



1

Normas

- ✓ 2015 → **ISO 15686** Building and constructed assets. Service life planning
- ✓ 2012 → **ISO 16204** Durability: Service Life Design of Concrete Structures
- ✓ 2010 → **fib** Model Code 2010. Concrete Structures
- ✓ 2006 → **fib** Model Code for Service Life Design

2

Princípios

introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto

fib Model Code for Service Life Design. 2006

Existem 4 alternativas para introduzir VUP:

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, recubrimentos, etc.)*
4. The avoidance-of-deterioration method. *Método baseado na proteção das estruturas*

3

Conceitos

1. Mecanismos de envelhecimento
2. Estabelecer Estados Limites de Durabilidade DLS
3. Definir conceitos de vida útil (VU, ESL, VUP ou RSL ou SLD, VUresidual)
4. Modelos matemáticos (deterministas e probabilistas)
5. Fatores intervenientes

4

Mecanismos de Envelhecimento

Armadura

- ✓ corrosão por carbonatação
- ✓ corrosão por cloretos

Concreto

- ✓ lixiviação → água, chuva ácida e ácidos
- ✓ expansão → sulfatos internos (DEF) e externos, AAR
- ✓ intemperismo → fungos, fuligem, poeira, abrasão

Estrutura

- ✓ ações mecânicas, movimentos térmicos, impactos, ações cíclicas, retração, fluência, relaxação, incêndio ... fator humano (*projeto, execução, uso, manutenção*)

5

Mecanismos → Armadura

Corrosão Eletroquímica

2. *Estados limites de durabilidade DLS* → Brasil (nihil); EN (nihil, despassivação + x% perda secção); ACI (despassivação + 6anos)

3. *Definição VU* → Brasil (VU e VUP); EN (RSL e ESL e DSL); ACI (DSL)

4. *Modelos* → Brasil & EN vários, nenhum consensuado, ACI 365 só Cl-

5. *Fatores intervenientes* → ambiente; arquitetura; projeto; materiais; execução; uso; manutenção

6

Mecanismo → Concreto

Lixiviação & Expansão (SO₄⁻²; DEF ; AAR) & Intemperismo

2. *Estados limites de durabilidade DLS* → Brasil (nihil); EN (nihil); ACI (nihil)

3. *Definição VU* → Brasil (VU e VUP); EN (RSL e ESL e DSL); ACI (DSL)

4. *Modelos* → poucos Canadá na vanguarda

5. *Fatores intervenientes* → ambiente, arquitetura, projeto, materiais, execução, uso, manutenção

7

Mecanismo → Estrutura

ações mecânicas, movimentos térmicos, impactos, ações cíclicas, retração, fluência, relaxação, incêndio ... fator humano (*projeto, execução, uso, manutenção*)

2. *Estados limites de durabilidade DLS* → nihil e confunde com ELS (SLS) & ELU (ULS)

3. *Definição VU* → Brasil (VU e VUP); EN (RSL e ESL e DSL); ACI (DSL)

4. *Modelos* → confunde com os de cálculo

5. *Fatores intervenientes* → ambiente, arquitetura, projeto, materiais, execução, uso, manutenção

8



9

Modelos prescritivos (“experiência”) → 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

10

Modelos prescritivos (“experiência”) → comparativo *Cobrimentos*

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

11

Introdução da Durabilidade no projeto das estruturas de concreto

O objetivo é prescrever uma metodologia de cálculo, que considerando um conjunto importante de variáveis, permita definir e escolher, inteligentemente, os materiais e detalhes construtivos adequados para assegurar uma vida útil de, 50 anos ou mais, com uma manutenção preventiva leve.

12

Introdução da Durabilidade no projeto das estruturas de concreto

Identificado o mecanismo de envelhecimento naquele ambiente a meta principal é ter ferramentas e critérios para escolher:

1. O concreto (a/c ; C ; consistência, f_{ck} ; E_{cs} ; porosidade, difusividade, resistividade, etc.)
2. O tipo e consumo de cimento;
3. A natureza e teor das adições;
4. A natureza e teor dos agregados;
5. O cobrimento da armadura;
6. O limite de abertura de fissura;
7. Os procedimentos de cura

13

Vida Útil de Projeto VUP ou RSL

...é preciso existir um modelo matemático, um ábaco, uma tabela de previsão da deterioração com o tempo !...

A implantação de uma certa metodologia para cálculo de VUP, por mais completa e detalhada que seja, vai se restringir a uma dada situação padronizada de exposição, de projeto, de certo concreto, de uso, de manutenção, ou seja a vida útil resultante desse “modelo” tem limitações e por isso é chamada no Brasil de VUP e, na Europa de RSL (*reference service life*).

Essa VUP ou RSL poderá ser alterada no tempo, como função de vários fatores intervenientes, dando origem à VU efetiva ou real.

14

“modelos”

ABNT NBR 6118:2014
ABNT NBR 12655:2015



cloreto e carbonatação
IBRACON – Helene
UFRGS - Possan

EN DURACON



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

ACI 318 → ACI 365



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

15

“MODELOS” DE VIDA ÚTIL → Cloretos

MODELOS	CARATERÍSTICAS	observações
fib model code for service life design	baseado na 2ª Lei de Fick cloreto e carbonatação probabilístico	fib bulletin 34 ISBN: 978-2-88394-074-1
ACI Life 365	baseado na 2ª Lei de Fick cloreto determinístico + custo de ciclo de vida	software gratuito www.Life365.org
Stadium	baseado na equação Nernst-Planck cloreto, carbonatação e sulfatos probabilístico	software pago www.simcotechologies.com
Concrete Works	baseado na 2ª Lei de Fick cloreto probabilístico	software pago www.texasconcreteworks.com
IBRACON – Helene	baseado na 2ª Lei de Fick cloreto e carbonatação determinístico	Comentários Técnicos e Exemplos de Aplicação da NB-1, 2007. ISBN 978-85-98576-11-4

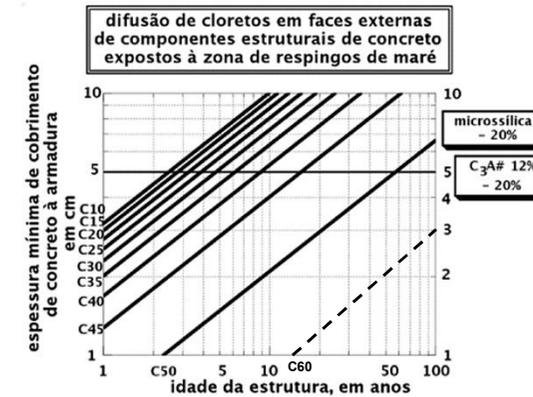
16

Modelos de previsão de vida útil Difusão de cloretos

- base enfoque determinista (média 50%) → **ábaco IBRACON Helene**
- base enfoque probabilista (10%) → **EN DURACON**
- base enfoque determinista (média 50%) → **ACI LIFE 365**

17

Modelo referente a cloretos: cobertura vs VUP vs concreto vs cimento referido à espessura de cobertura mínima



fonte: ábaco proposto por Paulo Helene em 1997, acessível na prática recomendada IBRACON (Comentários Técnicos e Exemplos de Aplicação da NB-1, p. 36, 2007. ISBN 978-85-98576-11-4)

18

Life-365



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

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

19

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” (IBRACON).

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

20

Comparativo ABNT vs EN 1992

Um edifício deverá ser projetado em região litorânea, considerando o ataque por cloretos (classe de agressividade CAA III da ABNT NBR 12655 e ABNT NBR 6118)

Segundo a ABNT NBR 6118:2014:

Para $f_{ck} = 30$ MPa, $a/c = 0,55$ e $c=40$ mm

Para $f_{ck} = 40$ MPa, $a/c = 0,45$ e $c=35$ mm

Para $f_{ck} = 60$ MPa, $a/c = 0,35$ e $c=35$ mm

Segundo a EN 1992:

Para $f_{ck} = 30$ MPa, $a/c = 0,55$ e $c= 45$ mm

Para $f_{ck} = 40$ MPa, $a/c = 0,45$ e $c=40$ mm

Para $f_{ck} = 60$ MPa, $a/c = 0,35$ e $c=40$ mm

Variáveis:

- CP I ou CP V (+8% SA ou MC): coef. $m = 0,20$
- CP III (+8% SA ou MC): coef. $m=0,54$
- CP IV (+8% SA ou MC): coef. $m=0,44$

Utilizando os softwares Duracon e Life-365, e tendo em vista que a obra está localizada na atmosfera marinha livre de respingos de maré ($C_s = 0,6\%$) e sendo $C_{cr} = 0,05\%$ (sobre a massa de concreto).

Exemplo

Dado de entrada	Símbolo	Unidade
Cobrimento	c	mm
Relação água/cimento	a/c	kg/kg
Coefficiente de difusão de cloretos aos 28 dias	D₂₈	10^{-12} m ² /s
Concentração crítica de cloreto	C_{cr}	wt. concr. (%)
Concentração superficial de cloreto	C_s	wt. concr. (%)

Paulo Helene, Ribeiro & Pacheco
PPT PhD Engenharia – I Simpósio de Durabilidade em Concretos do MS 12.12.2017

21

22

ABNT NBR 6118:2014

CP I ou CP V + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)							Vida útil (anos)	
f_{ck}	c (mm)	a/c	C _{cr} (% wt. conc)	m	D ₂₈ (10^{-12} m ² /s)	Life 365	Duracon	
30	40	0,55	0,05	0,2	4,8611			7,4
40	35	0,45	0,05	0,2	2,7973	8	2	
60	35	0,35	0,05	0,2	1,6096	11,2	4	

CP IV + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)							Vida útil (anos)	
f_{ck}	c (mm)	a/c	C _{cr} (% wt. conc)	m	D ₂₈ (10^{-12} m ² /s)	Life 365	Duracon	
30	40	0,55	0,05	0,44	4,8611			15,5
40	35	0,45	0,05	0,44	2,7973	16,4	5	
60	35	0,35	0,05	0,44	1,6096	26,8	13	

CP III + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)							Vida útil (anos)	
f_{ck}	c (mm)	a/c	C _{cr} (% wt. conc)	m	D ₂₈ (10^{-12} m ² /s)	Life 365	Duracon	
30	40	0,55	0,05	0,54	4,8611			24,4
40	35	0,45	0,05	0,54	2,7973	25,8	10	
60	35	0,35	0,05	0,54	1,6096	45,4	26	

23

EN 1992-1

CP I ou CP V + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)							Vida útil (anos)	
f_{ck}	c (mm)	a/c	C _{cr} (% wt. conc)	m	D ₂₈ (10^{-12} m ² /s)	Life 365	Duracon	
30	45	0,55	0,05	0,2	4,8611			7,7
40	40	0,45	0,05	0,2	2,7973	10,6	3	
60	40	0,35	0,05	0,2	1,6096	15,6	6	

CP IV (30% de Cinza Volante) + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)							Vida útil (anos)	
f_{ck}	c (mm)	a/c	C _{cr} (% wt. conc)	m	D ₂₈ (10^{-12} m ² /s)	Life 365	Duracon	
30	45	0,55	0,05	0,44	4,8611			16,1
40	40	0,45	0,05	0,44	2,7973	25,6	9	
60	40	0,35	0,05	0,44	1,6096	43,7	21	

CP III (60% de Escória) + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)							Vida útil (anos)	
f_{ck}	c (mm)	a/c	C _{cr} (% wt. conc)	m	D ₂₈ (10^{-12} m ² /s)	Life 365	Duracon	
30	45	0,55	0,05	0,54	4,8611			25,3
40	40	0,45	0,05	0,54	2,7973	43,2	17	
60	40	0,35	0,05	0,54	1,6096	75,5	44	

24

NBR 6118:2014 vs. EN 1992

ABNT NBR 6118:2014				EN 1992			
CPI ou CPV + 8% Sílica Ativa (ou 8% de Metacaulim)				CPI ou CPV + 8% Sílica Ativa (ou 8% de Metacaulim)			
Vida útil (anos)				Vida útil (anos)			
Life 365	Duracon	Helene (1997)		Life 365	Duracon	Helene (1997)	
7,4	1	1,2	$f_{ck}=30; c=40$	7,7	2	1,4	$f_{ck}=30; c=45$
8	2	1,5	$f_{ck}=40; c=35$	10,6	3	2,1	$f_{ck}=40; c=40$
11,2	4	48,0	$f_{ck}=60; c=35$	15,6	6	66	$f_{ck}=60; c=40$
CPIV + 8% Sílica Ativa (ou 8% de Metacaulim)				CPIV + 8% Sílica Ativa (ou 8% de Metacaulim)			
Vida útil (anos)				Vida útil (anos)			
Life 365	Duracon	Helene (1997)		Life 365	Duracon	Helene (1997)	
15,5	4	1,2	$f_{ck}=30; c=40$	16,1	6	1,4	$f_{ck}=30; c=45$
16,4	5	1,5	$f_{ck}=40; c=35$	25,6	9	2,1	$f_{ck}=40; c=40$
26,8	13	48,0	$f_{ck}=60; c=35$	43,7	21	66	$f_{ck}=60; c=40$
CPIII + 8% Sílica Ativa (ou 8% de Metacaulim)				CPIII + 8% Sílica Ativa (ou 8% de Metacaulim)			
Vida útil (anos)				Vida útil (anos)			
Life 365	Duracon	Helene (1997)		Life 365	Duracon	Helene (1997)	
24,4	6	1,2	$f_{ck}=30; c=40$	25,3	10	1,4	$f_{ck}=30; c=45$
25,8	10	1,5	$f_{ck}=40; c=35$	43,2	17	2,1	$f_{ck}=40; c=40$
45,4	26	48,0	$f_{ck}=60; c=35$	75,5	44	66	$f_{ck}=60; c=40$

25

Comparativo - ANÁLISE DE VIDA ÚTIL DE PROJETO AMBIENTE DE AGRESSIVIDADE CAA II Carbonatação, ABNT NBR 6118

insumo	quantidade por m ³	
	Traço A $f_{cm} = 46,6 \text{ MPa}$	Traço B $f_{cm} = 51,6 \text{ MPa}$
Cimento CP V	320 kg	260 kg
britas	1044 kg	988 kg
areias	825 kg	969 kg
aditivo 1	2,4 kg	3,26 kg
aditivo 2	-	0,36 kg
aditivo 3	-	0,56 kg
água	192 L	140 L
relação a/c	0,60	0,55
classe de abatimento	S160	S220
D _{max} brita	19 mm	19 mm
Teor de álcalis	3,1 kg/m ³	2,5 kg/m ³
Teor de sulfatos	10,9 kg/m ³	8,9 kg/m ³

26

CASO DE ESTUDO- ANÁLISE DE VIDA ÚTIL DE PROJETO AMBIENTE DE AGRESSIVIDADE II (Urbana)

■ Cálculo da Vida Útil de Projeto, VUP, segundo HELENE (1997)



Segundo este modelo, ao utilizar o concreto B, obtém-se um incremento de vida útil de projeto, VUP, de cerca de 63% em relação à VUP do concreto de A.

27

“MODELOS” DE VIDA ÚTIL → Carbonatação

Modelos de VUP	Concreto A	Concreto B
TUUTTI (1982)	50	92
MORINAGA (1990)	59	77
BOB e BOB (1991)	86	109
HELENE (1997)	40	65
CEB (1997)	146	181
EHE (2008)	209	265

28

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

29

Vida Útil → Fatores Intervinentes multiplicar a VUP ou RSL

ISO 15686	fatores intervinientes	exemplo	deficiente	normal	primoroso
1	ambiente	chuva UR		1	
2	arquitetura	rufos caimento	0,85 0,80	1	1,10 1,10
3	projeto	w_k f_{ck}	0,85 0,90	1	1,05 1,10
4	materiais	aditivos adições	0,75 0,70	1	1,15 1,15
5	execução	água (175 L/m ³) cura	0,80 0,85	1	1,05 1,05
6	uso	carga	0,85	1	1,00
7	manutenção		0,75	1	1,10

30

Estruturas de Concreto

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

31

OBRIGADO!

WWW.PHD.ENG.BR

11-2501-4822 / 23
11-95045-4940

Realização:

IBRACON
EDIFICANDO IDEIAS E CONCRETANDO VALORES

32