

Crêterios de C culo da Vida útil de Projeto VUP (ABNT NBR 15575) Estruturas de Concreto

Prof. Paulo Helene
www.phd.eng.br
www.ibracon.org.br

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

Princ pios

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 (caracter sticos)*
3. The deemed-to-satisfy method. *Método prescritivo (a/c, recubrimientos, 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

TRADIÇÃO

baseado em experiências anteriores

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
<i>fib</i> 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: <i>in loco</i> 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
<i>fib</i> model code for service life design	baseado na 2ª lei de Fick cloreto e carbonatação probabilístico	<i>fib</i> 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

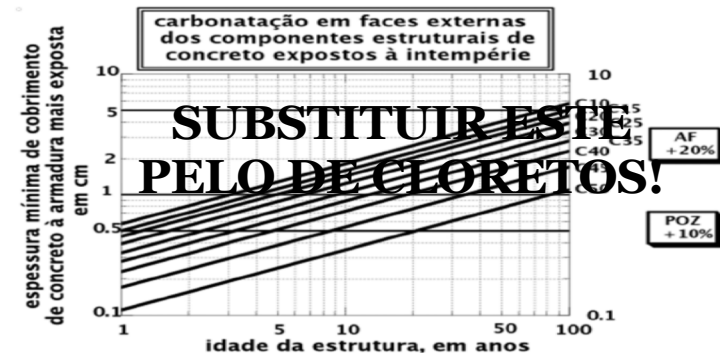
16

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: cobrimento vs VIUP vs concreto vs cimento
ABAQUS PARA OBTIVER VIDA ÚTIL
referido à espessura de cobrimento mínimo



fonte: ábaco proposto por Paulo Helene em 1997, acessível na prática recomendada IBRACON (título, página, ISBN)

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).

21

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	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Concentração crítica de cloreto	C_{cr}	wt. concr. (%)
Concentração superficial de cloreto	C_s	wt. concr. (%)

Paulo Helene & Mariana Pacheco
PhD Engenharia 25.11.2015

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 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Life 365	Duracon
30	40	0,55	0,05	0,2	4,8611	7,4	1
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 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Life 365	Duracon
30	40	0,55	0,05	0,44	4,8611	15,5	4
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 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Life 365	Duracon
30	40	0,55	0,05	0,54	4,8611	24,4	6
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 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Life 365	Duracon
30	45	0,55	0,05	0,2	4,8611	7,7	2
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 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Life 365	Duracon
30	45	0,55	0,05	0,44	4,8611	16,1	6
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 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Life 365	Duracon
30	45	0,55	0,05	0,54	4,8611	25,3	10
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			IBRACON PH	EN 1992		
CPI ou CPV + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)				CPI ou CPV + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)		
Vida útil (anos)				Vida útil (anos)		
Life 365	Duracon			Life 365	Duracon	
7,4	1	$f_{ck}=30$; $c=40$		7,7	2	$f_{ck}=30$; $c=45$
8	2	$f_{ck}=40$; $c=35$		10,6	3	$f_{ck}=40$; $c=40$
11,2	4	$f_{ck}=60$; $c=35$		15,6	6	$f_{ck}=60$; $c=40$
CPIV + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)				CPIV + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)		
Vida útil (anos)				Vida útil (anos)		
Life 365	Duracon			Life 365	Duracon	
15,5	4	$f_{ck}=30$; $c=40$		16,1	6	$f_{ck}=30$; $c=45$
16,4	5	$f_{ck}=40$; $c=35$		25,6	9	$f_{ck}=40$; $c=40$
26,8	13	$f_{ck}=60$; $c=35$		43,7	21	$f_{ck}=60$; $c=40$
CPIII + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)				CPIII + 8% Silica Ativa (ou 8% de Metacaulim)		
Vida útil (anos)				Vida útil (anos)		
Life 365	Duracon			Life 365	Duracon	
24,4	6	$f_{ck}=30$; $c=40$		25,3	10	$f_{ck}=30$; $c=45$
25,8	10	$f_{ck}=40$; $c=35$		43,2	17	$f_{ck}=40$; $c=40$
45,4	26	$f_{ck}=60$; $c=35$		75,5	44	$f_{ck}=60$; $c=40$

25

"MODELOS" DE VIDA ÚTIL → Carbonatação
 INCLUIR os modelos estudados no Parecer (listar em ordem cronológica)

MODELOS	CARATERÍSTICAS	observações
<i>fib</i> model code for service life design	baseado na 2ª lei de Fick cloreto e carbonatação probabilístico	<i>fib</i> bulletin 34 ISBN: 978-2-88394-074-1
ACI Life 365	Modelos de VUP	software gratuito www.Life365.org
	Concreto de referência (anos)	
	TUUTTI (1982)	
	BOB e BOB (1991)	
	MORINAGA (1990)	
Stadium	HELENE (1997)	software pago www.simcotechologies.com
	POSSAN (2010)	
	CEB (1997)	
	EHE (2008)	
	Spectra 40 (anos)	
Concrete Works	baseado na 2ª Lei de Fick cloreto probabilístico	software pago www.texasconcreteworks.com

26

Comparativo - ANALISE DE VIDA UTIL DE PROJETO
 AMBIENTE DE AGRESSIVIDADE CAA II Carbonatação, ABNT NBR 6118

Traço A $f_{ck} = 40$ MPa

insumo	quantidade por m³
cimento CP V	320 kg
britas	1044 kg
areias	825 kg
aditivo	2,4 kg
água	192 L
relação a/c	0,60
classe de abatimento	S160
D_{max} brita	19 mm
Teor de álcalis	3,1 kg/m³
Teor de sulfatos	10,9 kg/m³

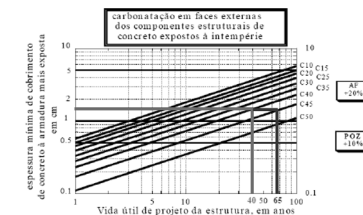
Traço B $f_{ck} = 45$ MPa

insumo	Quantidade por m³
Cimento CP V	260 kg
britas	988 kg
areias	969 kg
aditivo 1	3,26 kg
aditivo 2	0,36 kg
aditivo 3	0,56 kg
água	140 L
relação a/c	0,55
classe de abatimento	S220
D_{max} brita	19 mm
Teor de álcalis	2,5 kg/m³
Teor de sulfatos	8,9 kg/m³

27

CASO DE ESTUDO- ANALISE DE VIDA UTIL 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.

28

"MODELOS" DE VIDA ÚTIL → Carbonatação
INCLUIR os modelos estudados no Parecer (listar em ordem cronológica)

Modelos de VUP	Concreto A	Concreto B
TUUTTI (1982)	50	92
BOB e BOB (1991)	86	109
MORINAGA (1990)	59	77
HELENE (1997)	40	65
POSSAN (2010)	243	344
CEB (1997)	146	181
EHE (2008)	209	265

29

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

30

Vida Útil → Fatores Intervenientes multiplicar a VUP ou RSL

ISO 15686	fatores intervenientes	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/m³) 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

31

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

32

Muito Obrigado !

Prof. Paulo Helene

PhD Engenharia
www.phd.eng.br