{ mm}$:

$$t \cong 125 \text{ anos ou } 3 \text{ anos}$$

- e_c = profundidade da camada carbonatada (mm);
- k_c = coeficiente de carbonatação natural - constante que depende das condições de exposição e das características do concreto, e representa a velocidade de carbonatação (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$);
- t = tempo efetivo de exposição ao CO_2 (anos).

Desafios do Concreto Durável

- ❖ Incorporar o NÍVEL 2 p/ a concepção estrutural: *Indicadores de Durabilidade*;
- ❖ Fomentar o processo normativo brasileiro para a produção de normas de durabilidade (cloretos, sulfatos, carbonatação, etc.);
- ❖ Estimular ações como a Rede SIBRATEC (Ministério das Cidades, MCTI, Finep, etc.);
- ❖ Dominar o conteúdo técnico e científico do concreto durável: tipos de cimento, agregados, adições minerais e aditivos, inibidores de corrosão, prot. superficial..
- ❖ Evoluir para os NÍVEIS 3 e 4 de concepção estrutural: *Modelos Preditivos de Vida Útil* ➔ ABORDAGEM PLENA DE DESEMPENHO

Garantia do Concreto Durável

Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Ponte Vasco da Gama



“Uma das 1^{as} obras em que a durabilidade foi considerada com base em uma abordagem de desempenho”

- Atmosfera marinha
- **Desempenho:** risco de corrosão iniciada por cloretos

- ✓ Ponte sobre o **Rio Tejo** – Lisboa/Portugal)
- ✓ 5^a maior ponte do mundo (17185 m)
- ✓ Construção: 1998

Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Viaduto Millau



- ✓ Viaduto **Millau** – França
- ✓ 343 m de altura (mais alta ponte rodoviária do mundo)
- ✓ Construção: 2004

“Condições de exposição menos severas do que a Ponte sobre o Tejo, porém mais diversas”

- **Desempenho:** estacas deveriam resistir ao congelamento (concreto $f_{ck} = 60$ MPa, sem sílica ativa e sem incorporador de ar);
- Vida útil: 120 anos .

Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Ponte Rion-Antirion - “Obra em CAD para uma vida útil de 120 anos”



✓ Ponte **Rion-Antirion** – Grécia)

✓ Construção: 2004

Definição do concreto:

- Carga passante (ASTM C 1202)
- Coef. difusão de Cl^-

- *Modelagem da penetração de Cl^- ;*
- **Desempenho:** em 120 anos, % $Cl^- < 0,4\%$ em rel. massa de cimento;
- *Concreto C45/65, cimento com 62% de escória, relação a/c < 0,4 e cobrimento mín de 70 mm.*

Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Ponte da Confederação



“Obra em CAD para uma vida útil de 100 anos”

- Atmosfera marinha
- **Desempenho:** quanto à corrosão iniciada por cloretos e quanto à abrasão pela ação de gelo na base dos pilares
- Modelagem da evolução dos perfis de cloretos com o tempo

- ✓ Ponte da **Confederação** – Ilha do Príncipe Eduardo/Canadá)
- ✓ 8ª maior ponte do mundo (12900 m)
- ✓ Construção: 1997

Obrigado pela
Atenção !!

