



1



2

Conceitos

As estruturas devem ser idôneas para seu uso durante sua vida útil:

- ✓ Seguras e funcionais;
- ✓ Resistentes ao fogo (incêndio);
- ✓ Duráveis;
- ✓ Serem bonitas;
- ✓ Serem sustentáveis;

3

Avanços Recentes

- ✓ **ISO** 16204:2012. Durability: Service Life Design of Concrete Structures
- ✓ **fib** Model Code 2010. Concrete Structures
- ✓ **fib** Model Code for Service Life Design 2006.

Helland, Steinar. Design for Service Life: Implementation of fib Model Code 2010 rules in the operational code ISO 16204. Structural Concrete 14 (2013), n.1. p. 10-18

4

Avanços Recentes

ISO 16204. Existem 4 alternativas para verificar VU:

1. The full probabilistic method. *Método probabilista integral*
2. The partial factor method. *Método dos fatores parciais (característicos)*
3. The deemed-to-satisfy method. *Método prescritivo (a/c, recubrimientos, etc.)*
4. The avoidance-of-deterioration method. *Método baseado na proteção das estruturas*

5

Conceitos

- ✓ **Conhecer como envelhece**
- ✓ **Definir VU**
- ✓ **Quantificar VU**
- ✓ **Estabelecer Estados Limites**
- ✓ **Prever ou Estimar VU**
- ✓ **Especificar Manutenção**

6

Conceitos

- ✓ **Conhecer como envelhece**
- ✓ **Definir VU**
- ✓ **Quantificar VU**
- ✓ **Estabelecer Estados Limites**
- ✓ **Prever ou Estimar VU**
- ✓ **Definir Manutenção**

7

Mecanismos de Deterioração e Envelhecimento

Armadura

- ✓ corrosão por carbonatação
- ✓ corrosão por cloretos

Concreto

- ✓ lixiviação → água, chuva ácida e ácidos
- ✓ expansão → sulfatos y AAR
- ✓ Poluição → fungos, fuligem, pó

Estrutura

- ✓ ações mecânicas, movimentos térmicos, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação, ... fator humano

8

Armadura → *Corrosão por carbonatação*

- $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{pH} \geq 12$
(armadura passiva)
- $\text{CO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

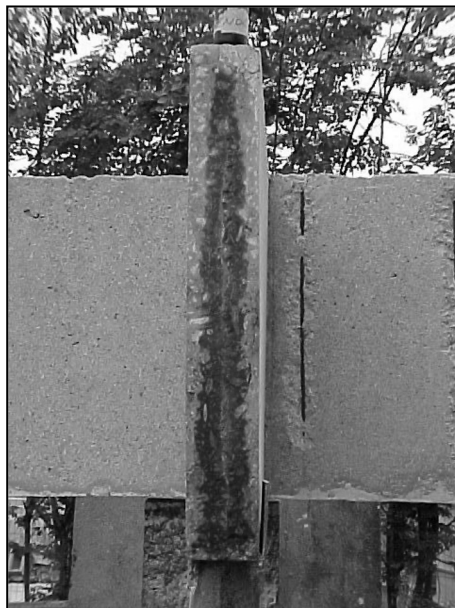
Mais
alcalino

Menos
alcalino



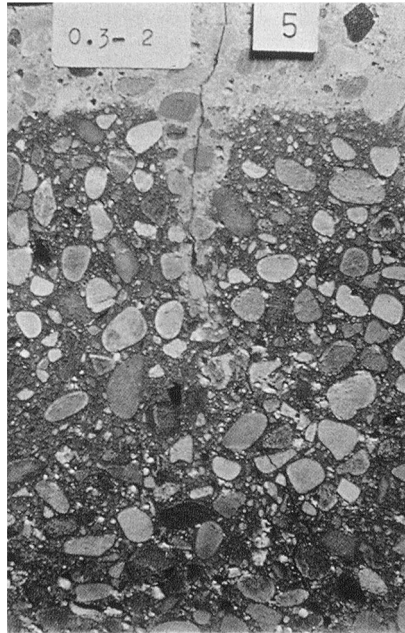
9

Armadura → *Corrosão por carbonatação*



10

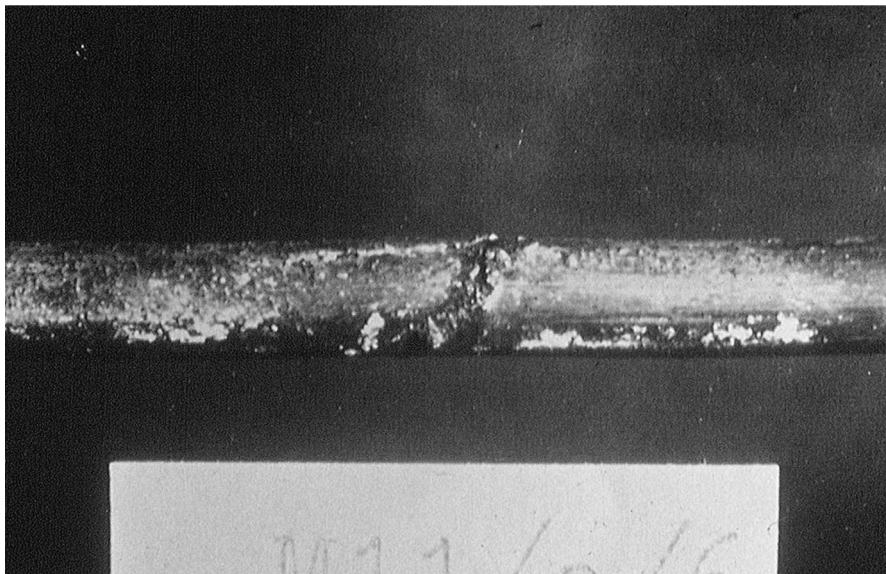
Fissuras



Armadura → *Corrosão por carbonatação*

11

Armadura → *Corrosão por carbonatação*



12

FOLHA DE S. PAULO

sexta-feira, 13 de março de 1998

são paulo 3 3

PERIGO 2 Prefeitura diz que só vistoria prédios quando vai conceder Habite-se; polícia procura o proprietário do imóvel

Falta de ferragens pode ter causado queda



Área interditada em calçada do centro de São Castano com parte da marquise que desabou de prédio comercial, matando duas pessoas ontem

Vítima não teve tempo de correr

da Reportagem Local

As marquises da Out-Let caíram tão rápido que as duas pessoas que morriam nem sequer tiveram tempo de correr, segundo testemunhas.

De acordo com Alexandre Athanasio, 18, funcionário de uma farmácia vizinha à loja, o rapaz Alex dos Santos, que estava no 1º andar, já tinha passado pela marquise, mas, com o barulho, deu um passo para trás e acabou atingido. A família de Alex soube do acidente pela televisão. O pai, Benedito dos Santos, chegou à sua casa e encontrou a mulher chorando. Santos foi à delegacia e, após confirmar que era mesmo seu filho, ficou em estado de choque.

A família da dona de casa, Ter-

Delegado vai ouvir dono 2 vezes

da Reportagem Local

O delegado Marco Antônio Barreiras, titular do 1º DP de São Castano do Sul, disse que vai aguardar o laudo do ILC para identificar os culpados pelo acidente, na loja Out-Let.

"Se houve negligência, alguém irá responder por homicídio culposo (sem intenção)".

De acordo com o delegado, caso fique comprovado que os responsáveis já souberam de problemas nas marquises, sem tomar providências, é possível que ocorra um indiciamento por homicídio doloso (com intenção).

Barreiras deve consultar hoje o registro de imóveis para localizar os proprietários do prédio.

O delegado afirmou que, até o

da Reportagem Local

nenhuma relação com o acidente.

"As obras foram até úteis, pois se a avenida não estivesse parcialmente interditada, mais pessoas poderiam estar passando sob as marquises no momento do desabamento", disse.

Segundo Tharomqui, que interdiçou o prédio ontem, a prefeitura só vistoria as obras para conceder o Habite-se.

O diretor afirmou ainda que uma vistoria não avalia condições de segurança da estrutura. "Isso é de responsabilidade do engenheiro que faz a obra", afirmou. Pelo Código Civil, uma construtora é responsável nos cinco primeiros anos após a conclusão da obra.

O dono da loja, Omar Abdouni, disse que é inquilino do prédio há três anos e que ele nunca havia apresentado problemas nesse período. Abdouni não confirmou a informação da funcionária de que o prédio vivia com o trabalho das britadeiras. A polícia agora vai localizar o proprietário do prédio, JENETRAZQUE

Técnica de relaxamento no trânsito: ligar o rádio.

APRIMA MÚSICA ACQUANTARAL

scallatm

A rádio anti-estresse

Armadura → Corrosão por carbonatação

13

Armadura → Corrosão por cloretos

Os produtos da corrosão são muito solúveis



14

7

Armadura → **Corrosão**

- ◆ *Existem vários modelos matemáticos baseados na Lei de Fick*
- ◆ *Ainda não existe um critério único para o estado limite de durabilidade*
- ◆ *Existe prescrições profiláticas muito claras (espessura e qualidade do cobrimento)*
- ◆ *Sempre é necessário usar o bom senso*

15

Conceitos

- ✓ Conhecer como envelhece

✓ **Definir VU**

- ✓ Quantificar VU
- ✓ Estabelecer Estados Limites
- ✓ Prever ou Estimar VU
- ✓ Definir manutenção

16

Durabilidade

O objetivo de um estudo ou projeto de durabilidade (vida útil), tendo em vista o principal problema de deterioração, ou seja, a corrosão das armaduras, é:

1. *Especificar o concreto (ac; C; consistência,)*
 2. *Especificar o cimento;*
 3. *Especificar as adições*
- e,
4. *Especificar o revestimento da armadura*

17

Vida Útil de Projeto VUP, bem complexo:

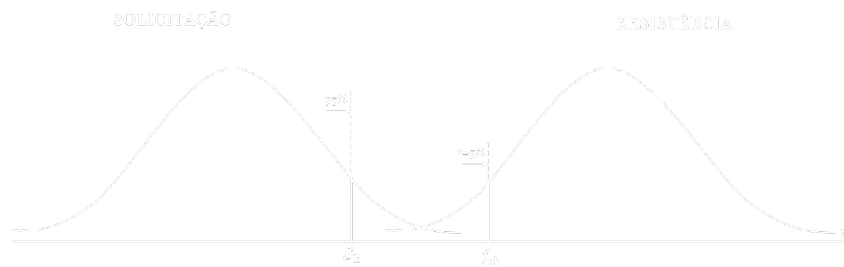
Preciso de um modelo matemático, um ábaco, uma tabela de previsão da deterioração com o tempo !

Procedimentos de calcular VUP

1. Experiência (normas prescritivas) ABNT NBR 6118:2014;
ABNT NBR 12655:2015; ABNT NBR 15900:2009;
2. Ensaio Acelerado ?
3. Modelos Deterministas
4. Modelos Probabilísticos

18

Introdução da Segurança no Projeto das Estruturas de Concreto



Ações/Cargas: ABNT NBR 6120:1980 Versão Corrigida:2000

Resistências: moldar cps e achar $f_{ck,est}$

Modelos de Resistências dos Materiais e Teoria das Estruturas:

N

M

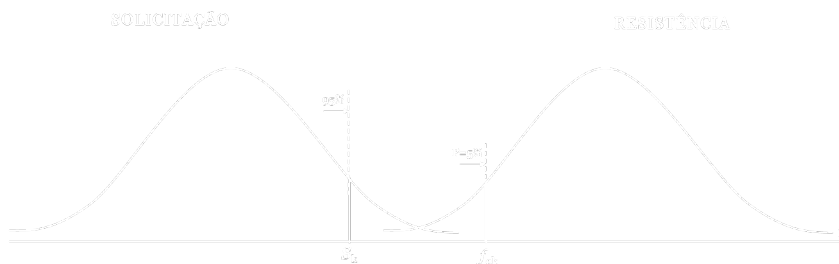
V

σ, τ

Software programas no mercado

19

Introdução da Vida Útil no Projeto das Estruturas de Concreto



Ações agressivas: ABNT NBR 6118:2014

Resistências à agressividade:

a/c

f_{ck}

Adições

Espessura cobrimento

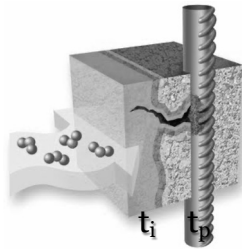
Software programas no mercado

20

Qual o critério para definir término da vida útil???

No Brasil: não há, pode ser despassivação

Na Europa: não há, pode ser despassivação mais perda de seção da armadura



Créditos: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2014/06/durabilidade-do-concreto-processo-de.html>

No USA: despassivação mais 6 anos

21

ABNT NBR 6118:2014
ABNT NBR 12655:2015



fib Model Code
Eurocode 2
EN 206:2000



tem um *soft* para
cloreto com base
probabilista, 10%

ACI 318
ACI 365



tem um *soft* para
cloreto com base
determinista (média)

22

Vida útil (VU) vs. Vida útil de projeto (VUP)

ABNT NBR 15575-1:2013

VU → desempenho efetivo da estrutura que, obviamente, depende também da operação e manutenção corretas.

VUP → estimativa justificada da vida útil, com base em modelos de previsão, sendo obrigatório constar registrada no projeto estrutural (item 14.2.1 da ABNT NBR 15571-1:2013).

23

Tabela C 6.1 Exemplos de vida útil de projeto (extraído da Tabela C.6 da ABNT NBR 15575-1:2013)

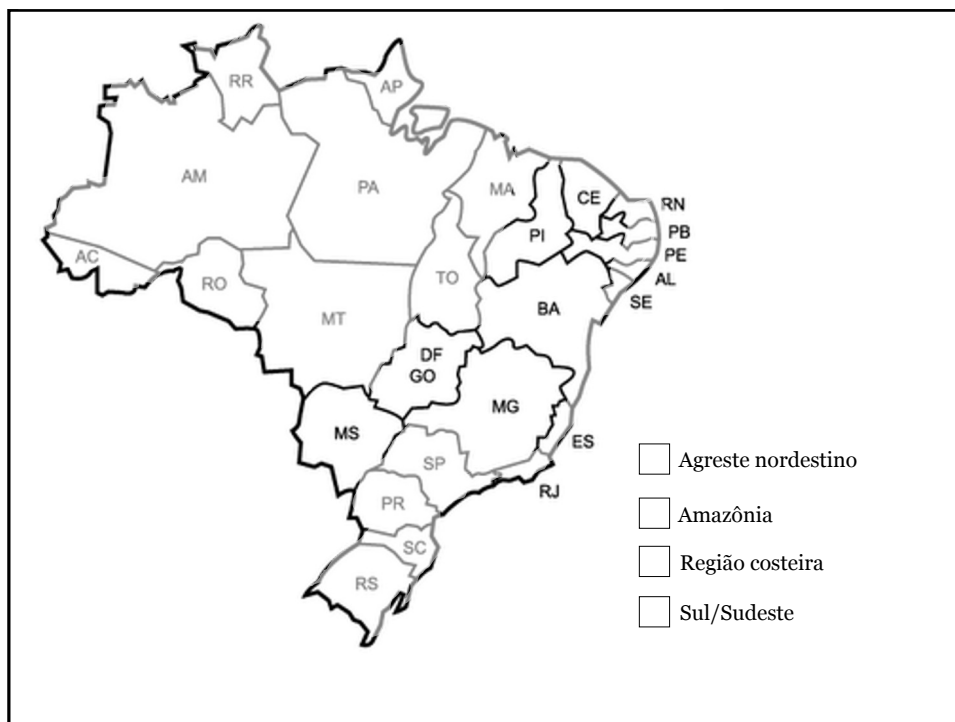
Parte da edificação	Exemplos	VUP (anos)		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura principal	Fundações, elementos estruturais (pilares, vigas, lajes e outros), paredes estruturais, estruturas periféricas, contenções e arrimos	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Cobertura	Rufos, calhas internas e demais complementos (de ventilação, iluminação, vedação)	≥ 8	≥ 10	≥ 12
Impermeabilização	Componentes de juntas e rejuntamentos, mata-juntas, sancas, golas, rodapés e demais componentes de arremate	≥ 4	≥ 5	≥ 6

24

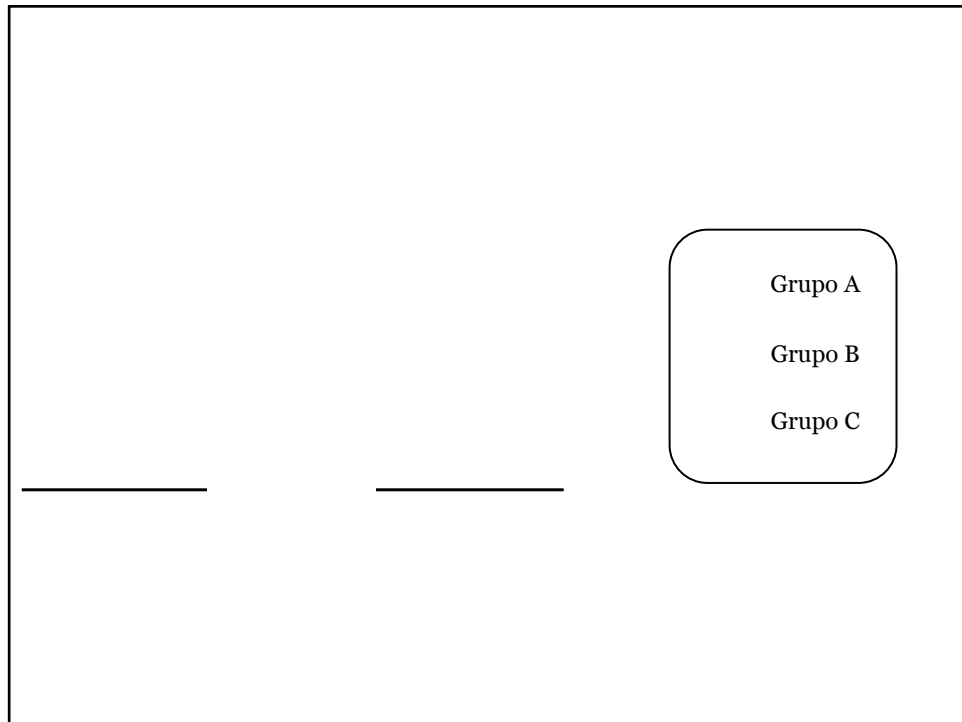
1º passo

Agressividade Ambiental

25



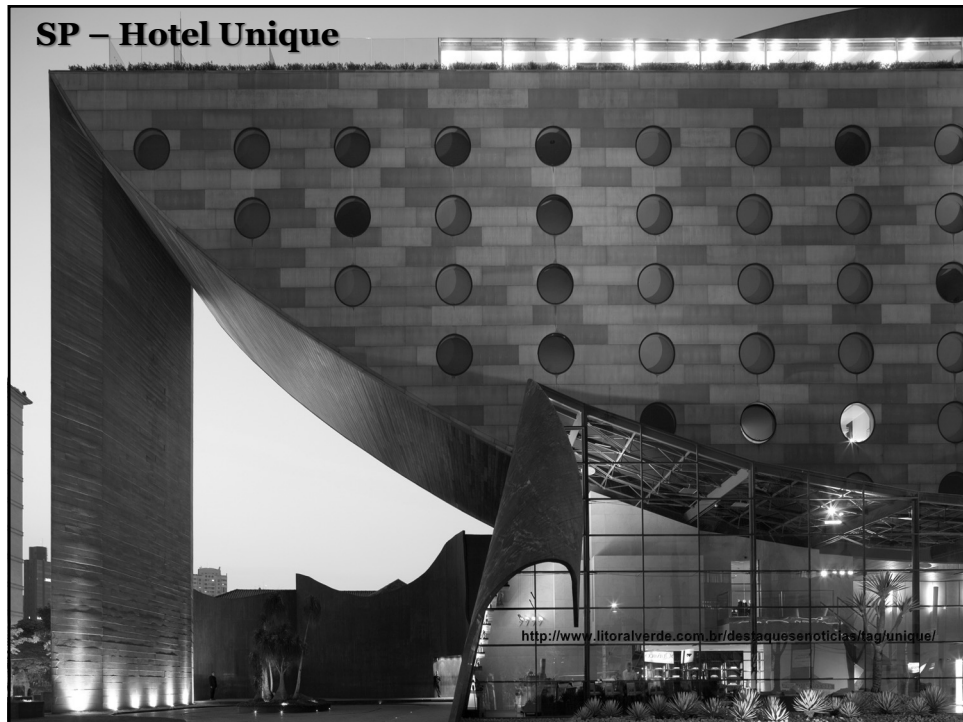
26



27



28



29



30



31

Classificação MACRO (e micro) Ambiental

32

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 ^{a,b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	
^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe 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). ^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove. ^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.			

33

Agressividade do ambiente

Classificação natureza fenômeno e micro região

Proposta da EN 206-1:2000
“Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity”

34

EN 206-1:2000 "Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity"		
Classe	Descrição do ambiente	Exemplos para ocorrência das classes de exposição
1 Nenhum risco de corrosão ou ataque		
Xo	Concreto sem armadura ou elementos metálicos embutidos: todas as exposições, exceto de gelo/degelo, abrasão ou ataque químico. Concretos com armadura ou elementos metálicos embutidos: muito seco	Concreto no interior de edifícios com umidade do ar muito baixa
2 Corrosão por carbonatação		
Onde o concreto contendo armadura ou elementos metálicos embutidos está exposto ao ar e à umidade.		
XC1	Seco ou permanentemente úmido	Interior de edifícios com baixa umidade do ar; concreto constantemente imerso em água
XC2	Úmido, raramente seco	Partes que retêm água; fundações
XC3	Umidade moderada	Interior de edifícios com umidade do ar moderada ou elevada; exteriores protegidos da chuva
XC4	Alternadamente úmido e seco	Superfícies em contato com água que não se encaixem no subgrupo de exposição XC2
3 Corrosão causada por cloretos		
Onde o concreto contendo armadura ou elementos metálicos embutidos está sujeito ao contato com água contendo cloretos, incluindo sais de degelo, desde que não sejam fontes de água do mar.		
XD1	Umidade moderada	Superfícies de concreto expostas diretamente a borrifos que contenham cloretos
XD2	Molhado, raramente seco	Piscinas, concreto exposto a águas industriais que contenham cloretos
XD3	Alternadamente molhado e seco	Partes de pontes, pavimentação, lajes de garagens ou estacionamentos
4 Corrosão causada por cloretos provenientes da água do mar		
Onde o concreto contendo armadura ou elementos metálicos embutidos está sujeito ao contato com cloretos provenientes da água do mar ou do ar que transporta sais provenientes do mar.		
XS1	Exposição à maresia, mas não em contato direto com a água marinha	Estruturas no litoral ou próximas do litoral
XS2	Permanentemente submerso	Partes de estruturas marinhas
XS3	Partes expostas à maré ou às ondas	Partes de estruturas marinhas
5 Ataque de gelo-degelo		
Onde o concreto é exposto a um significativo ataque de ciclos de gelo-degelo enquanto está úmido.		
XF1	Moderada saturação de água, sem agentes de degelo	Concreto com superfície vertical exposta a chuva e gelo
XF2	Moderada saturação de água, com agentes de degelo	Concreto de obras viárias com superfície vertical exposta a gelo e borrifos contendo cloretos
XF3	Elevada saturação de água, sem agentes de degelo	Concreto com superfície horizontal exposta a chuva e gelo
XF4	Elevada saturação de água com agentes de degelo ou água do mar	Lajes de pontes expostas a agentes de degelo e a gelo
6 Ataque químico		
Onde o concreto é exposto a ataque químico de solos naturais e água subterrâneas.		
XA1	Ambiente químico pouco agressivo	
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo	
XA3	Ambiente químico muito agressivo	

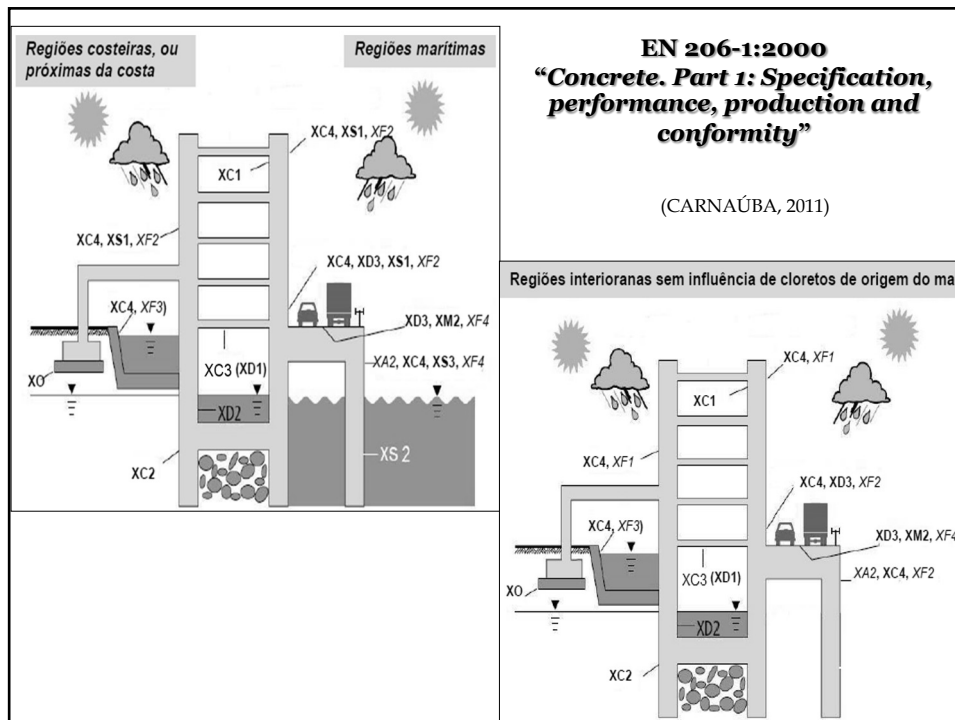
35

Agressividade do ambiente		
ACI 318-14		
Classificação por micro região e natureza da agressão		
Table 19.3.1.1—Exposure categories and classes		
Category	Class	Condition
Freezing and thawing (F)	F0	Concrete not exposed to freezing-and-thawing cycles
	F1	Concrete exposed to freezing-and-thawing cycles with limited exposure to water
	F2	Concrete exposed to freezing-and-thawing cycles with frequent exposure to water
	F3	Concrete exposed to freezing-and-thawing cycles with frequent exposure to water and exposure to deicing chemicals
Sulfate (S)		Water-soluble sulfate (SO_4^{2-}) in soil, percent by mass ^[1]
	S0	$\text{SO}_4^{2-} < 0.10$
	S1	$0.10 \leq \text{SO}_4^{2-} < 0.20$
	S2	$0.20 \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 2.00$
In contact with water (W)		Dissolved sulfate (SO_4^{2-}) in water, ppm ^[2]
	S0	$\text{SO}_4^{2-} < 150$
	S1	$150 \leq \text{SO}_4^{2-} < 1500$ or seawater
	S2	$1500 \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 10,000$
Corrosion protection of reinforcement (C)		Concrete dry in service
	W0	Concrete in contact with water and low permeability is not required
	W1	Concrete in contact with water and low permeability is required
	C0	Concrete dry or protected from moisture
	C1	Concrete exposed to moisture but not to an external source of chlorides
	C2	Concrete exposed to moisture and an external source of chlorides from deicing chemicals, salt, brackish water, seawater, or spray from these sources

^[1]Percent sulfate by mass in soil shall be determined by ASTM C1580.

^[2]Concentration of dissolved sulfates in water, in ppm, shall be determined by ASTM D516 or ASTM D4130.

36



37

3º passo

**Escolher concreto e
cobrimento**

38

Tabela 7.2 Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$ (ABNT NBR 6118:2014)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	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 $\geq 15\text{mm}$.

^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 $\geq 45\text{mm}$.

39

BS EN 1992-1-1:2004
EN 1992-1-1:2004 (E)

Table 4.4N: Values of minimum cover, $c_{\min, \text{dur}}$, requirements with regard to durability for reinforcement steel in accordance with EN 10080.

Environmental Requirement for $c_{\min, \text{dur}}$ (mm)							
Structural Class	Exposure Class according to Table 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Table 4.5N: Values of minimum cover, $c_{\min, \text{dur}}$, requirements with regard to durability for prestressing steel

Environmental Requirement for $c_{\min, \text{dur}}$ (mm)							
Structural Class	Exposure Class according to Table 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

40

Table 20.6.1.3.1—Specified concrete cover for cast-in-place nonprestressed concrete members

Concrete exposure	Member	Reinforcement	Specified cover, in.
Cast against and permanently in contact with ground	All	All	3
Exposed to weather or in contact with ground	All	No. 6 through No. 18 bars	2
		No. 5 bar, W31 or D31 wire, and smaller	1-1/2
Not exposed to weather or in contact with ground	Slabs, joists, and walls	No. 14 and No. 18 bars	1-1/2
		No. 11 bar and smaller	3/4
	Beams, columns, pedestals, and tension ties	Primary reinforcement, stirrups, ties, spirals, and hoops	1-1/2

Table 20.6.1.3.2—Specified concrete cover for cast-in-place prestressed concrete members

Concrete exposure	Member	Reinforcement	Specified cover, in.
Cast against and permanently in contact with ground	All	All	3
Exposed to weather or in contact with ground	Slabs, joists, and walls	All	1
	All other	All	1-1/2
Not exposed to weather or in contact with ground	Slabs, joists, and walls	All	3/4
	Beams, columns, and tension ties	Primary reinforcement	1-1/2
		Stirrups, ties, spirals, and hoops	1

ACI 318

Table 20.6.1.3.3—Specified concrete cover for precast nonprestressed or prestressed concrete members manufactured under plant conditions

Concrete exposure	Member	Reinforcement	Specified cover, in.
Exposed to weather or in contact with ground	Walls	No. 14 and No. 18 bars; tendons larger than 1-1/2 in. diameter	1-1/2
		No. 11 bars and smaller; W31 and D31 wire and smaller; tendons and strands 1-1/2 in. diameter and smaller	3/4
	All other	No. 14 and No. 18 bars; tendons larger than 1-1/2 in. diameter	2
		No. 6 through No. 11 bars; tendons and strands larger than 5/8 in. diameter through 1-1/2 in. diameter	1-1/2
Not exposed to weather or in contact with ground	Slabs, joists, and walls	No. 5 bar, W31 or D31 wire, and smaller; tendons and strands 5/8 in. diameter and smaller	1-1/4
		No. 14 and No. 18 bars; tendons larger than 1-1/2 in. diameter	1-1/4
		Tendons and strands 1-1/2 in. diameter and smaller	3/4
	Beams, columns, pedestals, and tension ties	No. 11 bar, W31 or D31 wire, and smaller	5/8
		Primary reinforcement	Greater of d_b and 5/8 and need not exceed 1-1/2
		Stirrups, ties, spirals, and hoops	3/8

41

Comparativo Requisitos de durabilidade				
Norma	Classe de concreto	Relação a/c	Consumo de cimento (kg)	Especificação de cimentos especiais
ABNT NBR 6118:2014 ABNT NBR 12655:2015	$C20 \leq f_{ck} \leq C40$	0,45 a 0,65	$260 \leq C_{cim} \leq 360$	Cimento resistente a sulfatos
fib Model Code Eurocode II EN 206-1:2000	$C20 \leq f_{ck} \leq C40$	0,45 a 0,65	$260 \leq C_{cim} \leq 360$	Cimento resistente a sulfatos
ACI 318-14	$18MPa \leq f'_c \leq 35MPa$	0,40 a livre	livre	Cimento resistente a sulfatos e teores limites de adições

42

Comparativo Cobrimentos

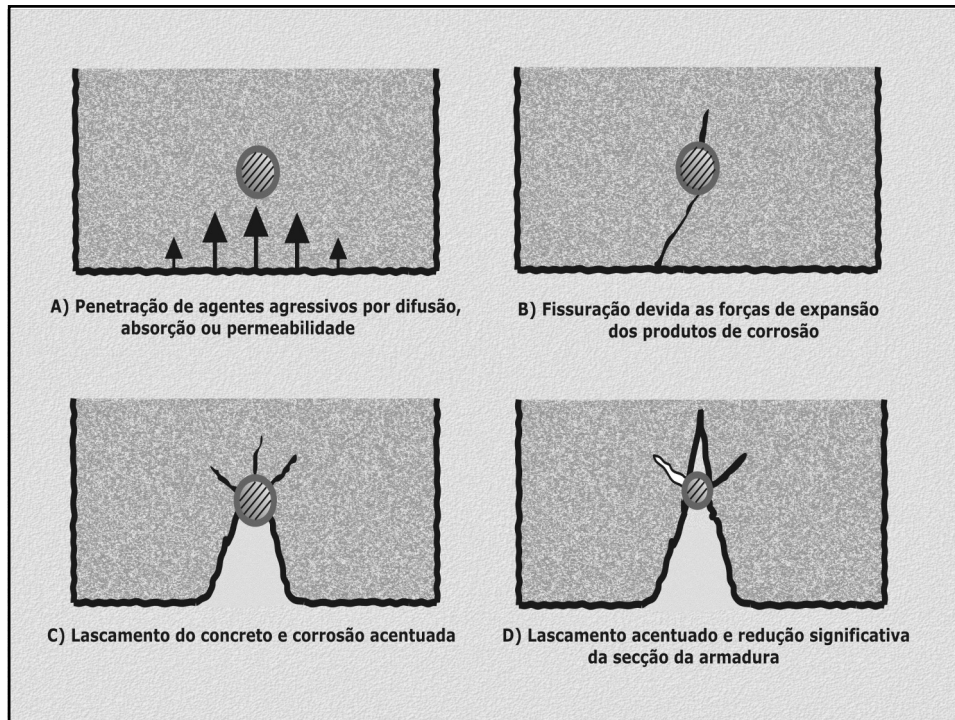
Norma	Concreto armado	Concreto protendido	Observações
ABNT NBR 6118:2014	20 a 50mm	25 a 55mm	Diferencia cobrimentos para diferentes elementos estruturais num mesmo ambiente (laje, viga/pilar, elementos de fundação)
EN 1992-1-1:2004	10 a 55mm	10 a 65mm	Não diferencia cobrimento por elemento estrutural
ACI 318-14	16mm a 75mm	16mm a 75mm	Separa por elemento estrutural e por condição de moldagem : <i>in loco</i> ou em fábrica de pré-moldados

43

Algumas definições de Vida Útil

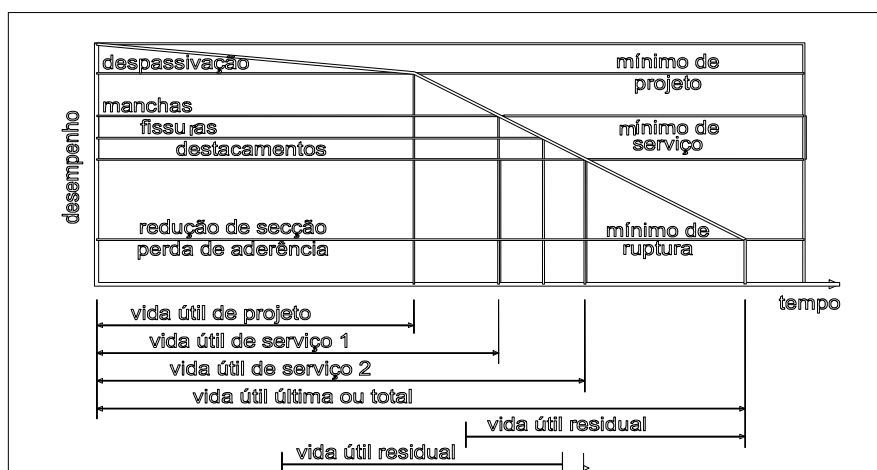
1. Vida Útil de serviço
2. Vida Útil de projeto
3. Vida Útil funcional
4. Vida Útil de ruptura
5. Vida Útil última o de colapso
6. Vida Útil nominal
7. Vida Útil residual
8. Vida Útil técnica
9. Vida Útil econômica

44



45

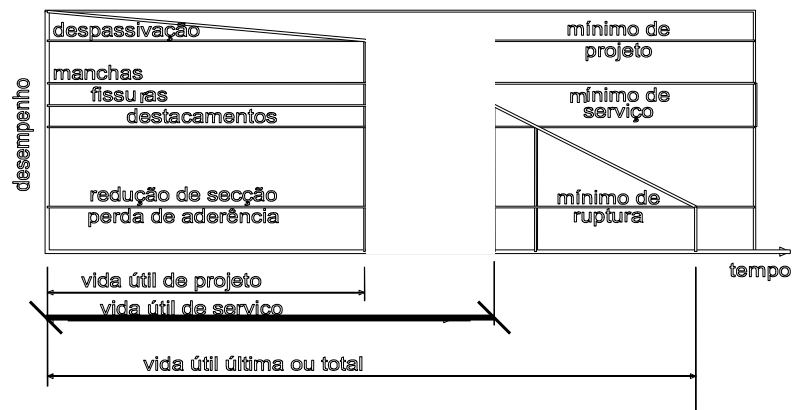
Modelo de Vida Útil para corrosão da armadura



46

ACI 318 → ACI 365

6 anos



47

Conceitos

- ✓ Conhecer como envelhece
- ✓ Definir VU
- ✓ Quantificar VU
- ✓ Estabelecer Estados Limites
- ✓ **Prever ou Estimar VU**
- ✓ Definir Manutenção

48

MODELOS de PREVISÃO de VIDA ÚTIL

- Prescritivo
- Mecanismos de transporte
- Estocásticos o probabilistas
- Ensaaios (+ *exatos*)

49

Vida Útil → Prescritiva

Não existe modelo matemático de previsão

É necessário utilizar caminhos indiretos:

- ✓ Eleger cimento, adições, áridos, água por m³;
- ✓ Fixar relação a/c e conteúdo de cimento;
- ✓ Fixar resistência e módulo;
- ✓ Fixar espessura de recobrimentos;
- ✓ Fixar abertura máxima de fissuras;
- ✓ Recomendar formas geométricas especiais;
- ✓ Adotar medidas de proteções especiais

50

Modelos de Previsão de Vida Útil

- ✓ Prescritiva
- ✓ Mecanismos de transporte (determinista)
- ✓ Estocásticos (probabilista)
- ✓ Ensaaios (*ideais*)

51

Principais mecanismos de transporte que atuam no concreto

- Permeabilidade (*gradiente de pressão A&G*);
- Sucção capilar (*forças capilares de A*);
- Difusão (*gradiente de concentração salina, temperatura o densidade AI&G*);
- Migração iônica (*diferença de potencial AI&G*).

52

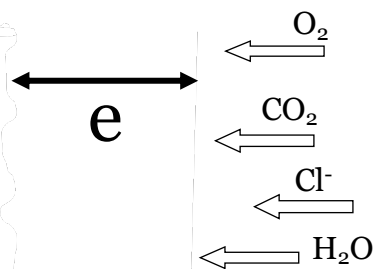
Modelos de Previsão de Vida Útil

Mecanismos de Transporte (determinísticos)

Generalização

$$e = k \cdot \sqrt{t}$$

acero



53

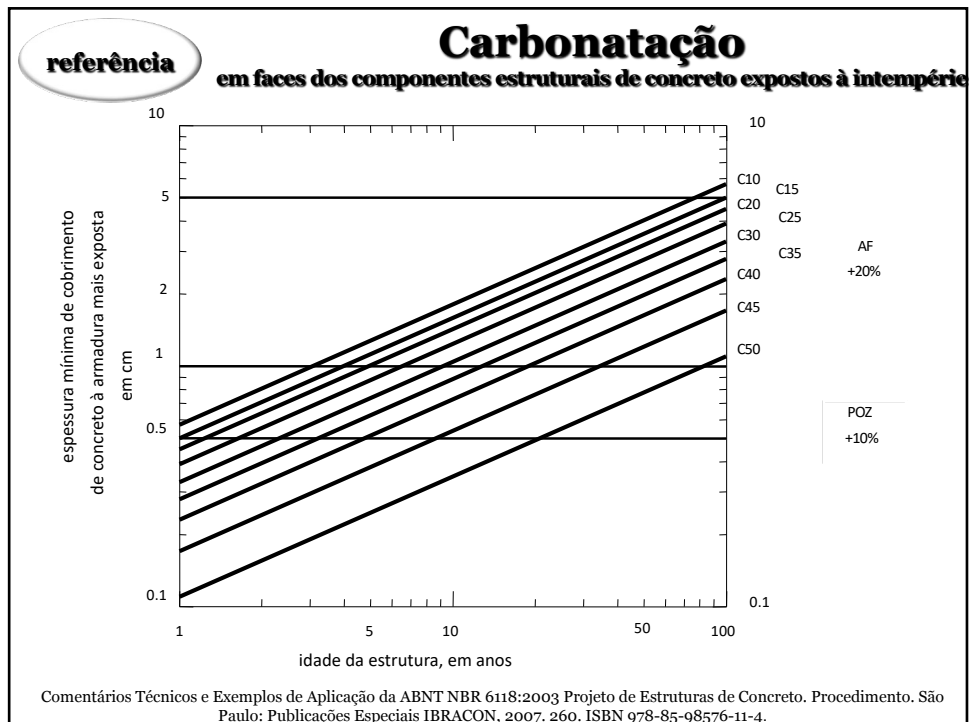
Carbonatação

$$t = \frac{e^2}{k_{CO_2}^2} \text{ (anos)}$$

➤ $e \rightarrow 10 \text{ a } 50 \text{ mm}$

➤ $k_{CO_2} \rightarrow 0.1 \text{ a } 1.0 \text{ cm/ano}^{1/2}$

54



55

Cloretos - difusão

$$t = \frac{e^2}{4 \cdot z^2 \cdot D_{ef,Cl}^{1/2}} \text{ (anos)}$$

$$e \rightarrow 10 \text{ a } 50\text{mm}$$

$$D_{ef,Cl} \rightarrow 0,15 \text{ a } 2,7 \text{ cm}^2/\text{ano}$$

56

Cloretos - difusão

$$e = 20\text{mm}$$

–

$$f'_c = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 4 \text{ anos}$$

$$f'_c = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 150 \text{ anos}$$

$$f'_c = 25 \text{ MPa} \rightarrow t = 23 \text{ anos}$$

57

Vida Útil Mecanismo de Transporte *determinista* Limitações

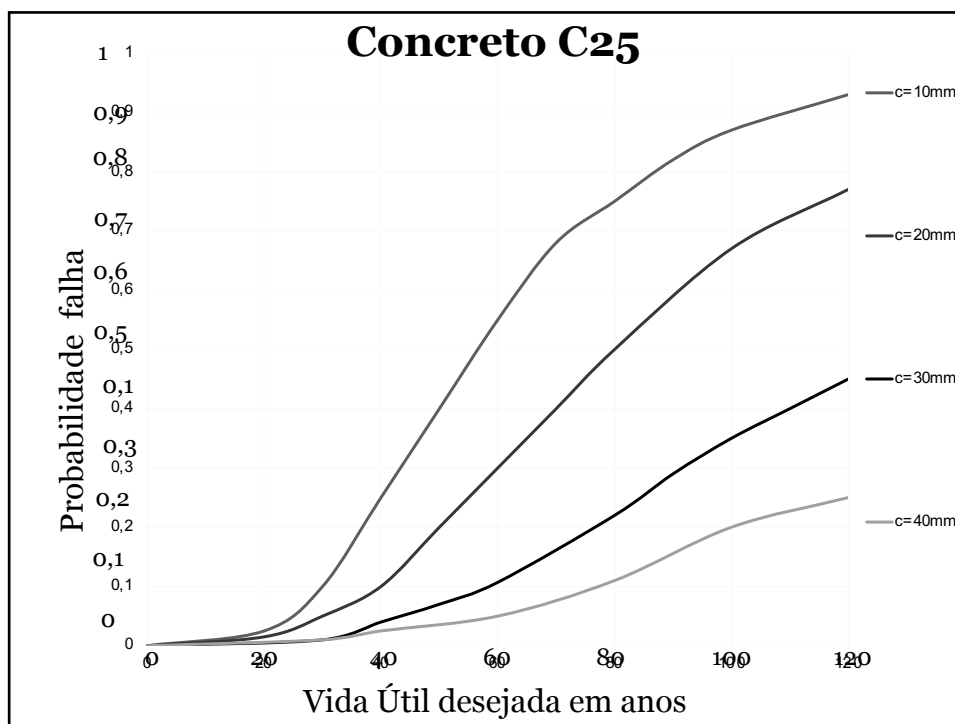
*O final da vida útil não ocorre
de forma repentina !*

58

Modelos de Previsão de Vida Útil

- ✓ Prescritiva
- ✓ Mecanismos de transporte (determinista)
- ✓ Estocásticos (probabilista)
- ✓ Ensaio (*ideais*)

59



60

Exemplo

Aplicação dos conceitos de durabilidade a dois casos práticos: um edifício no interior, em Brasília, e outro na costa, por exemplo Vitória/ES.

Premissas:

1. A maioria dos edifícios têm estrutura de concreto aparente nas garagens, que devem ser considerados ambientes externos pois sempre estão em contato direto com o exterior;
2. A maioria dos edifícios têm jardins e costumam lavar os pisos térreos atingindo os pés de pilares;
3. A maioria dos edifícios têm revestimentos cerâmicos em fachadas que, infelizmente são lavados com ácido muriático (ácido clorídrico comercial);
4. A maioria dos edifícios têm as coberturas planas e impermeabilizadas

61

Exemplo

1. Grupo A → Garagens, térreo, pilares de fachada, cisternas, reservatório superior e cobertura devem ter cobrimento maior, concreto melhor ou ambos;

2. Grupo B → Todos os ambientes internos secos (cozinhas, banheiros, áreas de serviço, dormitórios, salas, corredores, bibliotecas) podem ter cobrimentos menores, concretos inferiores ou ambos;

3. Grupo C → Elementos estruturais de concreto armado em contato direto com o solo (fundações), em condições normais de agressividade (ausência de sulfatos e águas puras, ácidas, magnesianas e amoniacaís).

62

A partir da Tabela 6.1 da *ABNT NBR 6118:2014*, para a classificação da agressividade, tem-se:

Obra	Grupo A Garagens, térreo, pilares de fachada, cisternas, reservatório superior e cobertura	Grupo B Ambientes internos secos (cozinhas, banheiros, áreas de serviço, dormitórios, salas, corredores, bibliotecas)	Grupo C Elementos estruturais de concreto armado em contato direto com o solo (fundações), em condições normais de agressividade
Brasília	II	I	II
Vitória	III	II	III

63

A partir das tabelas 7.1 e 7.2 da *ABNT NBR 6118:2014*, resulta em:

Obra e Grupo			Concreto e elementos		Relação a/c	f_{ck} (MPa)	Cobrimento (mm)
					NBR 6118	NBR 6118	NBR 6118
Brasília	A	Garagens, térreo, pilares de fachada, cisternas, reservatório superior e cobertura	CA	laje	< 0,60	25	25
				viga/pilar			30
			CP	laje	< 0,55	30	30
				viga/pilar			35
	B	Ambientes internos secos (cozinhas, banheiros, áreas de serviço, dormitórios, salas, corredores, bibliotecas)	CA	laje	< 0,65	20	20
				viga/pilar			25
			CP	laje	< 0,60	25	25
				viga/pilar			30
	C	Elementos estruturais de concreto armado em contato direto com o solo (fundações), em condições normais de agressividade	CA	fundações	< 0,60	25	45**

* NOTA 1: a *ABNT NBR 6118:2014* permite que os cobrimentos sejam reduzidos de 5mm quando se utiliza um concreto de classe de resistência superior à especificada na tab. 7.1.
 ** NOTA 2: Ver **nota d** da tabela 7.2 da *ABNT NBR 6118:2014*.

64

A partir das tabelas 7.1 e 7.2 da ABNT NBR 6118:2014, resulta em:

Obra e Grupo			Concreto e elementos		Relação a/c	f_{ck} (MPa)	Cobrimento (mm)
					NBR 6118	NBR 6118	NBR 6118
Vitória	A	Garagens, térreo, pilares de fachada, cisternas, reservatório superior e cobertura	CA	laje	< 0,55	30	35
				viga/pilar			40
			CP	laje	< 0,50	35	40
				viga/pilar			45
	B	Ambientes internos secos (cozinhas, banheiros, áreas de serviço, dormitórios, salas, corredores, bibliotecas)	CA	laje	< 0,60	25/30*	25/20*
				viga/pilar			30/25*
			CP	laje	< 0,55	30/35*	30/25*
				viga/pilar			
	C	Elementos estruturais de concreto armado em contato direto com o solo (fundações), em condições normais de agressividade	CA	fundações	< 0,55	30	45**

* NOTA 1: a ABNT NBR 6118:2014 permite que os cobrimentos sejam reduzidos de 5mm quando se utiliza um concreto de classe de resistência superior à especificada na tab. 7.1.

** NOTA 2: Ver **nota d** da tabela 7.2 da ABNT NBR 6118:2014.

65

Modelos de previsão de vida útil Difusão de cloretos

- Com base em enfoque determinista (LIFE-365);
- Com base em enfoque probabilista (DURACON).

66

Life-365



O software Life-365 é uma ferramenta de auxílio para calcular a vida útil considerando a difusão for cloreto segundo o ACI 365.

É possível fazer o download pelo site:
www.life-365.org/download.html

67

DURACON

O software Duracon é uma ferramenta desenvolvida na Dinamarca para calcular a vida útil considerando a difusão por cloreto.

Foi o software utilizado por Odd E. Gjorv em seu livro “Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambiente de severa agressividade”.

É possível fazer o download pelo site:
www.pianc.no/duracon.php

68

Exemplo

Um edifício deverá ser projetado na região de Recife/PE, com cobrimentos de 40mm e 75mm, atendendo a vida útil de 50 anos, considerando o ataque por cloreto.

Para isso devem ser analisados:

- Tipo de cimento
- Relação a/c
- adições



Utilizando os softwares Duracon e Life-365, tendo em vista as seguintes regiões:

- Obra na zona de respingos de maré ($C_s = 1,0$)
- Obra localizada a 800m da praia ($C_s = 0,6$)

69

Exemplo

Cobrimento	c	mm
Relação água/cimento	a/c	-
Coefficiente de difusibilidade aos 28 dias	D₂₈	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Concentração crítica de cloreto	C_{cr}	wt. concr. (%)
Concentração superficial de cloreto	C_s	wt. concr. (%)
Idade do concreto quando realizado o ensaio	28	dias

70

CPI ou CPV Alta resistência inicial (0% adições) + 8% Sílica Ativa							
c (mm)	C _{cr} (% wt. conc)	C _s (% wt. conc)	a/c	D ₂₈ (10 ⁻¹² m ² /s)	Vida útil (anos)		Life/Duracon
					Life 365	Duracon	
40	0,05	1	0,55	4,8611	3,6	1	3,6
			0,5	3,6575	4,2	2	2,1
			0,45	2,7973	5,1	2	2,6
			0,35	1,6096	7,4	5	1,5
75	0,05	1	0,55	4,8611	12,8	6	2,1
			0,5	3,6575	16,1	9	1,8
			0,45	2,7973	20,5	12	1,7
			0,35	1,6096	34,3	24	1,4

CPIII Escória de alto forno (60% escória) + 8% Sílica Ativa							
c (mm)	C _{cr} (% wt. conc)	C _s (% wt. conc)	a/c	D ₂₈ (10 ⁻¹² m ² /s)	Vida útil (anos)		Life/Duracon
					Life 365	Duracon	
40	0,05	1	0,55	4,8611	9	5	1,8
			0,5	3,6575	11,6	8	1,5
			0,45	2,7973	15,3	13	1,2
			0,35	1,6096	29,2	34	0,9
75	0,05	1	0,55	4,8611	70,4	51	1,4
			0,5	3,6575	94,6	86	1,1
			0,45	2,7973	126,4	141	0,9
			0,35	1,6096	224,2	379	0,6

71

CPI ou CPV Alta resistência inicial (0% adições) + 8% Sílica Ativa							
c (mm)	C _{cr} (% wt. conc)	C _s (% wt. conc)	a/c	D ₂₈ (10 ⁻¹² m ² /s)	Vida útil (anos)		Life/Duracon
					Life 365	Duracon	
40	0,05	0,6	0,55	4,8611	5,8	1	5,8
			0,5	3,6575	6,8	2	3,4
			0,45	2,7973	8	3	2,7
			0,35	1,6096	11,2	6	1,9
75	0,05	0,6	0,55	4,8611	18,1	7	2,6
			0,5	3,6575	22,3	11	2,0
			0,45	2,7973	28	15	1,9
			0,35	1,6096	45,2	29	1,6

CPIII Escória de alto forno (60% escória) + 8% Sílica Ativa							
c (mm)	C _{cr} (% wt. conc)	C _s (% wt. conc)	a/c	D ₂₈ (10 ⁻¹² m ² /s)	Vida útil (anos)		Life/Duracon
					Life 365	Duracon	
40	0,05	0,6	0,55	4,8611	15,3	6	2,6
			0,5	3,6575	19,6	11	1,8
			0,45	2,7973	25,8	17	1,5
			0,35	1,6096	45,4	44	1,0
75	0,05	0,6	0,55	4,8611	93,4	86	1,1
			0,5	3,6575	123,2	114	1,1
			0,45	2,7973	162,6	185	0,9
			0,35	1,6096	283,7	516	0,5

72

Projetar para Durabilidade

Necessidade de sempre utilizar o bom senso na tomada de decisões e considerar o problema com uma visão holística que vise abarcar todas as variáveis, sem se prender a um número, que pode ter significado relativo e não absoluto

73

Estruturas de Concreto

- **É possível não ter problemas**
- **É durável, tem vida útil longa**
- **Necessita gerenciar a qualidade**
 - **Necessita ter visão sistêmica**
 - **É um trabalho de equipe**
- **Precisa conhecer e bem usar normas e documentos existentes**

74

Comprometimento!

Do your best!

75



76