



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 : <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 |
|--|--|--|
| 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 |

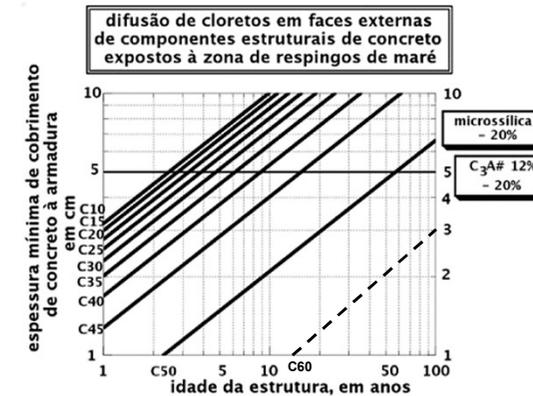
16

Modelos de previsão de vida útil Difusão de cloretos

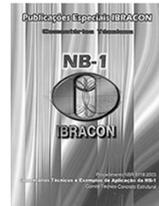
- base enfoque determinista (média 50%) → **ábaco IBRACON Helene**
- base enfoque probabilista (10%) → **EN DURACON**
- base enfoque determinista (média 50%) → **ACI LIFE 365**

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
PPI 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% Sílica 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% Sílica 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% Sílica 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% Sílica 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% Sílica 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% Sílica 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:

IBRAÇON
EDIFICANDO IDEIAS E CONCRETANDO VALORES

32