

Durabilidade e Vida Útil: estruturas de concreto

PCC 3222 - 2023

Exercício de Revisão da aula passada



<https://forms.gle/Zb8k4zLCUhkAXBFk9>

Objetivos da aula

- Revisar os conceitos de durabilidade e vida útil
- Aprofundar no tema da durabilidade do concreto armado
- Apresentar outros fatores de degradação de materiais cimentícios.

**Nada é eterno.
O desempenho de qualquer produto**

**Degrada.
com o tempo.**

Agentes de Degradação Ambientais

- **Radiação**
- **Temperatura**
- **Água**
 - Pura
 - Contaminada
- **Constituintes do Ar e poluentes**
 - CO_2
 - SO_x
 -
- **Gelo-Degelo**
- **Vento**

Agentes de Degradação

- **Biológicos**

- Roedores
- Fungos
- Bactérias
- ...

- **Carregamento**

- Deformação lenta
- Fadiga
- Água e seus derivados
- Cargas de uso

Agentes de Degradação

- **Incompatibilidade entre componentes em contato**
 - Química
 - Física
 - Deformação diferente
- **Fatores de uso**
 - Desgaste
 - Atividades de manutenção
 - Projeto

Fatores de degradação variam de acordo com local e tempo (CO₂ em Vancouver)



Vancouver
Christen et. All. Univ. British Columbia

Estrutura cria microclimas:

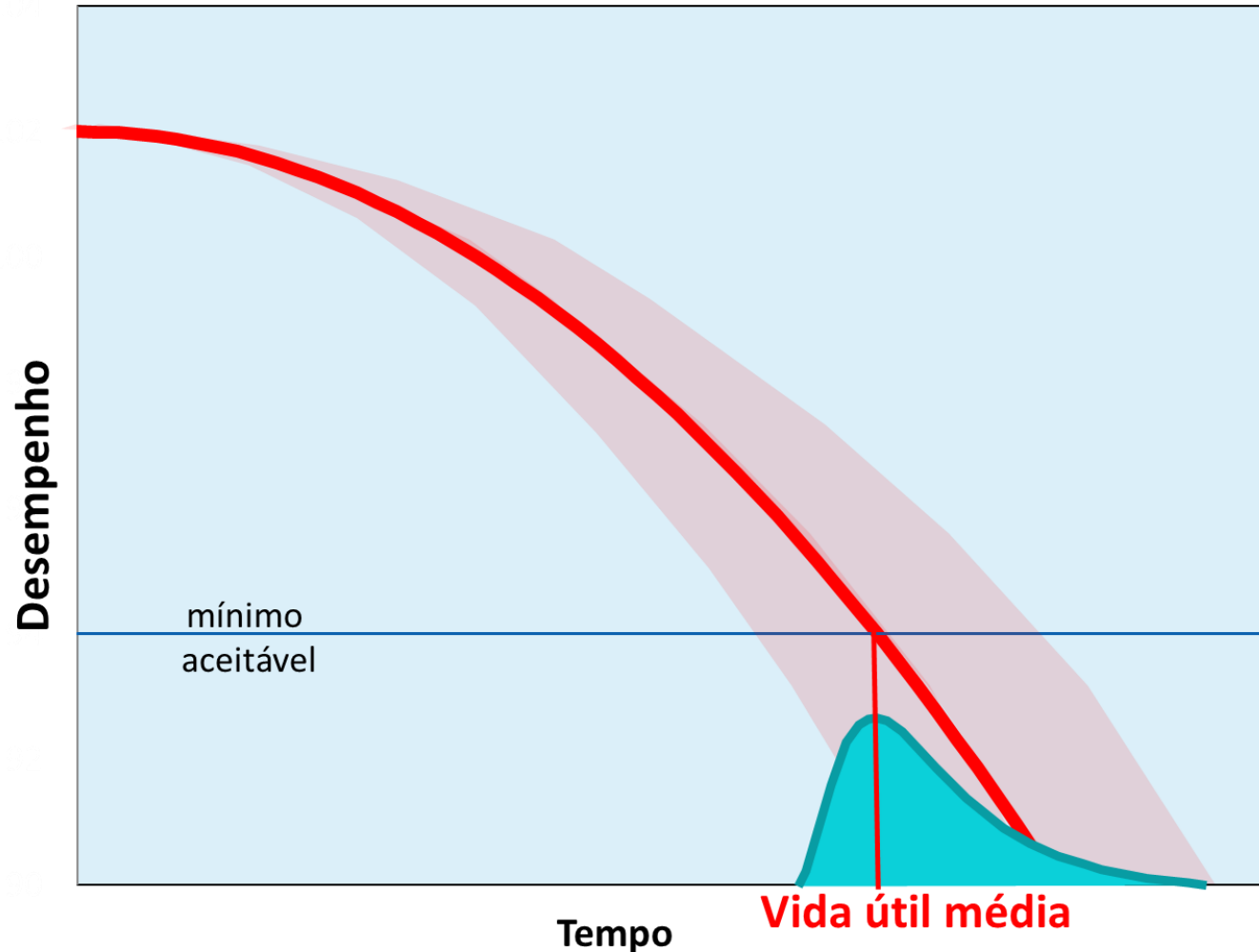


Projeto & microclima

USP, conjunto das químicas

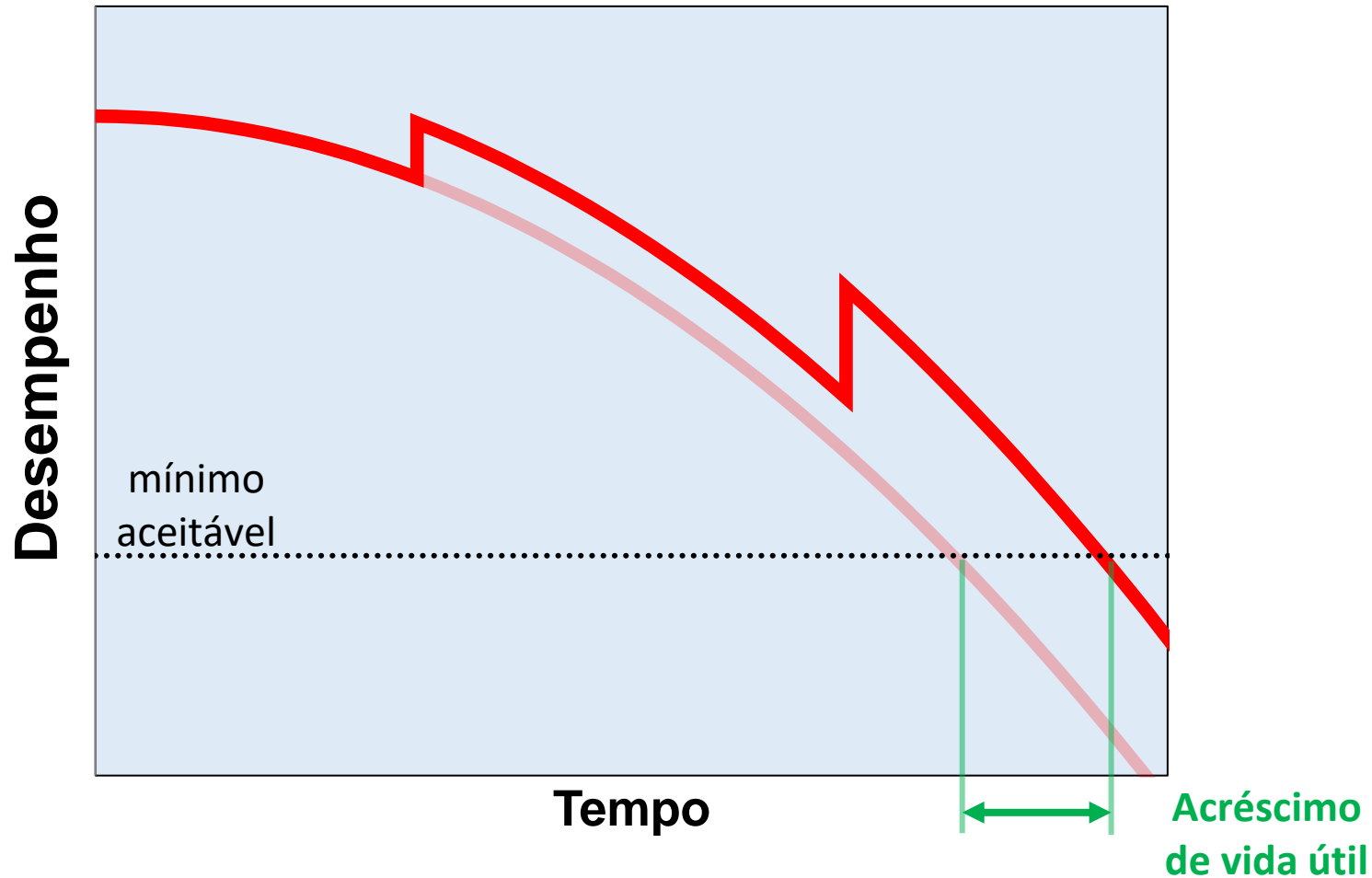
Lixiviação superficial por chuva.

Degradação & Vida útil uma população



Manutenção influencia na vida útil

vida útil de projeto inclui manutenção especificada no manual da construção



Vida útil e manutenção

O projetista prevê os mecanismos de degradação
Especifica atividades de manutenção necessárias no **manual de manutenção**.
A manutenção inclui reparos localizados e substituição de partes menores.



Aparinhos de apoio de pontes



**Pintura de proteção superficial
de concreto**

Vida útil de projeto mínima - Recomendação britânica

Vida Útil de Projeto*	Exemplos
< 10	Abrigos não permanentes, edifícios temporários
≥ 10	Edifícios e armazéns industriais temporários; renovação interna escritórios
≥ 30	Edifícios industriais; renovação de edifícios habitacionais
≥ 60	Escolas e hospitais; edifícios habitacionais novos; renovação de alta qualidade de edifícios públicos
≥ 120	Edifícios públicos, barragens, pontes, tuneis, ...
BS 7543:1992-Guide to durability of buildings and building elements, products and components	

Vida útil de projeto min – Edifícios Brasileiros NBR 15575

Sistema	VUP (anos)
Estrutura	≥ 50
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20
Pisos internos	≥ 13

E os revestimentos de argamassa? Qual a vida útil mínima?

Nada é eterno.

Como os materiais cimentícios **degradam**?

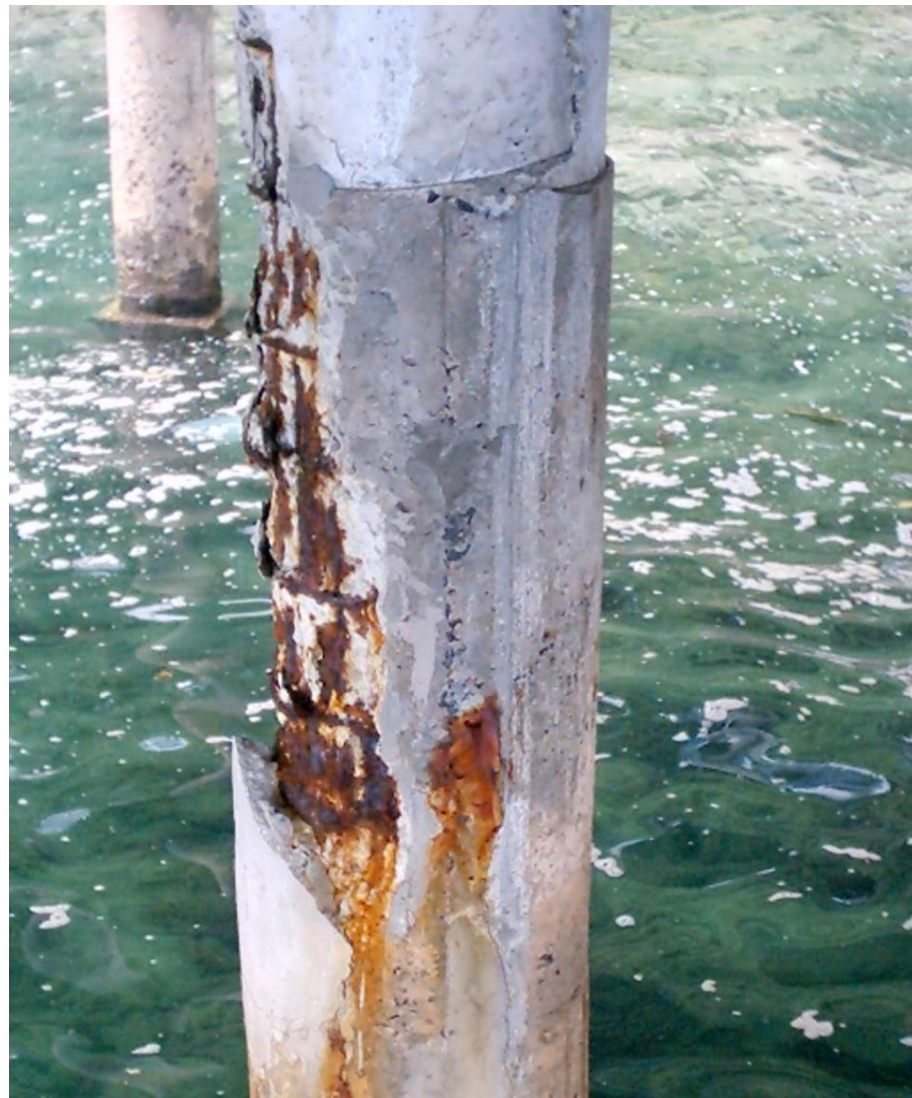
Quanto tempo irão durar?

Como a manutenção afeta a vida útil ?


Exercício rápido

- Quais manutenções poderiam aumentar a vida útil de um edifício?

Corrosão do aço no concreto armado



BRASIL

todas as notícias de **BRASIL** 

26/07/2010 às 12:34 | **ATUALIZADA EM: 26/07/2010 ÀS 13:03** | [COMENTÁRIO \(0\)](#)

Marquise desaba e causa morte de mulher em Aracaju

Rafaela Anunciação e Antonio Carlos Garcia | A Tarde

ARACAJU (SE) – Uma marquise da loja Esplanada, que fica no calçadão da [rua](#) João Pessoa, no centro de Aracaju, desabou na manhã desta segunda-feira, 26. O acidente resultou na morte de Vanusa Silva Santos, 30 anos, natural de São Paulo, e deixou duas crianças feridas.

As vítimas foram atingidas quando passavam pelo local. Vanusa morreu na hora e as crianças foram encaminhadas para o Hospital de Urgência de Sergipe. Ainda não há informações sobre o estado de [saúde](#) delas.

A loja estava fechada, em fase de reforma interna, porém não existia isolamento na área. Segundo testemunhas, um dos [trabalhadores](#) operava uma britadeira no momento do desabamento, o que pode ter provocado o acidente.

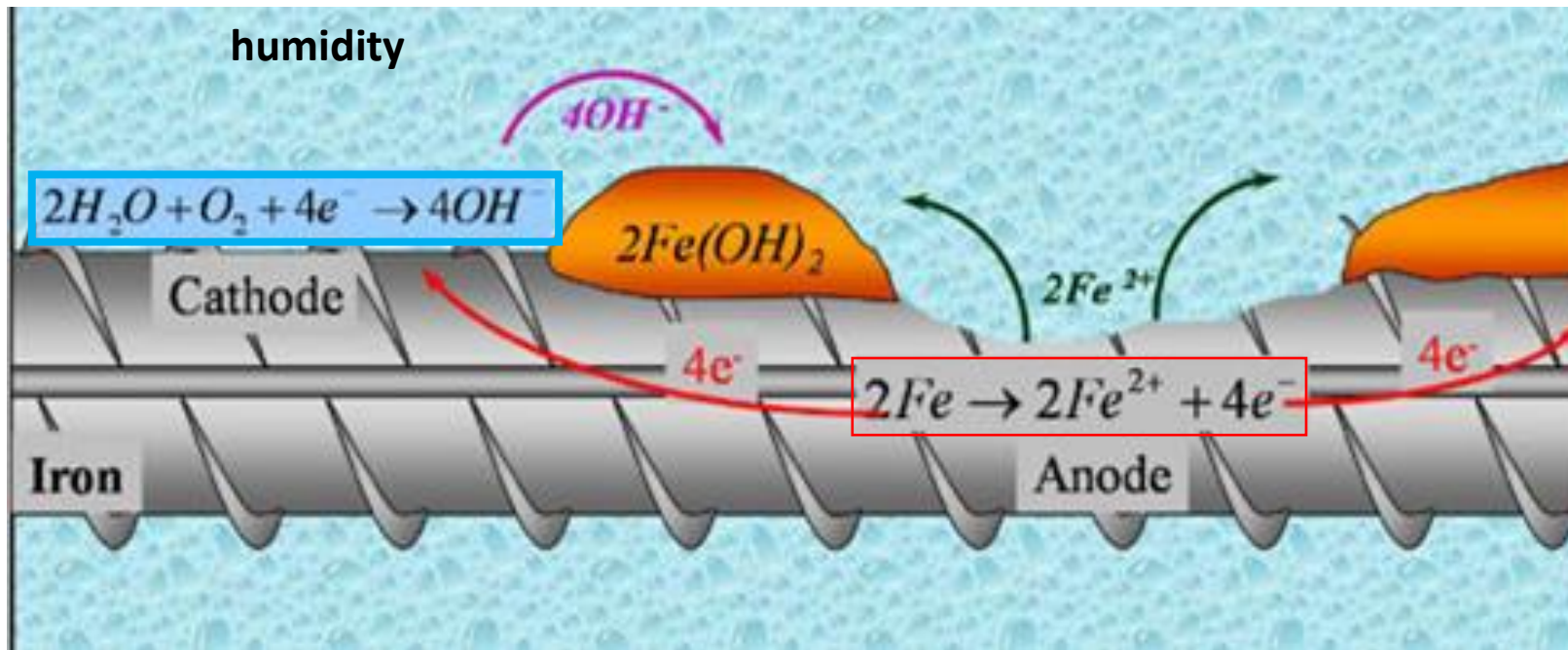
De acordo com o coordenador municipal da Defesa Civil da cidade, Nicanor Moura Neto, a Loja Esplanada comunicou aos órgãos municipais que iria fazer uma [obra](#). Ele não soube informar se a diretoria do estabelecimento apresentou laudo técnico informando as condições do local. O coordenador frisou ainda que a vistoria é obrigatória e deve ser realizada a cada cinco anos.

Corrosão em marquises: ruptura frágil





Célula de corrosão



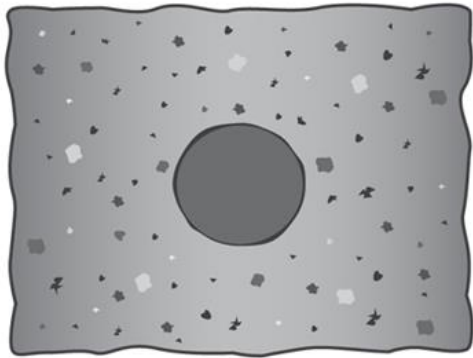
Reagentes:

H_2O

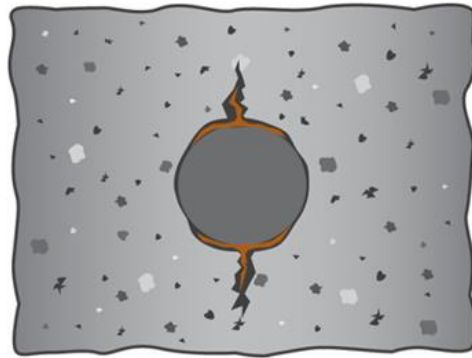
O_2

Fe

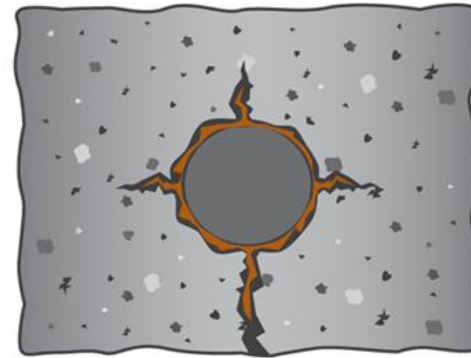
Corrosão: Aumento do volume do aço



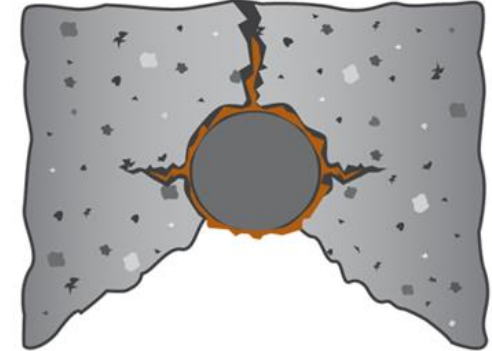
BEFORE CORROSION.



**BUILD-UP OF
CORROSION PRODUCTS.**



**FURTHER CORROSION.
SURFACE CRACKS.
STAINS.**

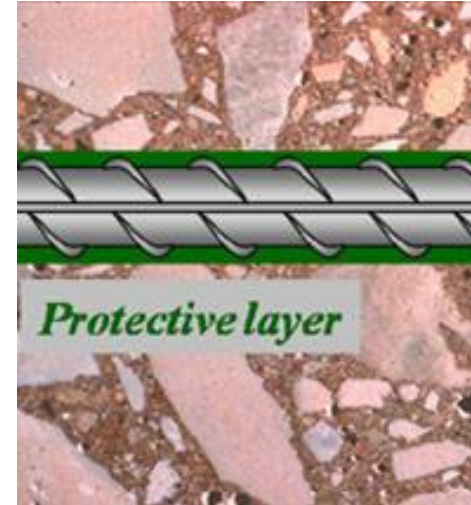


**EVENTUAL SPALLING.
CORRODED BAR.
EXPOSED.**

The corrosion cycle of steel begins with the rust expanding on the surface of the bar and causing cracking near the steel/concrete interface. As time marches on, the corrosion products build up and cause more extensive cracking until the concrete breaks away from the bar, eventually causing spalling.

Pasta de cimento passiva (protege) o aço

- Cimento hidratado $\text{pH} > 12$
- Aço protegido da corrosão
 - Camada passiva ou protetora
 - Corrosão $< 0.1\mu\text{m}/\text{ano}$
- Destruição da camada passiva torna a **corrosão possível**

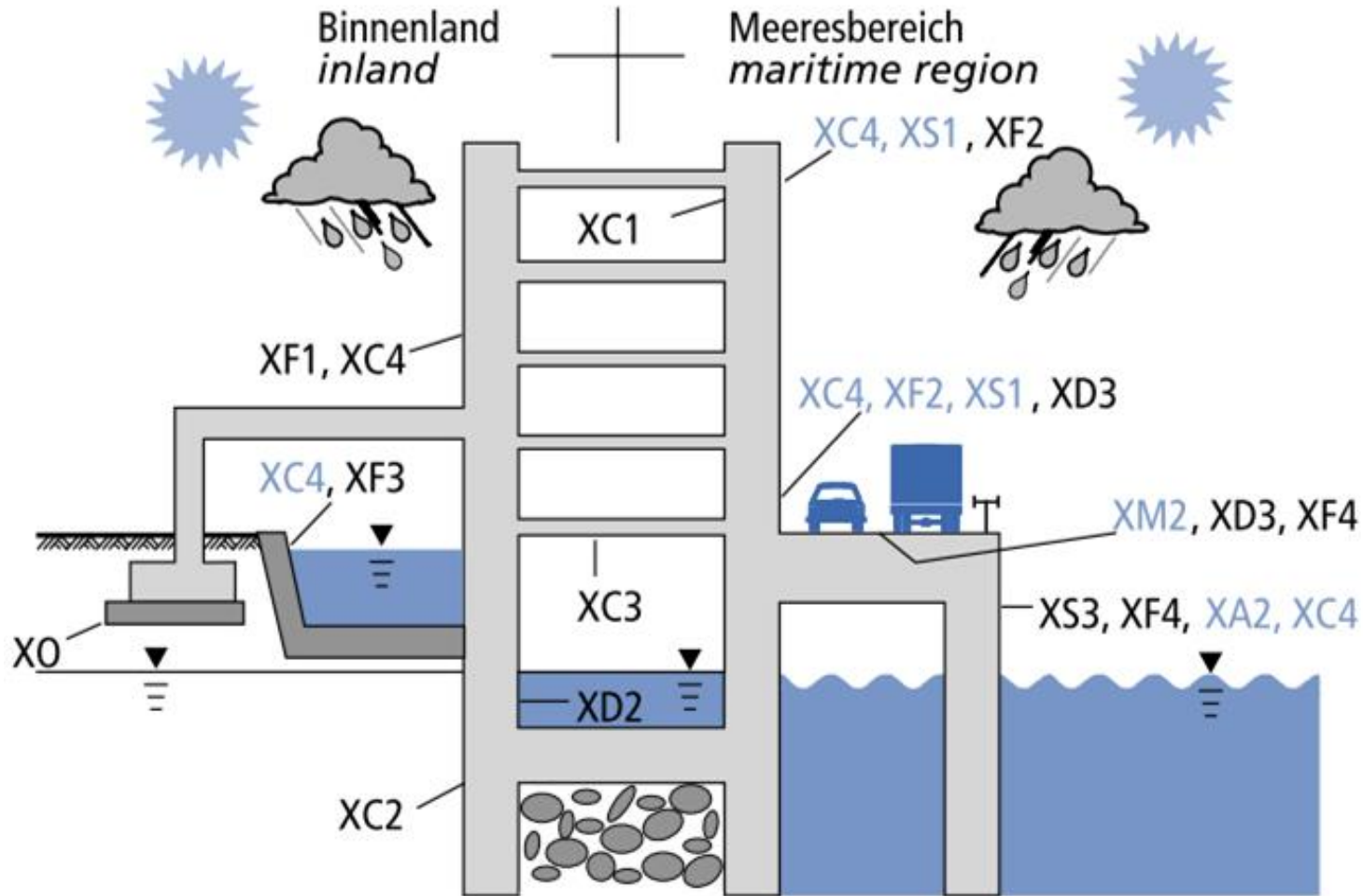


Corrosão das armaduras: destruição da camada de passivação

- **Carbonatação**
 - reação com CO_2
- **Cloretos**
 - aditivos
 - do ambiente
- **H_2O e O_2 são reagentes necessários**

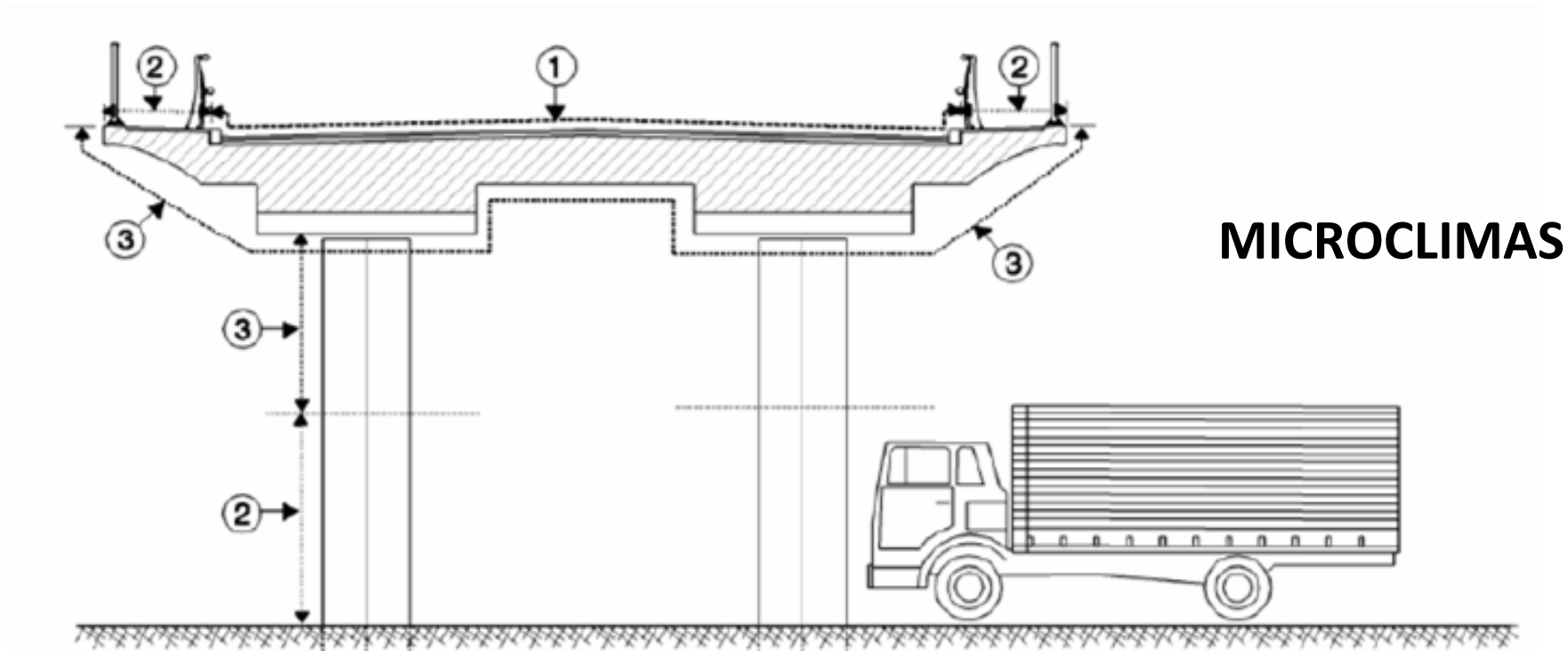
Concreto armado permanentemente seco, corrosão em velocidade desprezível.

EN 206-1 – Microambientes e o Concreto



Grube, H. & Kerkhof, B. The new German concrete standards DIN EN 206-1 and DIN EN 1045-2 as basis for the design of durable constructions. in *Concrete Technology Reports 2001-2003* 19–28 (VDZ, 2004).

Diferentes partes da construção estão expostas à diferentes fatores de degradação



Carbonatação do concreto

Carbonatação do concreto

1. CO₂ atmosférico penetra nos **poros do concreto** por difusão

2. Dissolução do CO₂ na água dos poros



3. Carbonatação reduz pH da pasta



pH >12

pH < 9,4

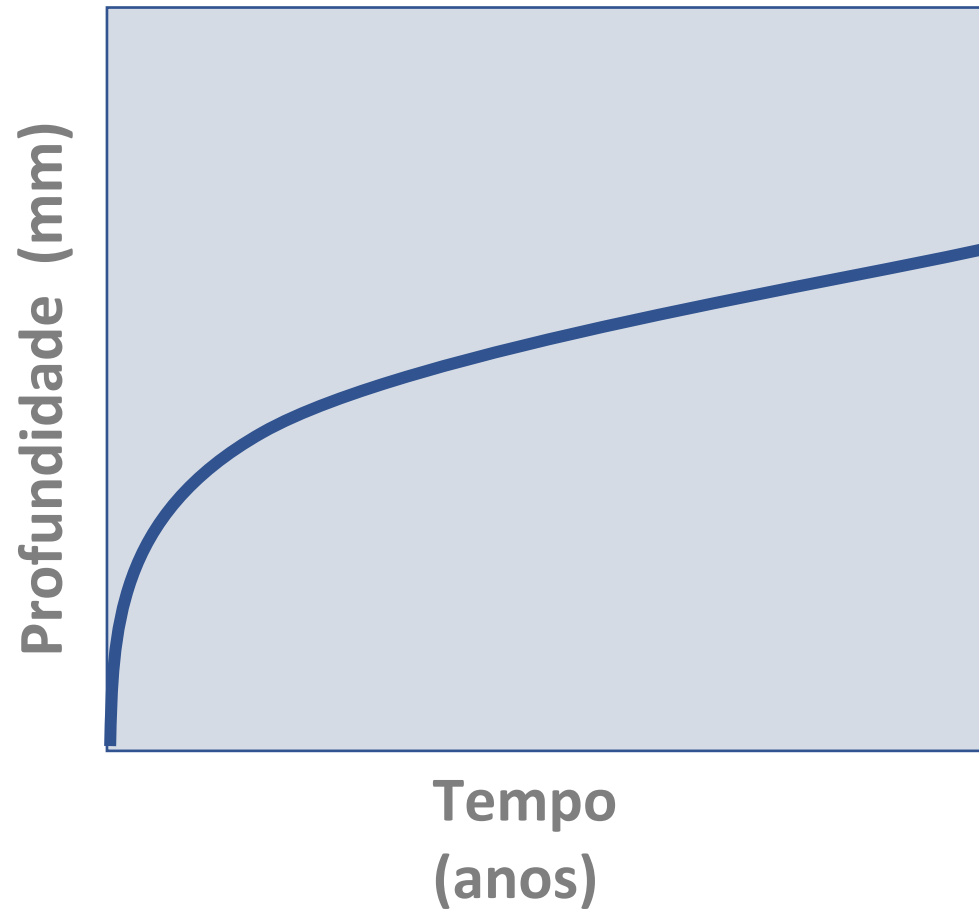
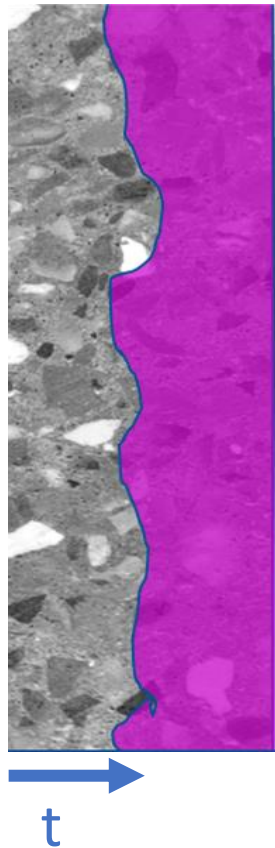
Em ambientes secos (HR < 50%) carbonatação é desprezível

Profundidade de carbonatação

- Fratura o concreto
- Imediatamente asperge solução indicadora de pH
- **Fenolftaleína**
 - $>9,4$ – rosa
 - $<9,4$ – carbonatado é incolor



Profundidade de carbonatação x tempo



- $p = k\sqrt{t}$

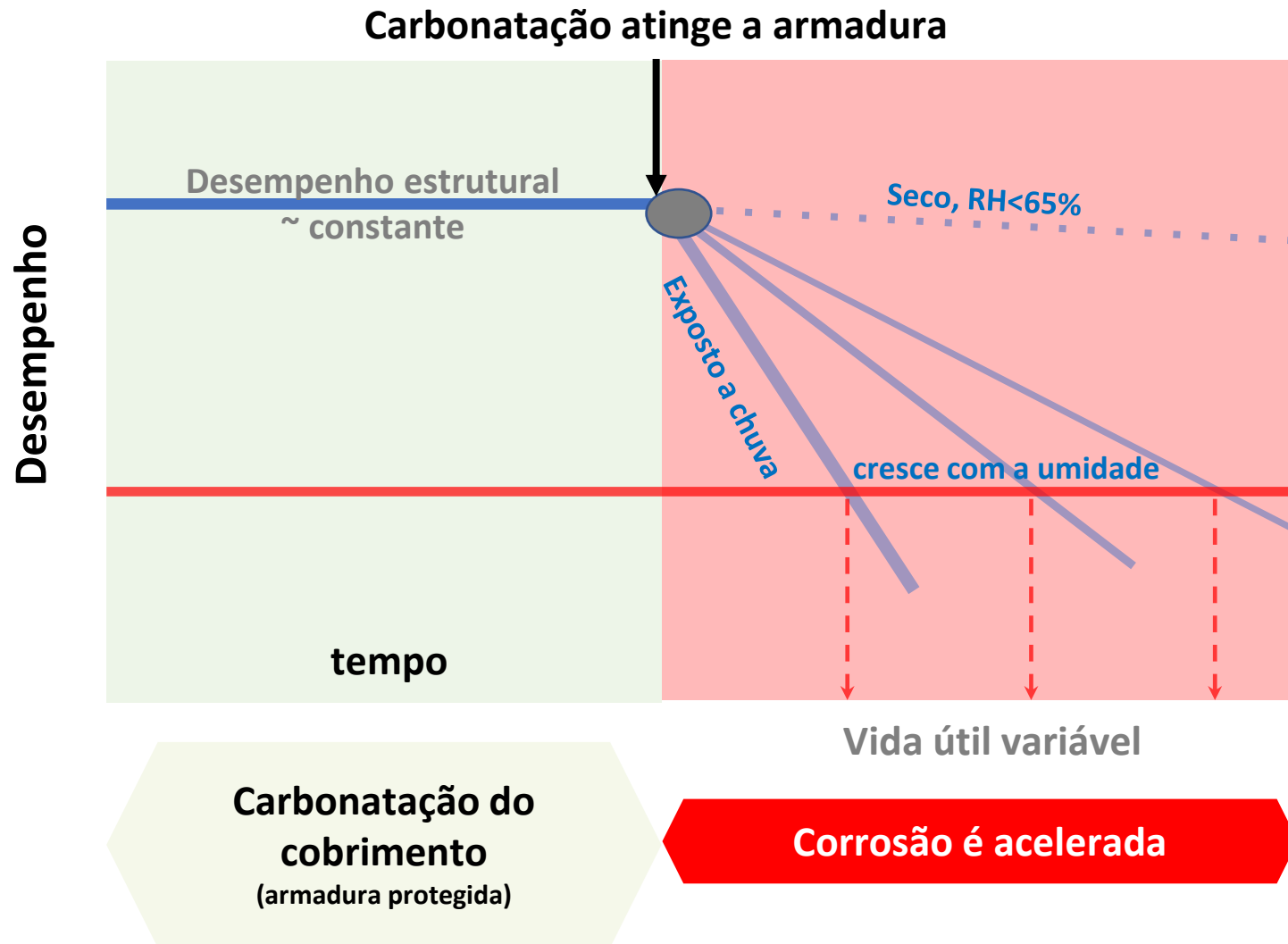
p = profundidade

t = tempo

k = f()

- Porosidade
- Tipo de cimento
- Teor de cimento
- Ambiente (umidade..)

Carbonatação e desempenho x tempo



Valores típicos de k

concretos expostos a chuva, sem revestimento

- Condições de exposição (tempo de saturado, ...)
- Composição e teor do cimento

- **Pontes Flórida** – mediana 1,4mm/ano (0 – 14)
 - Cinzas volantes reduzem k em até 60% (quando reduz porosidade)
 - (Sagues et al,1997)

- **Portugal, 40MPa** – mediana 3,6mm/ano (3,1 – 4,7)

Projetando para vida útil

Coeficiente de carbonatação

(Modelo P. Helene)

$$K_{CO_2} \text{ (mm/ano}^{0,5} \text{)} = (6,77 - 0,114.fck_{28}) * R$$

Concreto (ambiente interno)/ CO₂ ambiente=0,1%

R= f(cimento)

CPII, CPV R=1

CP IV R=1,1

CP III R= 1,2

Carmona, T.G. Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto. Diss. Mestrado, Escola Politécnica da USP 2005. http://www.exataweb.com.br/downloads/MESTRADO05_THOMAS.pdf

Carbonatação em materiais cimentícios sem aço ou em ambientes secos

- **Não é fator de degradação.**
- Diminui a porosidade da pasta
 - Aumenta a resistência & Módulo de Elasticidade
 - Diminui permeabilidade
- Provoca retração - importante para produtos ricos em cimento, como fibrocimento
- Captura CO₂, mitigando a mudança climática
 - 60-80% do CO₂ da decomposição do calcário
- **Cerca de 25% do cimento é usado em concreto armado. A maior parte em ambiente seco.**

Exercício para casa

- Após 9 anos de uso de uma estrutura, a profundidade de carbonatação medida por fenolftaleína foi 15mm. O cobrimento da armadura medido é de 27mm.
 - Estime a vida útil residual (restante) média da estrutura.
 - Este prazo significa o final do período de uso da estrutura? Justifique
 - Listar alternativas para aumentar a vida útil do concreto armado em relação ao ataque por carbonatação.

Corrosão por cloretos

Corrosão por íons cloretos (Cl⁻)

- Presença de cloretos destrói a camada de passivação da armadura
- Corrosão é possível
- Cloretos
 - Água do mar
 - Aditivos aceleradores de pega (CaCl₂)
 - Areia marítima
 - Uso da estrutura (sais de degelo, ...)

Difusão dos cloretos atmosféricos

onde:

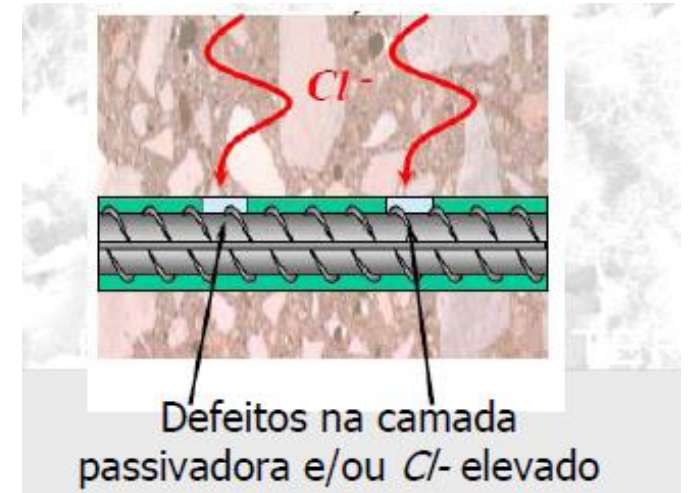
$$F = -D \frac{dC}{dx}$$

F = massa de soluto transportada (kmol/m²/s);

D = coeficiente de difusão (m²/s);

C = concentração do soluto (kmol/m³); e

x = a distância a partir de um ponto de origem considerado (m).



Cloretos & risco de corrosão de armadura

Table 2. Maximum Chloride Ion Content of Concrete (ACI 318)

Type of Member	Maximum Cl-*
Prestressed concrete	0.06
Reinforced concrete exposed to chloride in service	0.15
Reinforced concrete that will be dry or protected from moisture in service	1.00
Other reinforced concrete construction	0.30

*Water-soluble chloride, percent by weight of cement.

Quando $Cl^- > \text{Maximum } Cl^-^*$ o risco de corrosão é muito elevado.
Sem O_2 não haverá corrosão.

Exercício

- Aponte em quais partes da estrutura desta ponte a probabilidade de corrosão seria maior e menor, justifique.



Microclimas e risco de corrosão em estruturas off-shore

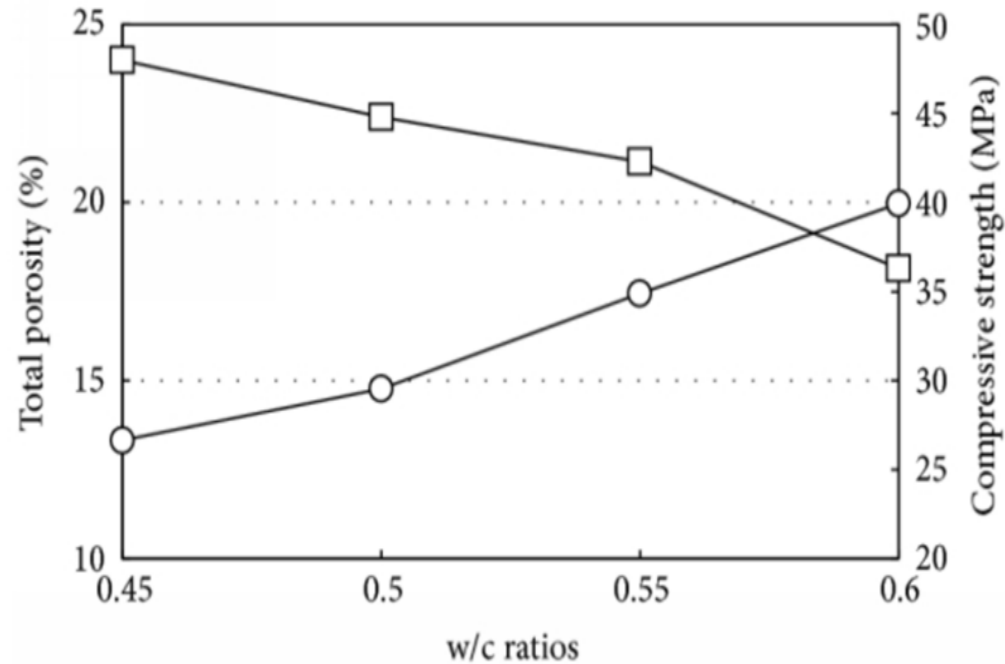


Corrosão
lenta

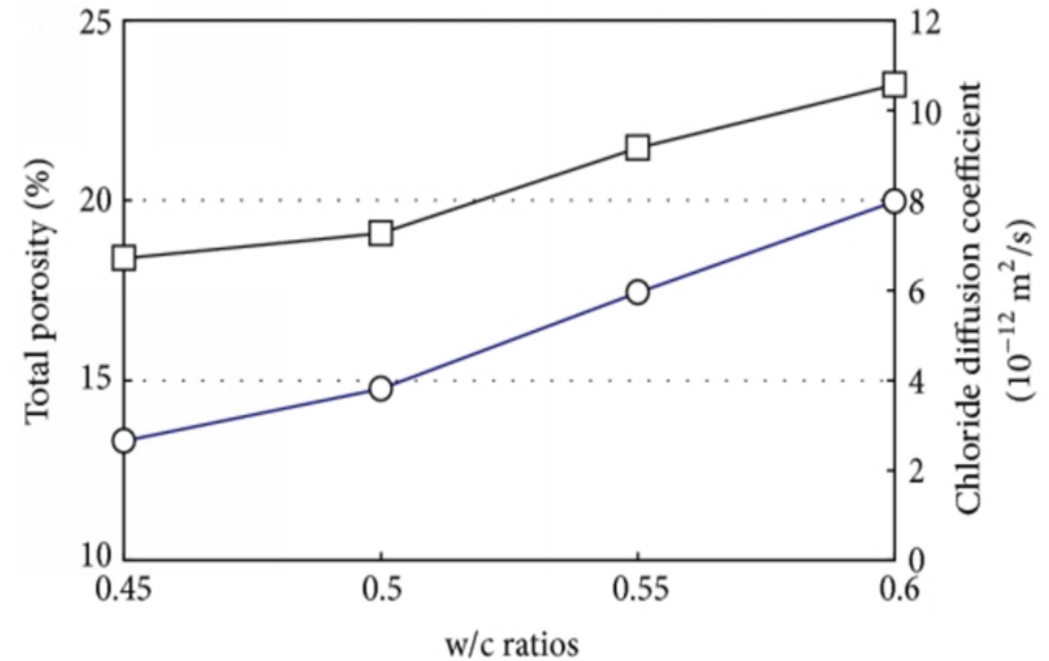
MUITO ELEVADA
Zona de respingos
Molha-Seca, O₂, Cl

Desprezível
submersa
pouco O₂

Penetração de cloretos & porosidade



- Porosity (91 days)
- Compressive strength (MPa)



- Porosity (91 days)
- Chloride diffusion coefficient

- **O aumento de a/c:**

- Diminui resistência
- Aumenta porosidade
- Aumenta a difusividade de cloretos

Kim et al. Effect of W/C Ratio on Durability and Porosity in Cement Mortar with Constant Cement Amount. *Advances in Materials Science and Engineering* 2014(1):1-11 · April 2014
DOI: 10.1155/2014/273460

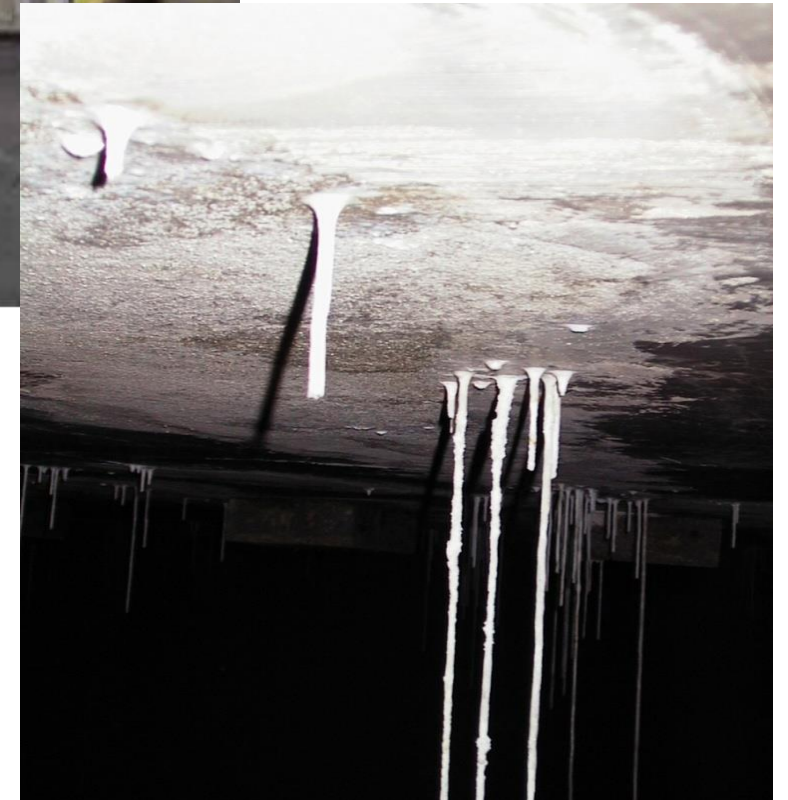
Proteção contra corrosão por cloretos

- Aumento da espessura de cobrimento da armadura
- **Redução da porosidade** do cobrimento da armadura
 - Aumento do fck
- Cimentos com capacidade de fixar Cl⁻
- **Revestimento superficial**
- **Armaduras resistentes a corrosão**
 - Aço galvanizado
 - Aço inoxidável
 - Epóxi reforçado com fibras de vidro ou carbono

Outros problemas de durabilidade

Lixiviação

- Dissolução
 - Infiltração da água
 - $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$
- Lixiviação (transporte até a superfície)
- Evaporação da água
 - $\text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3$



Degradação do concreto (pisos e pavimentos)



<http://www.revistatechne.com.br/>

Degradação de concreto (canaletas de ETA)



Degradação por dissolução ácida do concreto (esgoto e ambientes industriais)



<http://webnoticiando.blogspot.com/>

Indústria sucro-alcooleira



<http://www.revistatechne.com.br>

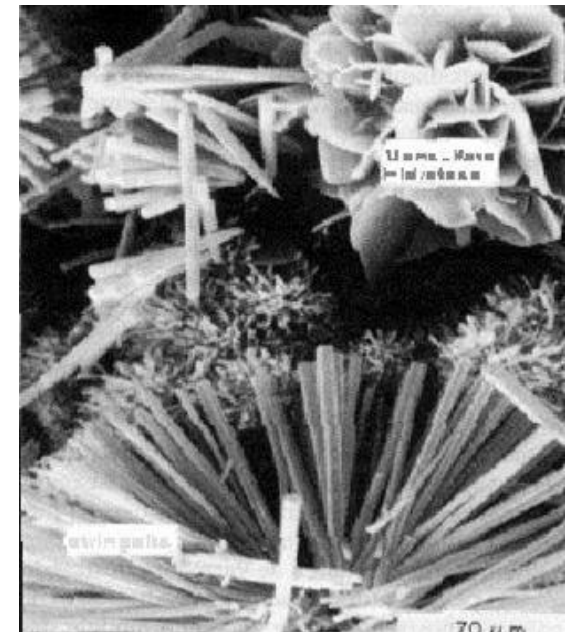
Compostos expansivos

Ataque por sulfatos

Expansão por ação dos sulfatos, no concreto endurecido:

- $C_3A + 3C\check{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A \check{S}_3H_{32}$ (*etringita*)
- $C_6A \check{S}_3H_{32} + 2C_3A + 22H \rightarrow 3C_4A \check{S}H_{18}$ (*monosulfato*)
- $C_4A \check{S}H_{18} + 2C\check{S} + 14H \rightarrow C_6A \check{S}_3H_{32}$ (*etringita*)

- Solos podem estar contaminados por sulfatos
 - Poluição
 - Minerais naturais



Reação álcali-agregado



Fonte: wikipedia



Andrade (2007)

Normalização de durabilidade

Classes de Exposição NBR 6118-2013

Tabela 6.1 - Classes de agressividade ambiental

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

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

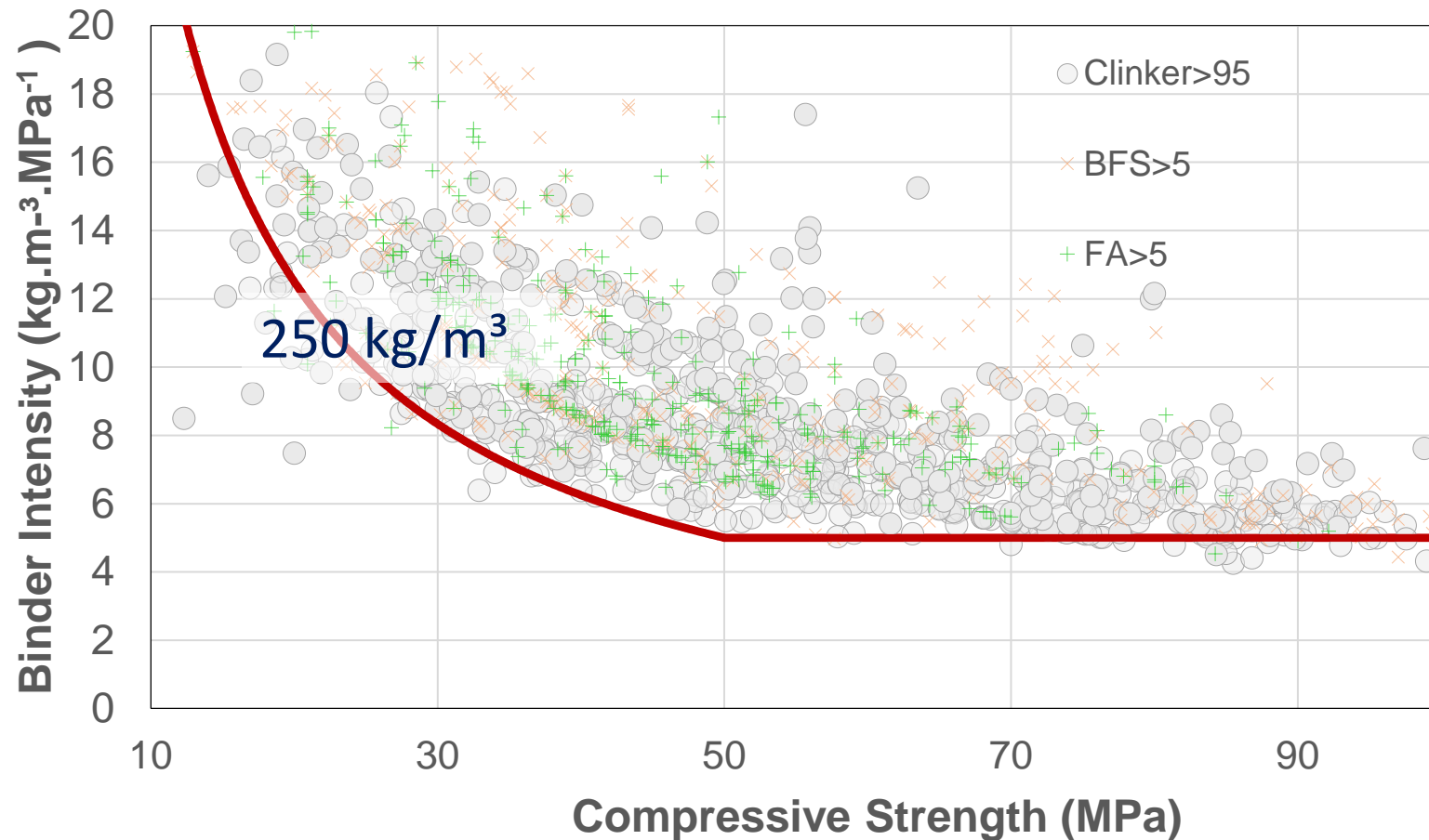
Projetar para Melhor Durabilidade

Resistência x classes de exposição

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
relação água/cimento 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	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
consumo de cimento kg/m ³	CA /CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

NBR 12655 (2006)

Projetar para Melhor Durabilidade Resistência x consumo de cimento



Não existe evidencia de que a durabilidade depende do mínimo teor de cimento

Projetar para durabilidade: definir cobrimento adequado

Tabela 7.2 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e
cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ 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 tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.


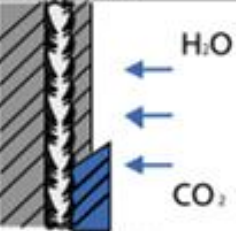
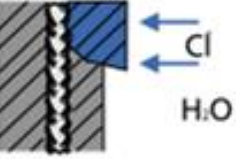
³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

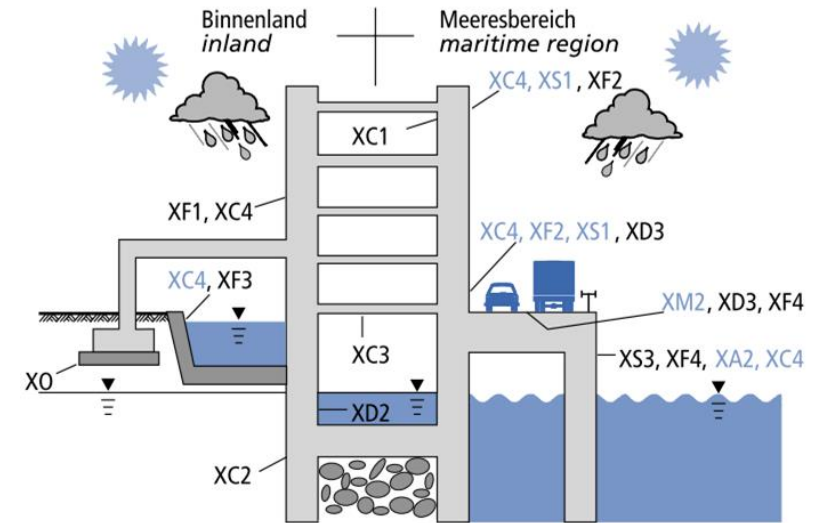
NBR 6118 (2003)

Como controlar o cobrimento



EM 206 -1 2014

Expositionsklassen (Umwelteinwirkungen, „Angriffe“) <i>Exposure classes (environmental effects, „attacks“)</i>			Betontechnische Maßnahmen („Widerstände“) <i>Concrete technology measures („resistances“)</i>		
Klassenbez. <i>class designation</i>	Einwirkung <i>effect</i>	und Beanspruchung <i>and stress</i>	Max. w/z <i>max. w/c</i>	Min. z <i>min. c</i>	f_{ck} cube f_{ck} cube
XO	 kein Angriff <i>no attack</i>	kein Betonangriff <i>no concrete attack</i>	keine Anforderung <i>no requirement</i>	keine Anforderung <i>no requirement</i>	C8/10 C8/10
XC		1 trocken <i>dry</i>	0,75	240	C16/20
		2 ständig nass <i>constantly wet</i>	0,75	240	C16/20
		3 mäßig feucht <i>moderately moist</i>	0,65	260	C20/25
		4 Carbonatisierung <i>carbonation</i>	0,60	280	C25/30
XD/ XS		1 mäßig feucht <i>moderately moist</i>	0,55	300	C30/37
		2 ständig nass <i>constantly wet</i>	0,50	320	C35/45
		3 Chlorid <i>chloride</i>	0,45	320	C35/45



Grube, H. & Kerkhof, B. The new German concrete standards DIN EN 206-1 and DIN EN 1045-2 as basis for the design of durable constructions. in *Concrete Technology Reports 2001-2003* 19–28 (VDZ, 2004).

Trabalho de grupo

- Formem um grupo de, no máximo, 4 pessoas.
- Escolham uma edificação da USP e identifiquem um problema patológico
- Registrem o problema de maneira a caracterizá-lo
- Listem as possíveis causas de geração da manifestação patológica.
- Indiquem uma alternativa de reparo.

