



IBRACON

ESPECIALIZACION Y MAESTRIA
EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
SISMORRESISTENTE

UTN
FRM

Patología y Terapéutica de Estructuras de Hormigón Armado

Dr. Ing. N. Graciela Maldonado
Dr. Ing. Paulo Helene

2007
Mendoza
Argentina



IBRACON

ESPECIALIZACION Y MAESTRIA EN
INGENIERIA ESTRUCTURAL
SISMORRESISTENTE

UTN
FRM

Introdução da Vida Útil no Projeto das Estruturas de Concreto

Dr. Ing. Paulo Helene
Diretor Presidente do IBRACON
Prof. Titular da Universidade de São Paulo
Coordenador Internacional da Rede REHABILITAR CYTED
fib (CEB-FIP) member of Model Code for Service Life





Aduelas prefabricadas
 $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$

média de 54 MPa em corpos-de-prova cilíndricos (62MPa)

Vida Útil 100 anos!



José Carlos de Figueiredo Ferraz

Lina Bo Bardi

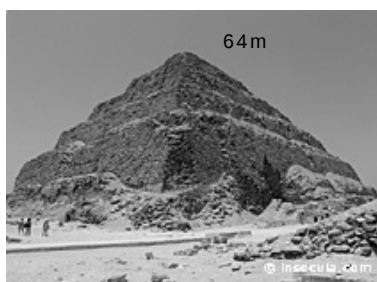
MASP Museu de Arte São Paulo 1968
 $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ Vida útil de 20 anos!



**QUANDO FOI
RECONHECIDA A
PROFISSÃO DE
ARQUITETO e
ENGENHEIRO CIVIL POR
PRIMEIRA VEZ ?**

Arquiteto e médico Imhotep

2790 A C



Pirâmide escalonada de Djeser

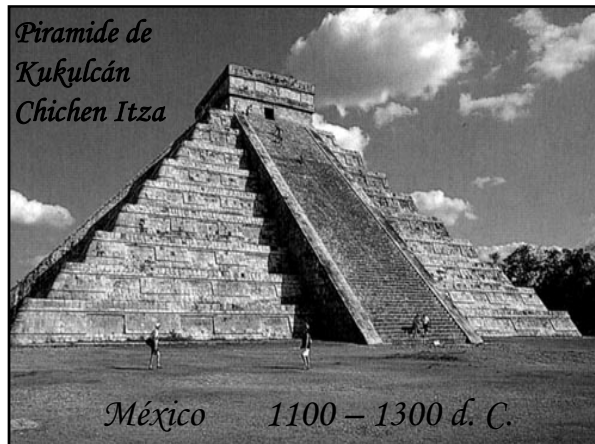
Pirâmide de Queóps

146 m



Egito

2580 A.C.



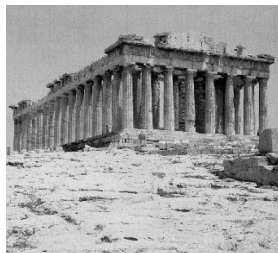
Construir com Materiais Resistentes e Duráveis

**O CONCEITO DE CONSTRUIR COM
DURABILIDADE EXISTE NAS OBRAS
DESDE A ANTIGUIDADE**

Arquitetos Ictinos de Mileto
e Calícrates (escultor Fídias)



Pártenon, 440 aC
“século de Péricles”

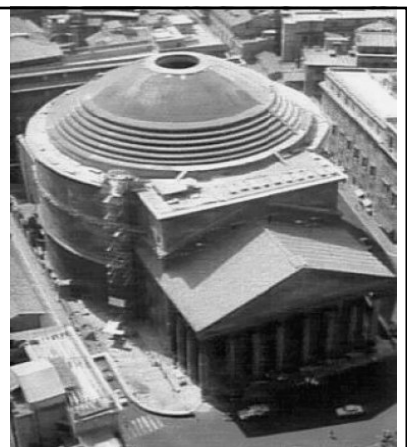


Cartagena de Indias



**QUANDO APARECEU
O CONCRETO
POR PRIMEIRA VEZ
NA HISTÓRIA?**

Panteão
de
Roma



Cúpula do Panteão
Século II dC → Diâmetro de 47m



Séculos

IV → Estilo Bizantino → Catedral Santa Sophia, Istambul

IX → Estilo Romanico → Abadia Cluny, France

XII-XIV → Estilo Gótico → Catedral Notre Dame, Colônia

XV → Estilo Renacentista

XVII → Estilo Barroco → Catedral San Pedro, Bernini

XVII → Estilo Neoclasico → Arco del Triunfo, Paris

XIX → Estruturas metálicas

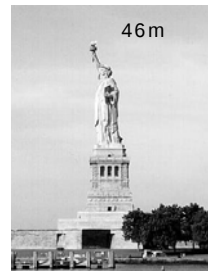
Catedral de Notre Dame



1163-1330

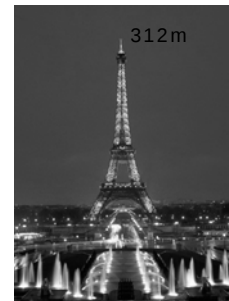
Abóbada da nave central → 35 m de altura

“Gustave Eiffel”
1884 → Estatua da Liberdade
1889 → Torre Eiffel



46m

(5a+2a)
60t
pintura



312m

2004 → 6.230.050 visitantes

SÉCULO XX
1900

APARECE UM
NOVO MATERIAL

Concreto Armado

Primeiras Normas sobre Estruturas de Concreto

1903 ⇨ Suíça

1903 ⇨ Alemanha

1906 ⇨ França

1907 ⇨ Inglaterra



Palacio Salvo
Montevideú

27 pavimentos

Uruguay 1925

Altura 103m

$f_{ck} = ?$
80 anos!!!!
record mundial



1929



Edifício Martinelli
São Paulo

30 pavimentos

Altura 109m

Rua Líbero Badaró

$f_{ck} = 13,5 \text{ MPa}$

1929-2006 = 77 anos

Naquela época acreditava-se que...

**Os PROBLEMAS de CORROSÃO e
de DURABILIDADE estavam
resolvidos definitivamente
pois o aço seria protegido
“ETERNAMENTE”
pela “rocha” concreto**

**National Association of Cement Users
Philadelphia, USA, Feb.1910**

**STANDARD BUILDING
REGULATIONS for the USE
of REINFORCED CONCRETE**

“the main reinforcement in column shall be protect by a minimum of two inches (> 5cm) of concrete cover, reinforcement in girders and beams by one and one-half inches (>3,8cm) and floor slabs by one inch (>2,5 cm).”

**Associação Brasileira de Concreto
São Paulo, Brasil. Jul. 1931**

**REGULAMENTO para
as CONSTRUÇÕES em CONCRETO ARMADO**

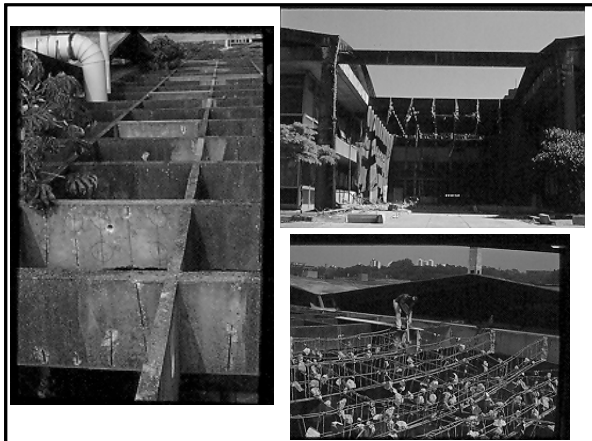
- ✓ Pilares → **1,5cm!**
- ✓ Vigas → 1,5cm
- ✓ Lajes → 1,0cm

Infelizmente a história demonstrou que essa expectativa não é verdadeira



O deterioro precoce da armadura se apresenta frequentemente devido à elevada instabilidade do aço frente a ambientes agressivos

A consciência de que há problemas de durabilidade por perda PRECOCE da Vida Útil das Estruturas de Concreto só aconteceu na DÉCADA de 90!!!!



Os conceitos e critérios indiretos e insuficientes de durabilidade constantes das primeiras normas sobre Estruturas de Concreto vigoraram até

**DÉCADA de 90!!
ou até
HOJE, 2006??**

No Brasil o conceito de Vida Útil só foi introduzido TIMIDAMENTE no texto da NBR 6118 (NB1) de 2003, obrigatório somente a partir de abril de 2004!!!

VIDA ÚTIL

Período de tempo durante o qual a estrutura mantém certas características mínimas de segurança, estética, estabilidade e funcionalidade, sem necessidade de intervenção não prevista



Vida Útil Norma Técnica T 175/1 COPASA

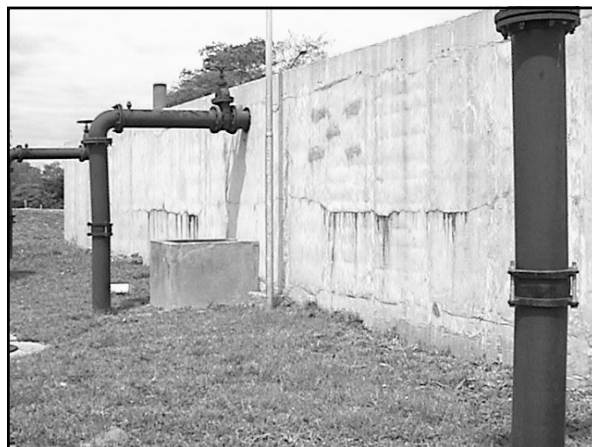
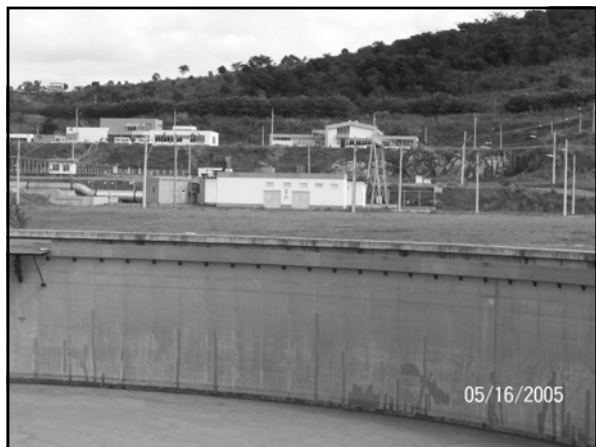
3.21 Vida útil

Período de tempo depois da construção durante o qual todas as propriedades essenciais alcançam ou superam o valor mínimo aceitável, com uma manutenção rotineira.

Os parâmetros que limitam a vida útil podem ser técnicos, funcionais ou econômicos.

3.22 Vida útil residual

Tempo de vida, contando a partir da inspeção, de acordo com uma previsão de vida útil.





Durabilidade Norma Técnica T 175/1 COPASA

3.8 Durabilidade

Capacidade de uma estrutura, componente, produto ou construção de manter sua aptidão funcional para aquilo que haja sido projetada ou construída, durante um tempo mínimo especificado. Segundo este conceito, as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

BS 7543, 1992 Guide to

Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components

Vida Útil	Tipo de estrutura
< 10 anos	temporárias
> 10 anos	substituíveis
>30 anos	ed.industriais e reformas
> 60 anos	ref. públicas e ed. novos
>120 anos	obras públicas e edifícios

Qual é o Problema?

Atende ou não à norma?



ELU – Estado Limite Último

(NBR 6118 itens 3.2.1)

Estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura.

ELU – Estado Limite Último

(NBR 6118 itens 10.3/16.2.3)

Deve ser verificado:

- Perda de equilíbrio da estrutura admitida como corpo rígido;
- Ruptura dos elementos estruturais.

ELS – Estado limite de Serviço (NBR 6118 item 10.4)

Estados limites de serviço são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados.

ELS – Estado limite de Serviço

1. **serviceability limit state of crack formation (SLS-F)** (see 13.4.2 and 17.3.4).
2. **serviceability limit state of crack opening (SLS-W)** maximum specified in 13.4.2 (see 17.3.3).
3. **serviceability limit state of excessive deflection (SLS-DEF)**: the limits defined for normal use as in 13.3 (see 17.3.2).
4. **serviceability limit state of decompression (SLS-D)** (see 13.4.2).
5. **serviceability limit state of partial decompression (SLS-PD)**(see table 13.3)
6. **serviceability limit state of excessive compression (SLS-EC)**(see 17.2.4.3.2.a).
7. **serviceability limit state of excessive vibrations (SLS-EV)**

ELS – Estado limite de Serviço (NBR 6118 itens 10.4/16.2.4)

Devem ser verificados:

- Deformações excessivas (item 13.3); (1/250 a 1/750)
- Fissuração (item 13.4); w_k (0,4mm; 0,2mm)
- Vibração excessiva;
- Outros ????????

“Por que é necessário introduzir o conceito correto de Vida Útil?”

NORMA NBR 6118/2003

TABELA 1: Classes de agressividade ambiental.

Classe de Agressividade	Agressividade	Risco de Deterioração da Estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

NORMA NBR 6118/2003

TABELA 2: Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição.

macro-clima	micro-clima			
	interior das edificações		exterior das edificações	
	seco	úmido	seco	úmido
rural	I	I	I	II
urbana	I	II	I	II
marinha	II	III	-	III
industrial	II	III	II	III
específico	II	III ou IV	III	III ou IV
respingo de maré	-	-	-	IV
submersa $\geq 3m$	-	-	-	I
solo	-	-	I	II, III, IV

critérios • qualidade do concreto

Concreto	Classe de agressividade (ver tabela 11)				
	Tipo	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	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS

1 CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado

2 CP Componentes e elementos estruturais de concreto

protendido

critérios • cobrimento

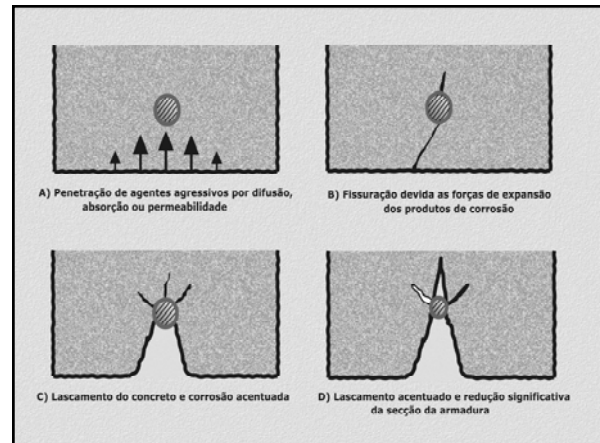
Cobrim. mm	Componente ou elemento	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
concreto armado	LAJAS	20	25	30	35
	VIGAS E PILAS	25	30	35	40
concreto protendido ¹	Todos	30	35	45	55

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 esaltíficos, e outros tantos, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelo item 10.4.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

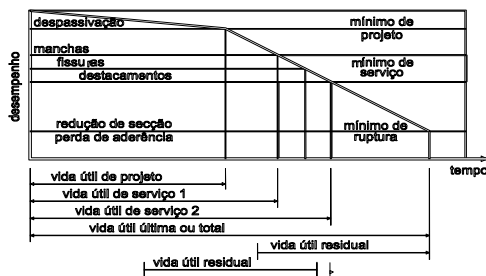
³ As faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canalistas de efluentes e outras obras em ambientes químicos intensamente agressivos devem ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

“Como deveria
ser definida
a vida útil?”



comentários

Vida Útil



Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno de corrosão das armaduras

“Como podem
ser mais
Duráveis?”

Durabilidade das Estruturas de Concreto

1. Envelhecimento
2. Vida Útil
3. Classificar Meio Ambiente
4. Classificar o Concreto
5. Modelos de Previsão
6. Critérios de Projeto
7. Proporcionamento dos Materiais
8. Procedimentos de Execução
9. Manutenção Preventiva



ENVELHECIMENTO

- Carbonatação
- Cloretos
- Fuligem
- Fungos
- Lixiviação
- Retração
- Sulfatos
- Alkali-agregado

- << pH
- Corrosão
- Fissuração
- Destacamento

diretrizes

mecanismos de envelhecimento

Relativos ao concreto:

- lixiviação
- expansão
- intemperismo

Relativos à armadura:

- carbonatação
- cloretos

diretrizes

mecanismos de envelhecimento

Relativos à estrutura:

regra dos 4C

- Compactação ou adensamento
- Cura efetiva
- Composição ou traço do concreto
- Cobrimento

critérios

estrutura

- a) prever drenagem eficiente;
- b) evitar formas arquitetônicas e estruturais inadequadas;
- c) garantir concreto de qualidade apropriada, particularmente nas regiões superficiais dos elementos estruturais;
- d) garantir cobrimentos de concreto apropriados para proteção às armaduras;
- e) detalhar adequadamente as armaduras;
- f) controlar fissuração das peças;
- g) prever espessuras de sacrifício ou revestimentos protetores em regiões sob condições de exposição ambiental muito agressivas; e
- h) definir um plano de inspeção e manutenção preventiva.

MODELOS de PREVISÃO de VIDA ÚTIL

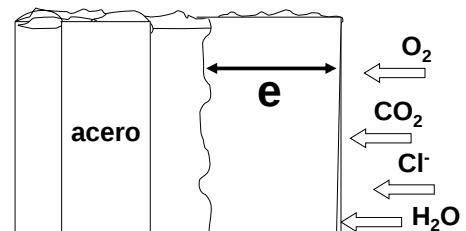
- Experiência
- Ensaios Acelerados
- Mecanismos de Transporte
- Estocásticos

Ingresso de gases e fluidos

- Permeabilidade
- Capilaridade
- Difusibilidade
- Migración
- Convección

Generalização

$$e = k \cdot \sqrt{t} \quad (\text{cm})$$



Carbonatação

$$t = \frac{e_{\text{CO}_2}^2}{k_{\text{CO}_2}^2} \quad (\text{año})$$

- $e_{\text{CO}_2} \rightarrow 1 \text{ a } 5 \text{ cm}$
- $k_{\text{CO}_2} \rightarrow 0.1 \text{ a } 1.0 \text{ cm/año}^{1/2}$

Carbonatação

$$e = 2,0 \text{ cm}$$

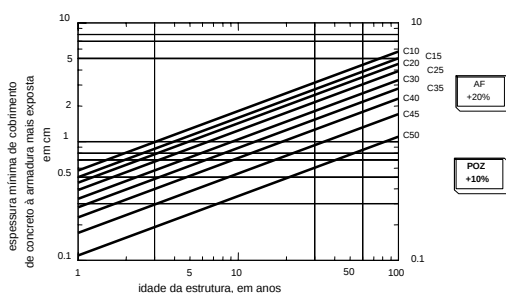
$$f_{\text{ck}} = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 8 \text{ años}$$

$$f_{\text{ck}} = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 350 \text{ años}$$

$$f_{\text{ck}} = 25 \text{ MPa} \rightarrow t = 38 \text{ años}$$

Carbonatação em faces externas dos componentes estruturais de concreto expostos à intempérie

referência



Cloretos - difusão

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

$$c_{\text{Cl}} \rightarrow 1 \text{ a } 5 \text{ cm}$$

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

Dimensionamento
Vida Útil
ambiente de agressividade forte grau IV

35 MPa

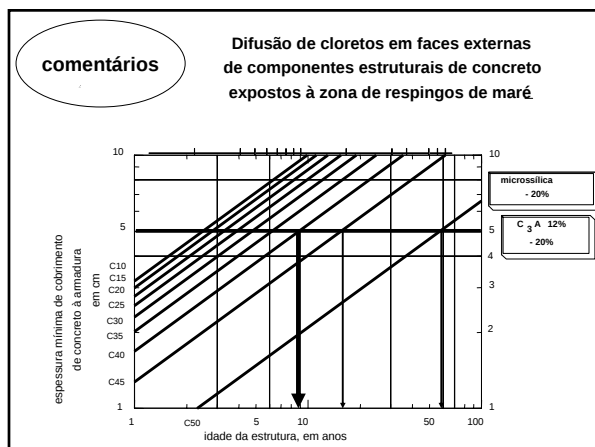
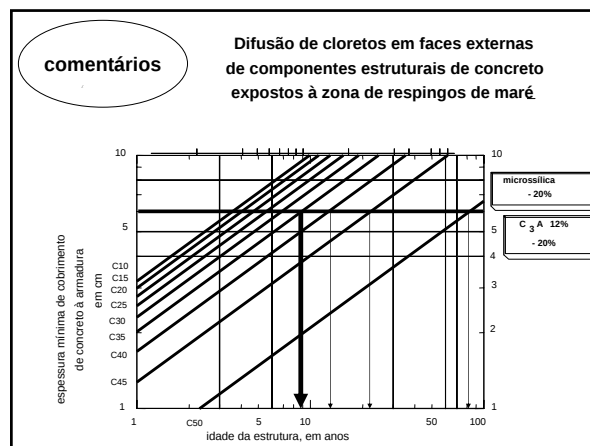
6 cm

ACI 318

40 MPa

5 cm

NBR 6118

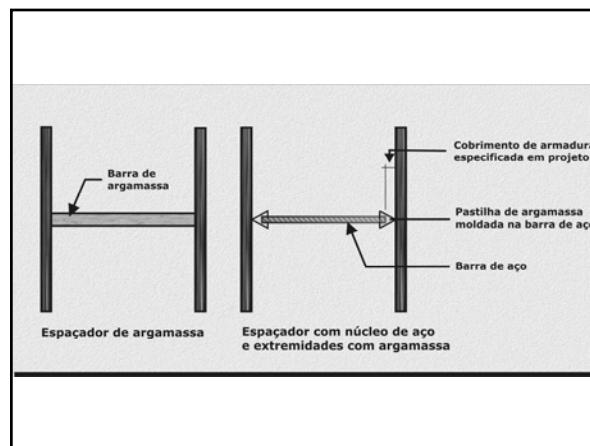


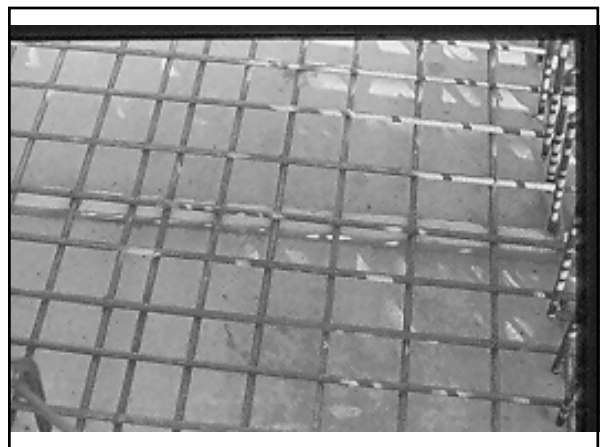
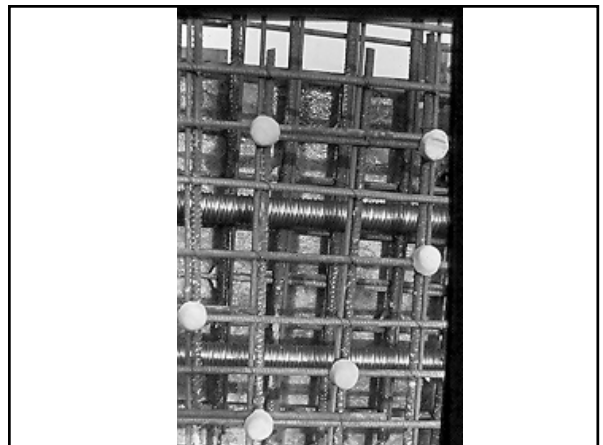
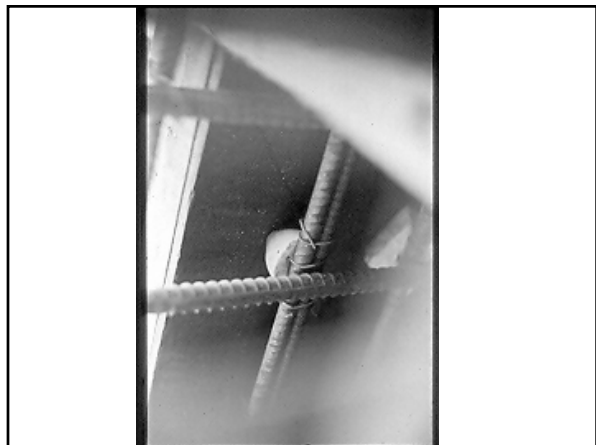
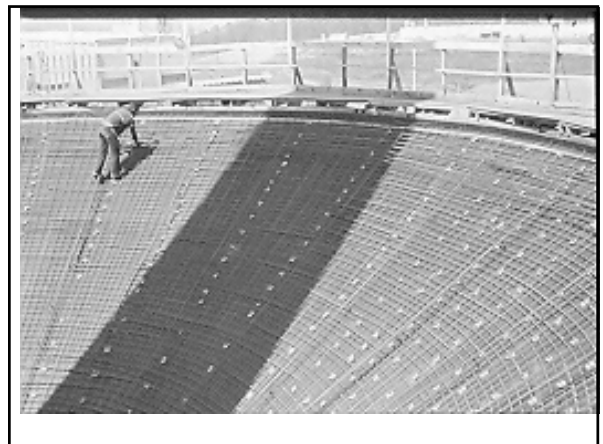
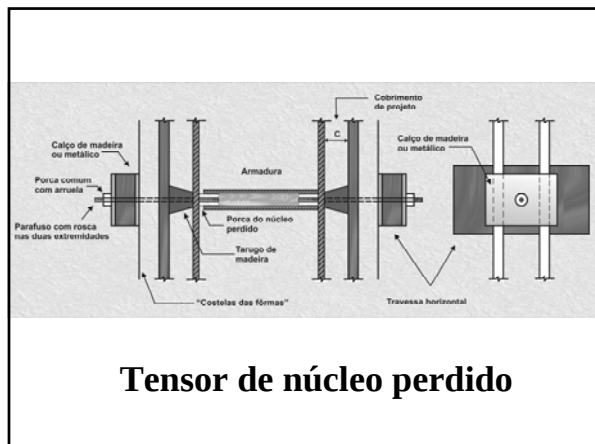
diretrizes

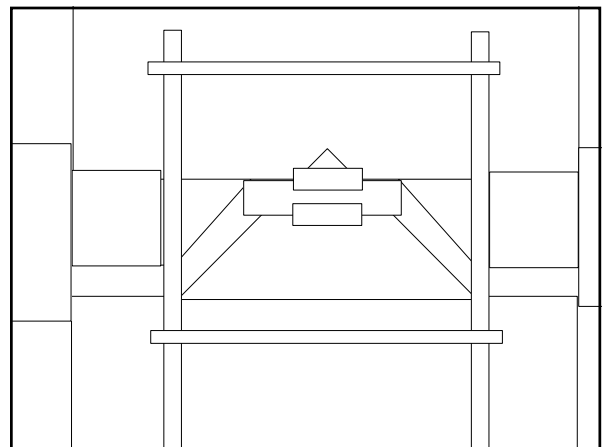
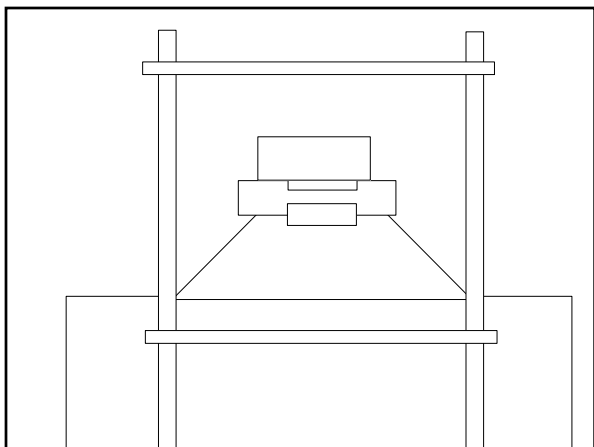
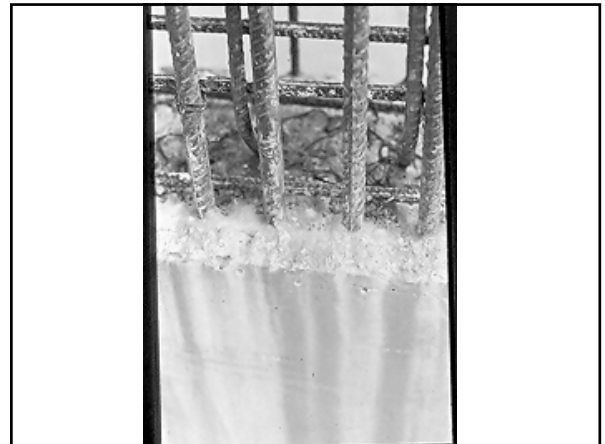
mecanismos de envelhecimento

Relativos à estrutura hidráulica:

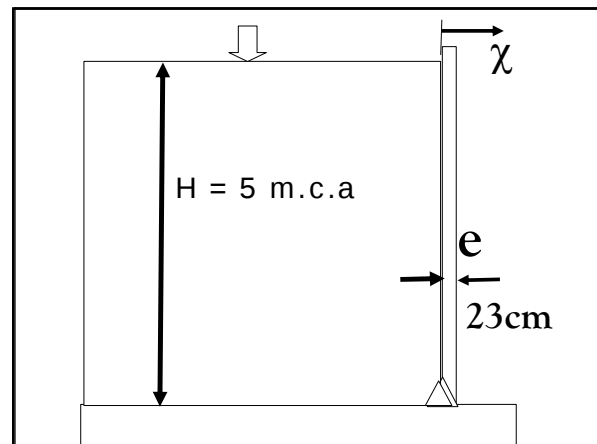
ESTANQUEIDADE!







Permeabilidade ou Estanqueidade?



Lei de Darcy
permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$V = \frac{Q}{S} = k \cdot \frac{H}{x}$$

$V \rightarrow$ velocidade de percolação de água em cm/s

$Q \rightarrow$ vazão de água em cm³/s

$S \rightarrow$ área da superfície confinada por onde percola a água em cm²

$H \rightarrow$ pressão da água de contacto em cm.c.a

$x \rightarrow$ espessura de concreto percolada pela água em cm

$k \rightarrow$ coeficiente de permeabilidade do concreto em cm/s

Lei de Darcy
permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$V = \frac{Q}{S} = k \cdot \frac{H}{x} \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{k \cdot H}{x}$$

$$\Rightarrow x dx = H \cdot k \cdot dt$$

$$\Rightarrow \int_0^e x dx = \int_0^t H \cdot k \cdot dt$$

$$\Rightarrow t = \frac{e^2}{2 \cdot H \cdot k}$$

Concreto

(lei de Darcy) permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$f_{ck} = 20 \text{ MPa} \Rightarrow \frac{a}{c} = 0,75 \Rightarrow k = 10^{-7} \text{ cm/s}$$

$$f_{ck} = 40 \text{ MPa} \Rightarrow \frac{a}{c} = 0,45 \Rightarrow k = 10^{-10} \text{ cm/s}$$

$$f_{ck} = 60 \text{ MPa} \Rightarrow \frac{a}{c} = 0,35 \Rightarrow k = 10^{-13} \text{ cm/s}$$

Concreto

(lei de Darcy) permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$t = \frac{e^2}{2 \cdot H \cdot k}$$

$H \rightarrow 500 \text{ cm.c.a}$

$e \rightarrow 23 \text{ cm}$

$k \rightarrow 10^{-7} ; 10^{-10} ; 10^{-13} \text{ cm/s}$

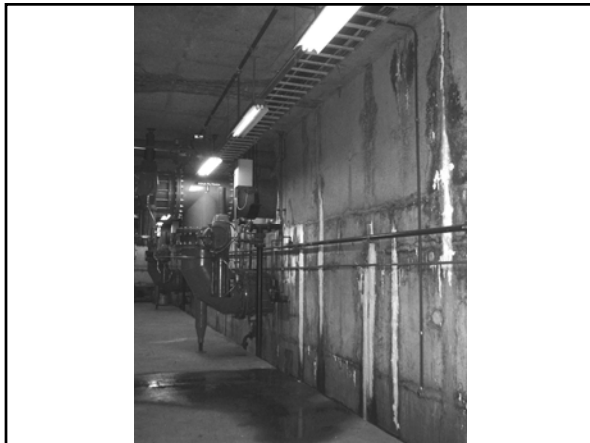
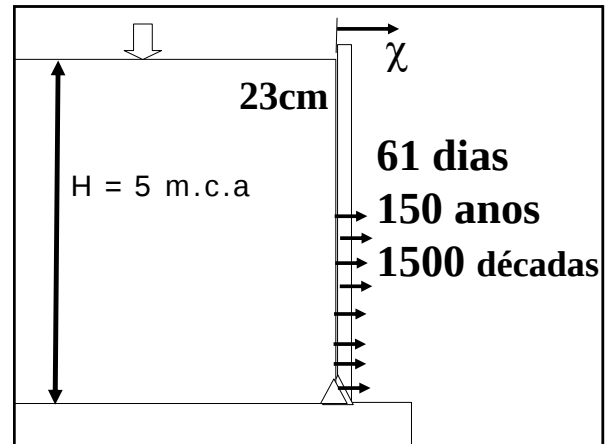
Concreto

(lei de Darcy) permeabilidade
(gradiente de pressão)

$f_{ck} = 20\text{MPa} \rightarrow t = 61 \text{ dias}$

$f_{ck} = 40\text{MPa} \rightarrow t = 150 \text{ anos}$

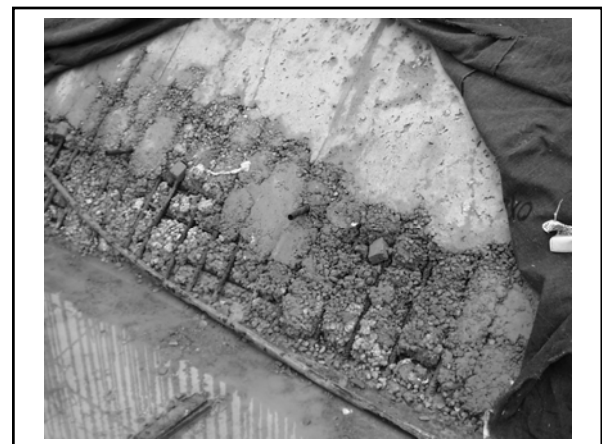
$f_{ck} = 60\text{MPa} \rightarrow t = 1500 \text{ décadas}$



CONCRETO é
“impermeável”

difícil $\rightarrow$ estanqueidade

pois depende 20% do
projetista e 80% da
CONSTRUTORA



CONCLUINDO
projetar e construir obras
duráveis é:

- contribuir para a valorização profissional
- defender os reduzidos recursos de nossos países

