



Estruturas de Concreto

Tecnologia de materiais para Proteção e Impermeabilização

Conteúdo

Princípios de ciência do material

Solicitações em serviço

Patologia das estruturas de concreto

Análise do comportamento das estruturas e suas implicações para a manutenção

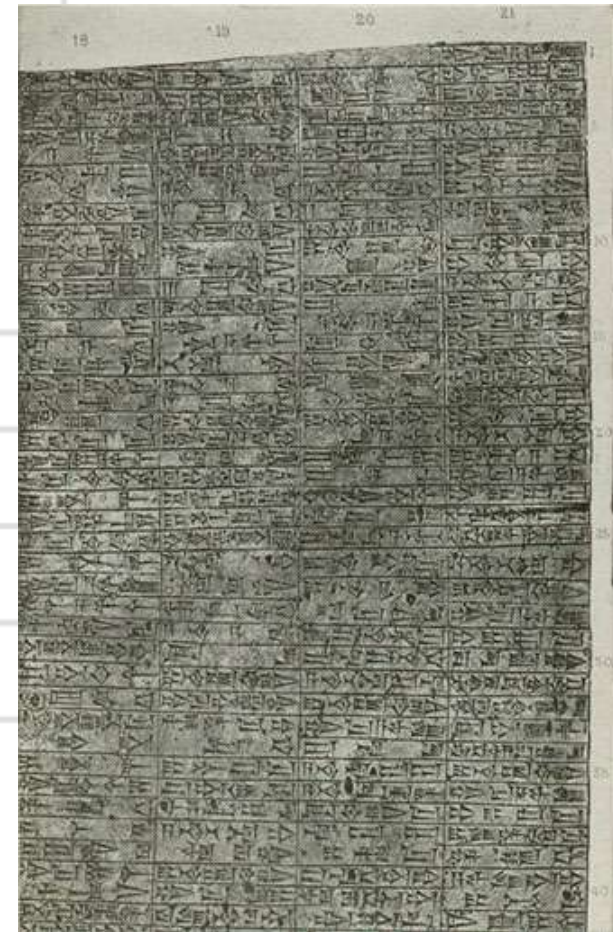
Conceitos gerais de recuperação estrutural

Tecnologia dos materiais de proteção e impermeabilização

Casos de obras



Lex Talionis
Lei do Talião



Desempenho

Durabilidade

Princípios de ciência do material

Natureza

Composição química e arranjo microestrutural

Dinâmica de formação

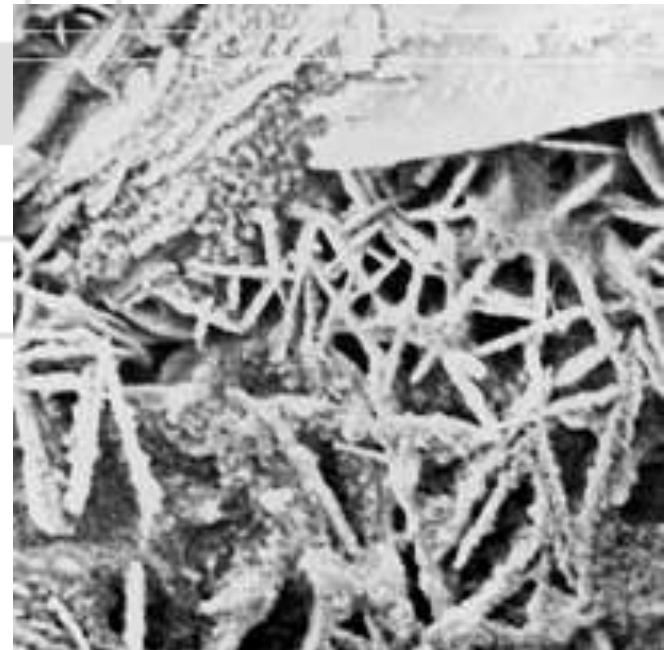
Características

Matriz

Zona de transição

Agregado

Propriedades



Histórico do concreto

Inglaterra

Ano de 1824

Joseph Aspdin

Cimento Portland

França

Ano de 1849

Monier

Concreto Armado

França

Ano de 1920

Eugène Freyssinet

Concreto Protendido

Componentes

Aglomerante

Agregado Miúdo

Aditivos

Redutores de água

Incorporadores de ar

Redutores de permeabilidade

Adições

Poliméricas

Minerais

Água

Agregado Graúdo

ACI Committee 212
*Report on Chemical
Admixtures for Concrete*
ACI 212.3 R10

Propriedades

Estado Fresco

Trabalhabilidade

Consistência

Estado Endurecido

Resistências Mecânicas

Compressão

Tração

Abrasão

Propriedades Físicas / Físico-químicas / Eletroquímicas

Retração / Expansão

Resistividade elétrica

Resistência às Intempéries e aos Agentes Agressivos

Permeabilidade

Tipos

Massa

Estrutural

Armado

Protendido

Projetado

Reforçado com Fibras de Aço, Vidro,
Polipropileno

Pré-fabricado

Compactado com Rolo (CCR)

Celular

Grautes e Microconcretos

Obras de Referência

Ponte de Herval - Emílio Henrique Baumgart / 1930



Obras de Referência

Edifício E-Tower / 2005



Consumo Mundial de Concreto

Consumo Mundial de Concreto

Ano de 1964

3 bilhões ton

Ano de 1994

5,5 bilhões ton

Ano de 2006

7 bilhões ton

Produção Mundial de Cimento Portland

Ano de 2006

1,6 bilhão ton

O cimento é o segundo
recurso mais
consumido pelo
homem

O primeiro é a água

Brasil - 2006

Cimento Portland

42 mi ton

Concreto

50 mi m³

Água

Água Capilar

> 50 nm → Livre

5 a 50 nm → Causa pequena tensão

Água Adsorvida

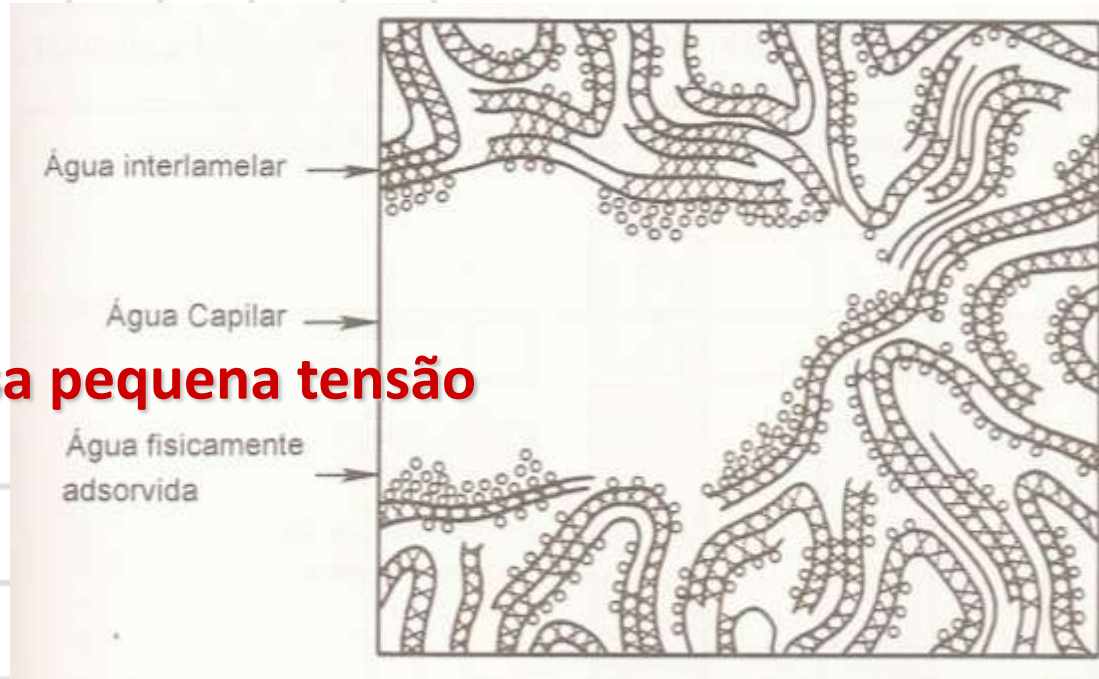
1,5 nm

Água interlamelar

Camada monomolecular entre camadas de CSH

Água quimicamente combinada

Compõe a estrutura dos produtos hidratados do cimento

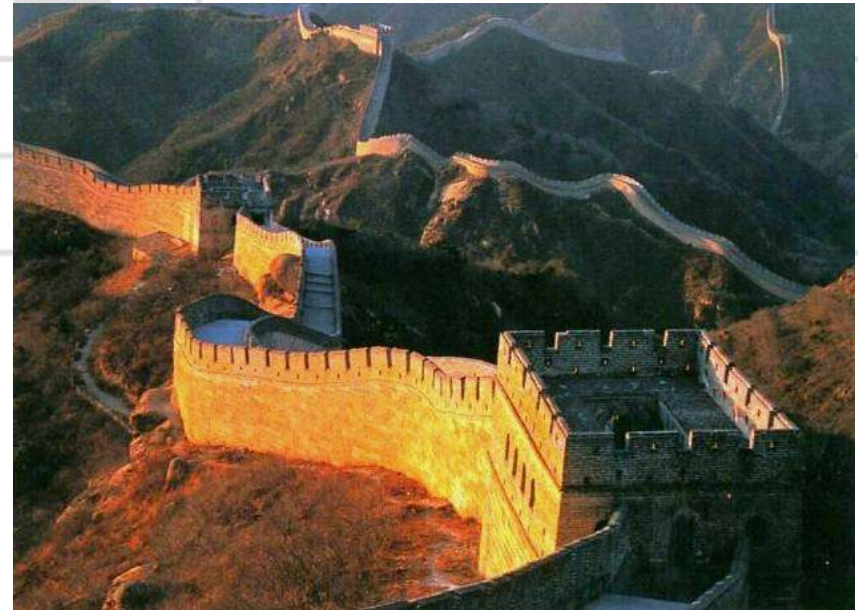


Durabilidade

Reduzir de modo significativo o fluxo de água

Impermeabilizar

Proteger



Aglomerante

Cimento Portland

Tipos

NBR 5732	CP I	CPI-S
NBR 11578	CP II-E CP II-F CP II-Z	
NBR 5735	CP III	
NBR 5736	CP IV	
NBR 5733	CP V-ARI	
NBR 12989	CPB Estrutural e Não-estrutural	

Classes

25

32

40

Norma Brasileira

NBR 5737

RS - Resistente a Sulfatos

BC - Baixo Calor de Hidratação

Aglomerante

Cimento Portland - Composição Química

Compostos Principais

Fórmula simplificada	Abr.	Denominação	%
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	Silicato Tricálcico	55-60
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	Silicato Dicálcico ($\beta \text{C}_2\text{S}$)	15-10
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminato Tricálcico	10-12
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Ferroaluminato Tetracálcico	8 - 7

Outros Compostos

$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$	Sulfo-aluminato Tetracálcico	<12
$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$		
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2		

Aglomerante

Cimento Portland - Avaliação Química

Análise Química	Fórm. Quím	Identificação do cimento (% em massa)					Limites NBR 11578 (ABNT) 1991
		CI 1	CI 2	CI 3	CI 4	CI 5	
Perda ao Fogo (PF)	---	5,38	5,44	6,19	5,31	6,19	≤ 6,5
Dióxido de Silício	SiO ₂	18,93	17,25	18,00	18,43	17,03	----
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	4,25	4,27	4,29	4,23	4,07	----
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	2,81	3,81	2,13	2,39	2,95	----
Óxido de Cálcio	CaO	63,18	57,68	60,18	60,63	61,35	----
Óxido de Magnésio	MgO	1,20	6,11	4,31	4,46	4,15	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre	SO ₃	2,31	2,54	2,95	2,94	2,76	≤ 4,0
Óxido de Cal Livre	CaO	2,73	1,94	1,84	2,00	2,23	----
Dióxido de Carbono	CO ₂	4,23	4,08	4,23	3,98	5,40	----
Resíduo Insolúvel (RI)	---	0,91	0,89	0,36	1,51	0,70	≤ 2,5

Aglomerante

Cimento Portland - Cálculo de Bogue da Composição Potencial

Composto	Símbolo	Cálculo de Bogue (%)				
		CI 1	CI 2	CI 3	CI 4	CI 5
Silicato tricálcico	C_3S	41,2	33,3	38,6	37,8	43,9
β -silicato dicálcico	C_2S	23,2	24,3	22,5	24,3	15,7
Aluminato tricálcico	C_3A	6,5	4,9	7,8	7,2	5,8
Ferroaluminato tetracálcico	C_4AF	8,6	11,6	6,5	7,3	9,0
Sulfato de cálcio ou Gipsita	$C\bar{S}$	3,9	4,3	5,0	5,0	4,7
Óxido de cal livre	CaO_{livre}	2,7	1,9	1,8	2,0	2,2
Óxido de magnésio	MgO	1,2	6,1	4,3	4,5	4,2
Fíler calcário	---	11,3	10,9	11,3	10,6	14,4
TOTAL		98,6	97,3	97,8	98,7	99,9

Aglomerante

Características do Cimento Portland

Composição Química

Reatividade dos Compostos

Estruturas cristalinas

Impurezas: Mg Na K S

Finura

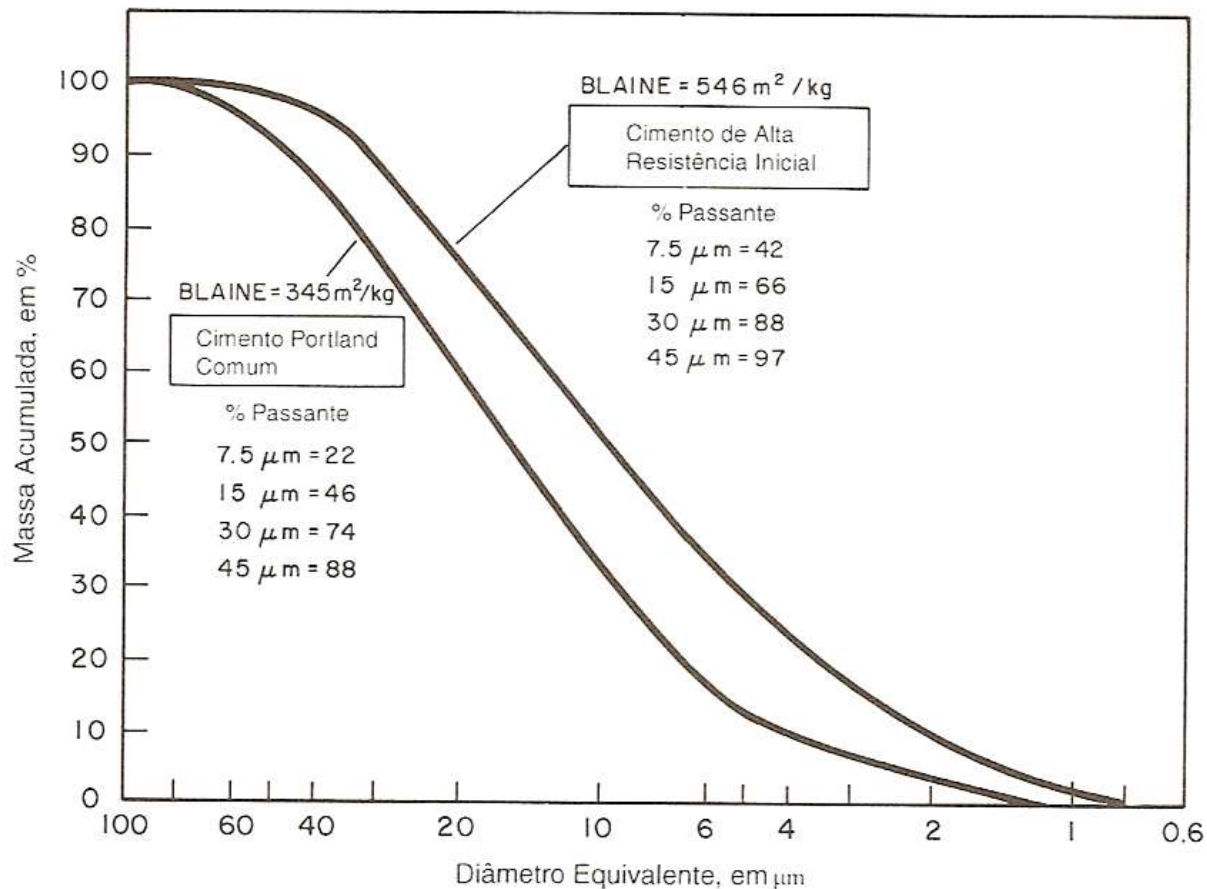
Malha # 200 - 75 μm

Malha # 375 - 5 μm

Área Específica

Aglomerante

Características do Cimento Portland



Aglomerante

Hidratação do Cimento Portland

Importância

“A química do concreto é essencialmente a química da reação entre o cimento Portland e a água... Em qualquer reação química os principais pontos de interesse são as transformações da matéria, as variações de energia e a velocidade da reação...”

Brunauer e Copeland

Aglomerante

Hidratação do Cimento Portland

Mecanismos

Dissolução-precipitação

Topoquímico ou hidratação no estado sólido

Produtos da Hidratação

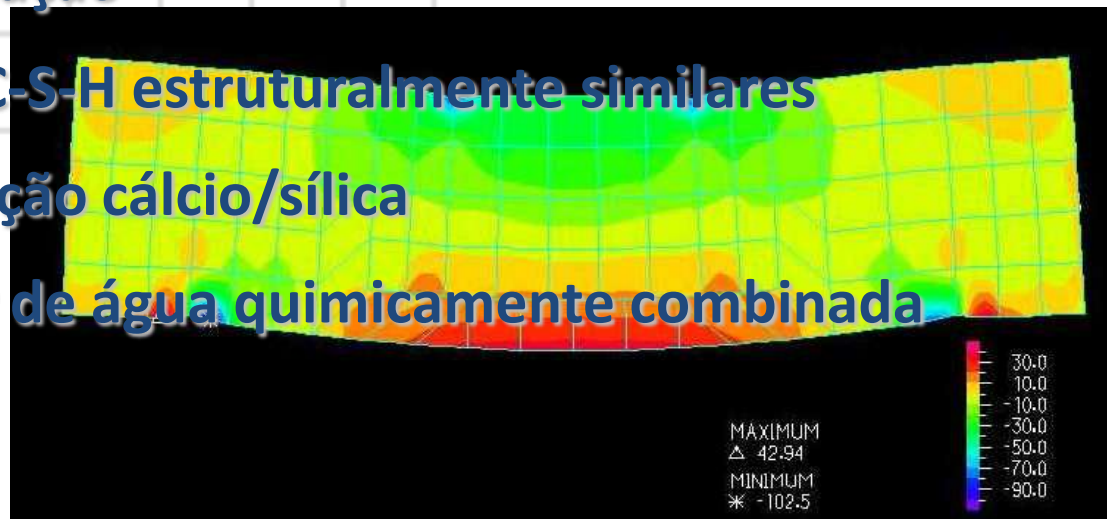
Família de C-S-H estruturalmente similares

Relação cálcio/sílica

Teor de água quimicamente combinada

C-S-H

Resistência
Mecânica



Agregados

Características e Propriedades

Granulometria

Miúdo

$d < 4,8 \text{ mm}$

75 μm a 4,8 mm

Graúdo

$d > 4,8 \text{ mm}$

4,8 mm a 50 mm (150 mm)

Composição Mineralógica

Massa Específica

Massa Unitária

Naturais

ou

Artificiais

Agregados

Características e Propriedades

Origem

Areia

Pedregulho

Pedra Britada

Resistência Mecânica à Compressão

Basalto - 120 a 180 MPa

Calcário - 4 MPa

Gnaise - 90 a 140 MPa

Granito - 110 a 190 MPa

Arenito - 230 MPa

Módulo de Elasticidade

Coefficiente de Poisson

Coefficiente de Dilatação Térmica Linear

$$\alpha = 4 \text{ a } 21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

Aditivos

Definição

Teores

0,2 a 1,5%

Produtos químicos formulados para melhorar ou modificar as propriedades dos concretos

Agem no estado fresco e/ou endurecido

Selecionados em função da aplicação

Redutores de água

Modificadores dos tempos de pega

Redutores de permeabilidade

Expansores

Incorporadores de ar

Estabilizadores de hidratação

Anti-segregantes



Aditivos

Identificação

Espectroscopia por Infravermelho

Transmitância (%) x Número de onda (cm^{-1})

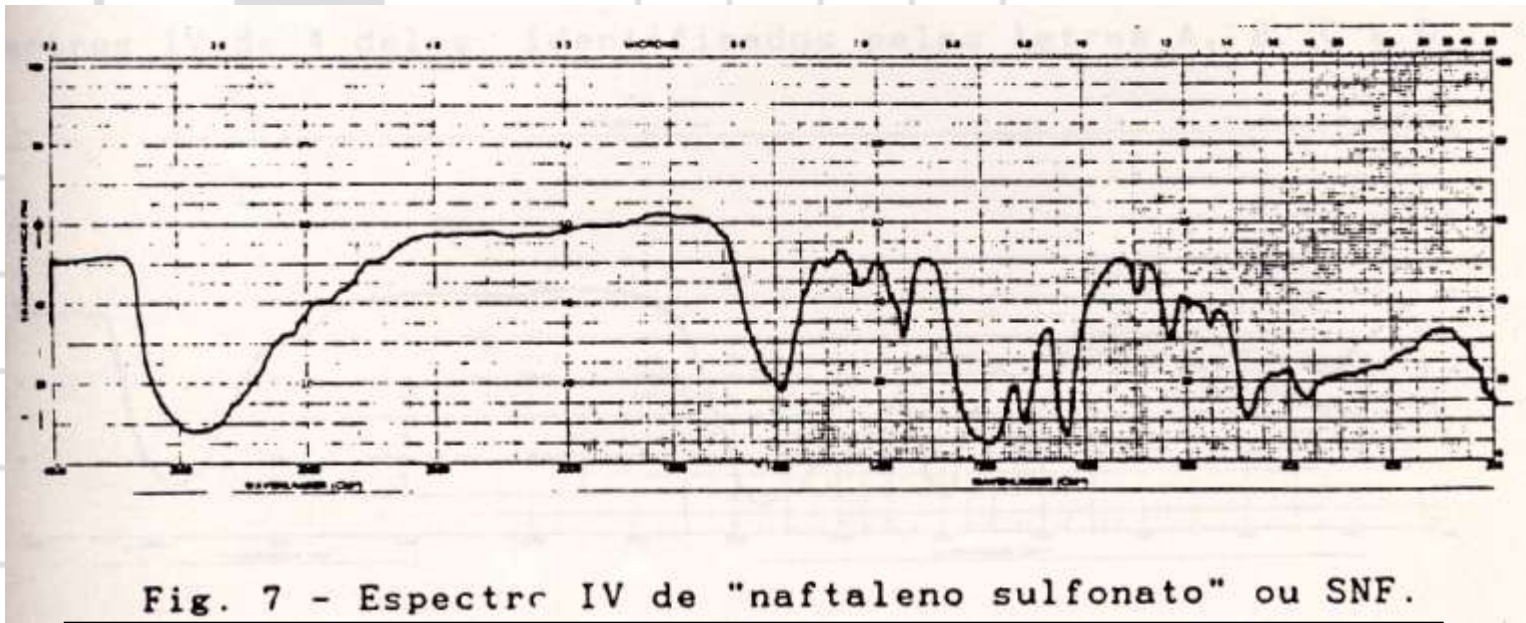
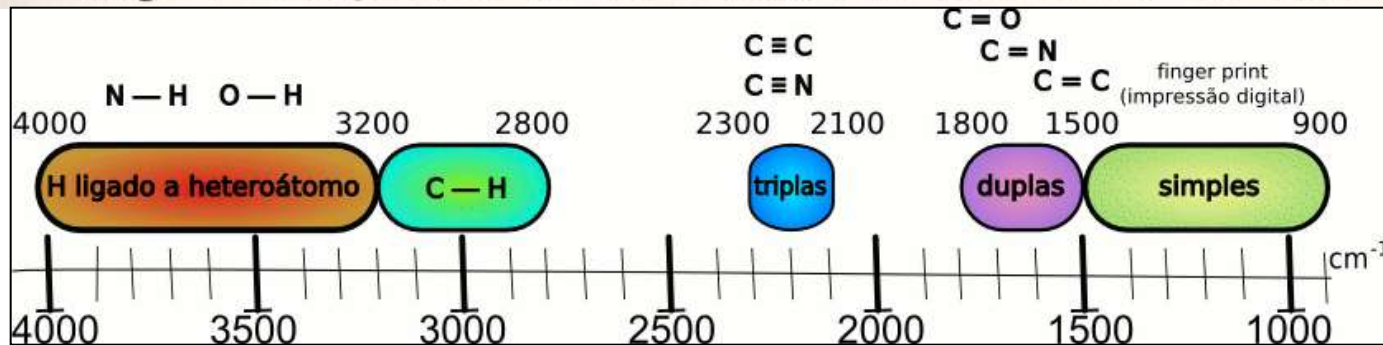


Fig. 7 - Espectro IV de "naftaleno sulfonato" ou SNF.



Adições

Definição

As adições também têm como objetivo melhorar as propriedades e características dos concretos

Agem no estado fresco e/ou endurecido

Selecionados em função da aplicação

Podem substituir parte do aglomerante quando utilizadas em proporções convenientes

Três tipos principais

Adições inorgânicas ou minerais de baixa reatividade (inertes)

Adições inorgânicas ou minerais ativas

Adições orgânicas ou poliméricas

Teores

5 a 20%

Economia

Adições

Adições minerais de baixa reatividade

Filler calcário

Adições inorgânicas ou minerais ativas

Sílica ativa - SiO_2 (> 95%)

Metacaulinita - SiO_2 (\approx 50%) + Al_2O_3 (\approx 40%)

Pozolanas de elevada reatividade

Adições orgânicas ou poliméricas

Látex polímero

Pós de polímero redispersível

Polímeros solúveis em água

Polímeros líquidos

Adições Poliméricas

1. Látex polímeros:

1.1. Látex elastoméricos;

1.1.1. Borracha natural (NR);

1.1.2. Borracha sintética:

1.1.2.1. Estireno-butadieno (SBR);

1.1.2.2. Cloropreno (CR);

1.1.2.3. Metil metacrilato-butadieno (MBR);

1.2. Látex termoplástico:

1.2.1. Poliacrílico éster (PAE);

1.2.2. Poli(acetato de vinila-etileno) (EVA);

1.2.3. Poli(éster de acrílico-estireno) (SAE);

1.2.4. Polivinila propianato (PVP);

1.2.5. Polipropileno (PP);

1.2.6. Polivinila acetato (PVAC);

1.3. Látex termoestáveis:

1.3.1. Resina epóxi (EP);

1.4. Látex betuminosos:

1.4.1. Asfalto;

1.4.2. Asfalto impregnado com borracha;

1.4.3. Parafina;

1.5. Látex misturados.

2. Pós de polímero redispersível:

2.1. Poli(acetato de vinila-etileno) (EVA);

2.2. Poli(versatato de vinila-acetato polivinila) (VAVeVa);

2.3. Poli(éster de acrílico-estireno) (SAE);

2.4. Poliacrílico éster (PAE);

3. Polímeros solúveis em água (Monômero):

3.1. Derivados de celulose:

3.1.1. Metil celulose (MC);

3.1.2. Hidróxi etil celulose (HEC);

3.2. Polivinila álcool (PVA, Poval);

3.3. Poliacrilamida;

3.4. Acrilato:

3.4.1. Acrilato de cálcio;

3.4.2. Acrilato de magnésio;

4. Polímeros líquidos:

4.1. Resina epóxi (EP);

4.2. Resina de poliéster insaturado (UP).



Concreto



Dosagem e Controle Tecnológico

Proporção, em massa ou em volume

Traço

C : A : P1 : P2 : Água : Aditivo : Adição

Propriedades Físicas e Mecânicas

Relação água/cimento

Mistura

Cura

Consumo de cimento

Lançamento

Composição química

Adensamento

Estudo de Dosagem

Ari Torres (ABCP)

ACI

Helene & Terzian (Pini / Encol)

FIB/CEB

Vitervo O Reile

Dosagem e Controle Tecnológico

Conceitos Fundamentais

Lei de Abrams

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$$

Lei de Lyse

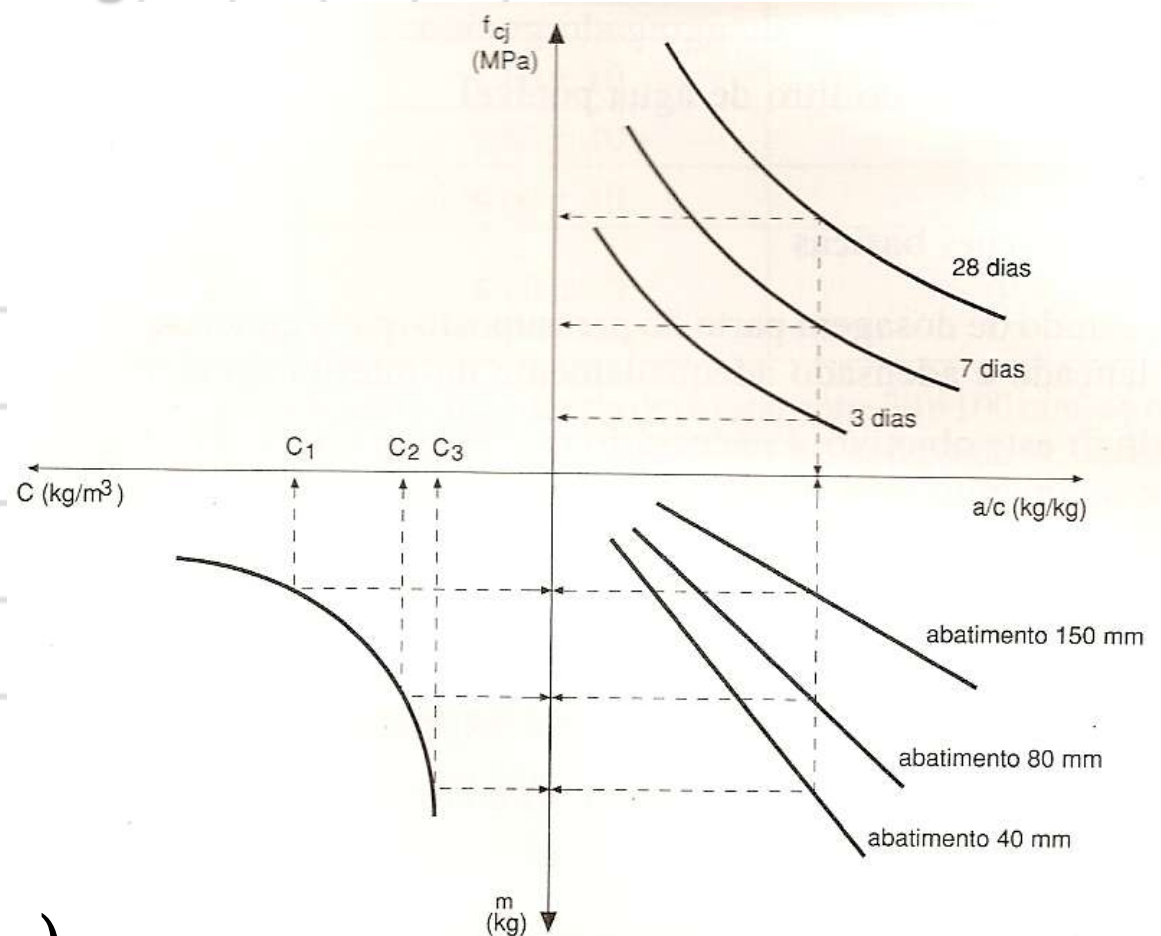
$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c$$

Lei de Molinari

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m}$$

Equações fundamentais

Teor de argamassa $\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)}$



Relação agregados secos/cimento

$$m = a + p$$

Dosagem e Controle Tecnológico

Conceitos Fundamentais

Leis Complementares

Consumo de cimento

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c}$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{1/\gamma_c + a/\gamma_a + 1/\gamma_p + a/c}$$

Custo

$$\text{Custo} = C.R_c + C.a.R_a + C.p.R_p + \dots$$

Resistência Característica de Projeto

$$f_{cdj} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_d$$

Desvio-padrão de dosagem

$$s_d = 3 \text{ a } 5,5 \text{ MPa}$$

Características e Propriedades

Controle tecnológico industrial

Tipos

CA-25

CA-50

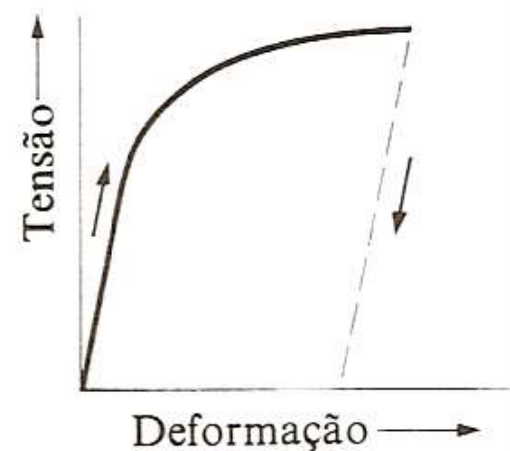
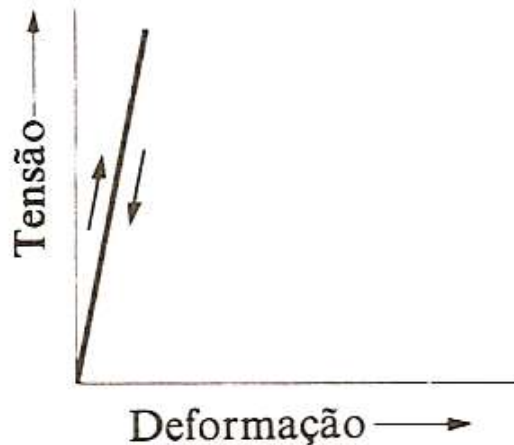
CA-60

CP-150 CP-160

Resistências mecânicas

Barras com mossas (CA)

Cordoalhas (CP)



Propriedades Mecânicas

Resistências à compressão e à tração

Elasticidade - Deformação elástica

Módulo de Elasticidade (Young) - Rigidez

Ductilidade - Deformação plástica total

Alongamento ou estrição

Fluência

Deformação ao longo do tempo de serviço

Dureza

Penetração de uma esfera ou cone

Brinell e Rocwell

Tenacidade

Energia = Força x Deslocamento

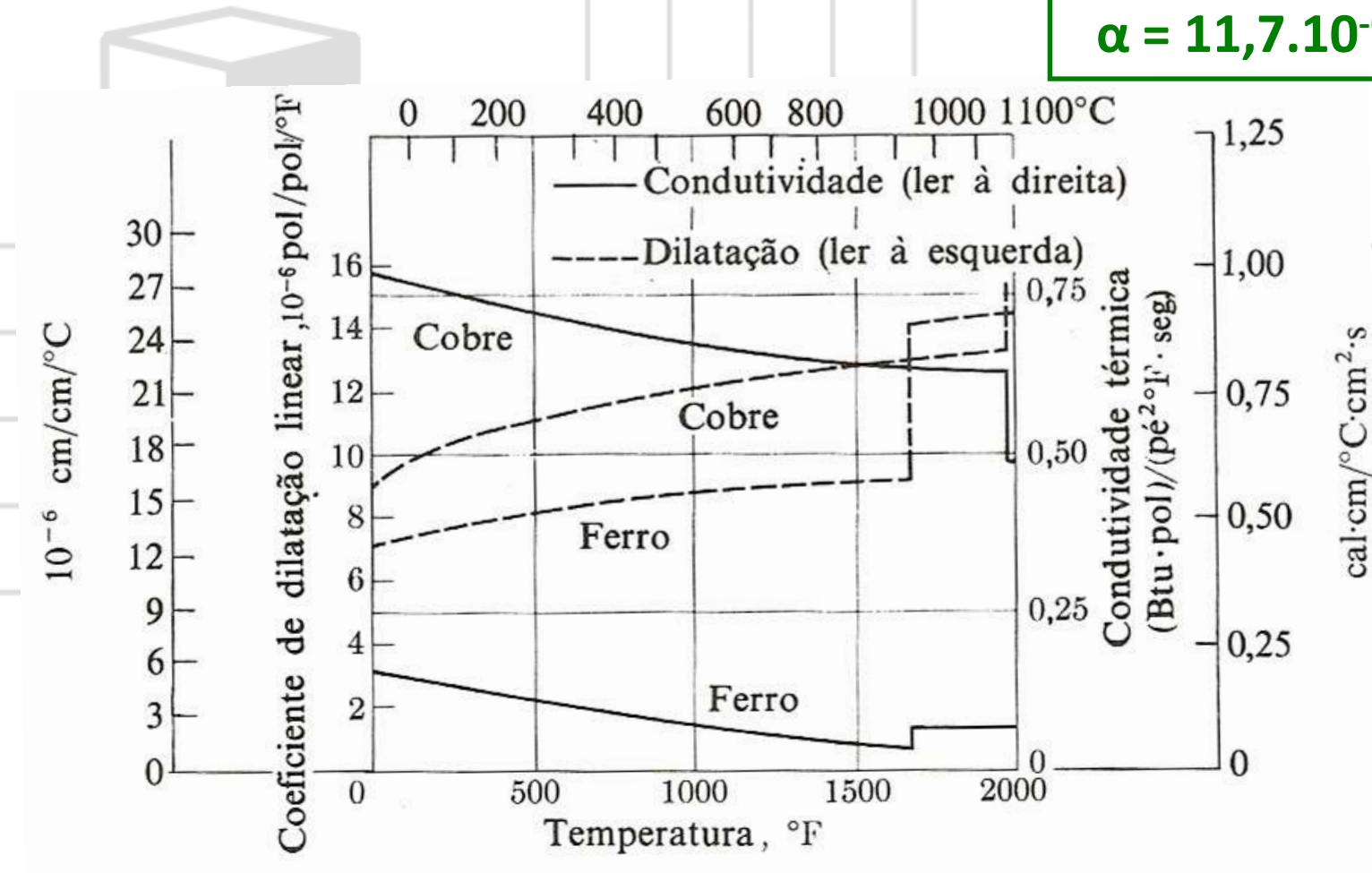
CA

E = 210 GPa

Propriedades Térmicas

CA-50

$\alpha = 11,7 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$



Projeto

Classificação da Agressividade do Meio

Classe de agressividade	Agressividade	Tipo de ambiente	Risco de deterioração
I	Fraca	Rural Submerso	Insignificante
II	Moderada	Urbano	Pequeno
III	Forte	Marinho Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

NB1

NBR6118/2003

Projeto

Correspondência entre a Classe de Agressividade do Meio e a Qualidade do Concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		Fraca	Moderada	Forte	Muito forte
Relação água/cimento	Armado	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	Protendido	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe NBR 8953	Armado	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	Protendido	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NB1
NBR6118/2003

Projeto

NB1 NBR6118/2003

Correspondência entre a Classe de Agressividade e o Cobrimento do Concreto

Tipo	Componente	Classe de agressividade			
		Fraca	Moderada	Forte	Muito forte
		Cobrimento nominal - C_{nom} (mm)			
Concreto armado	Lajes	20	25	35	45
	Vigas e Pilares	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Alguns Requisitos

Cobrimento nominal é o cobrimento mínimo da face externa do estribo acrescido da tolerância de execução, considerando $\Delta c \geq 10$ mm

$$d_{max} \leq 1,2 \cdot C_{nom} \quad C_{nom} \geq \phi_{barra} \quad C_{nom} \geq \phi_{feixe} = \phi_n = \phi \cdot v_n \quad C_{nom} \geq 0,5 \cdot \phi_{bainha}$$



Patologia



Patologia das Estruturas



Custos

Baboian e Hoar

Perdas globais por corrosão - 3 a 4% PIB

1º - Transportes

2º - Instalações Portuárias e Marinhas

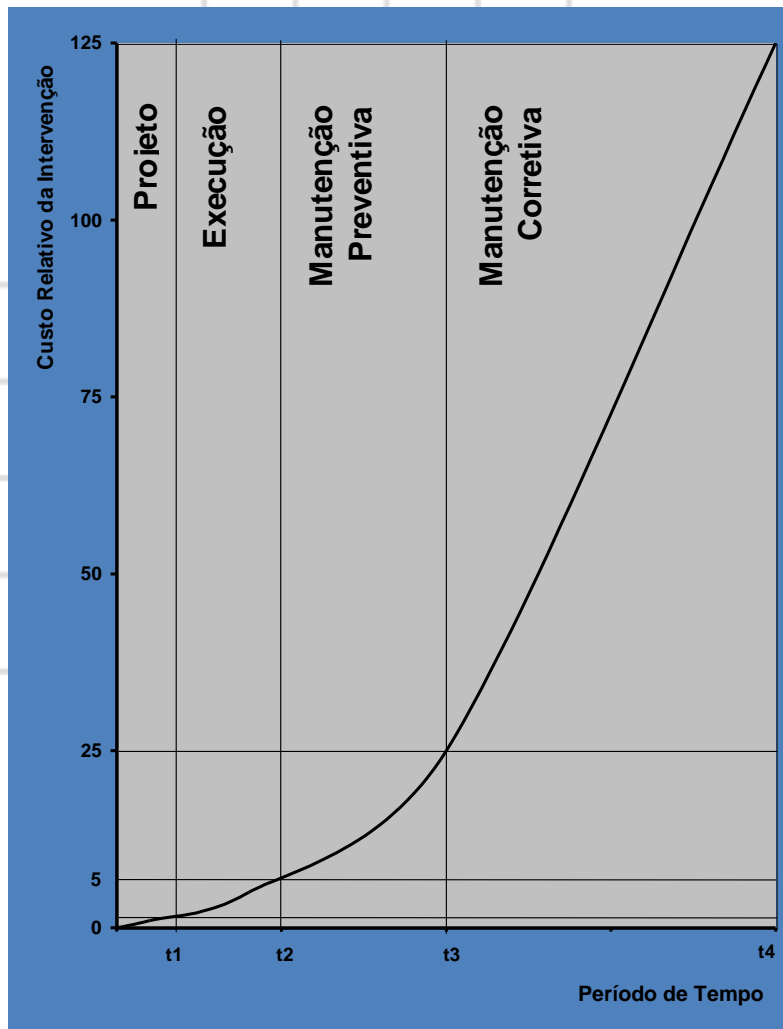
3º - Construção Civil (> 0,5%)



Custos

Lei de Sitter

$$PG \Rightarrow q = 5$$



Sintoma

Manifestações Patológicas

- Fissuras
- Manchas superficiais
- Corrosão das armaduras
- Eflorescências
- Degradação química
- Flechas
- Outras deformações excessivas
- Falhas de concretagem
- Interferências de outros projetos
- Esborcinamentos
- Desgastes superficiais
- Outros



Mecanismos

Processos

Físico

Químico

Físico-químico

Eletroquímico

Mecânico



Origem

Momento

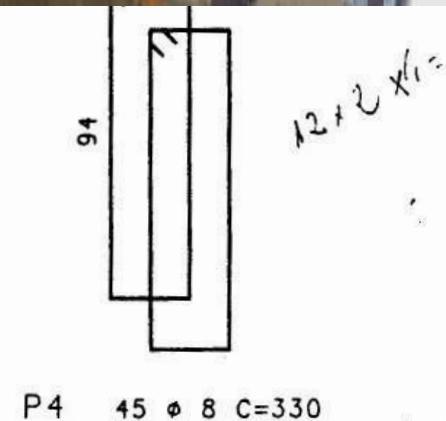
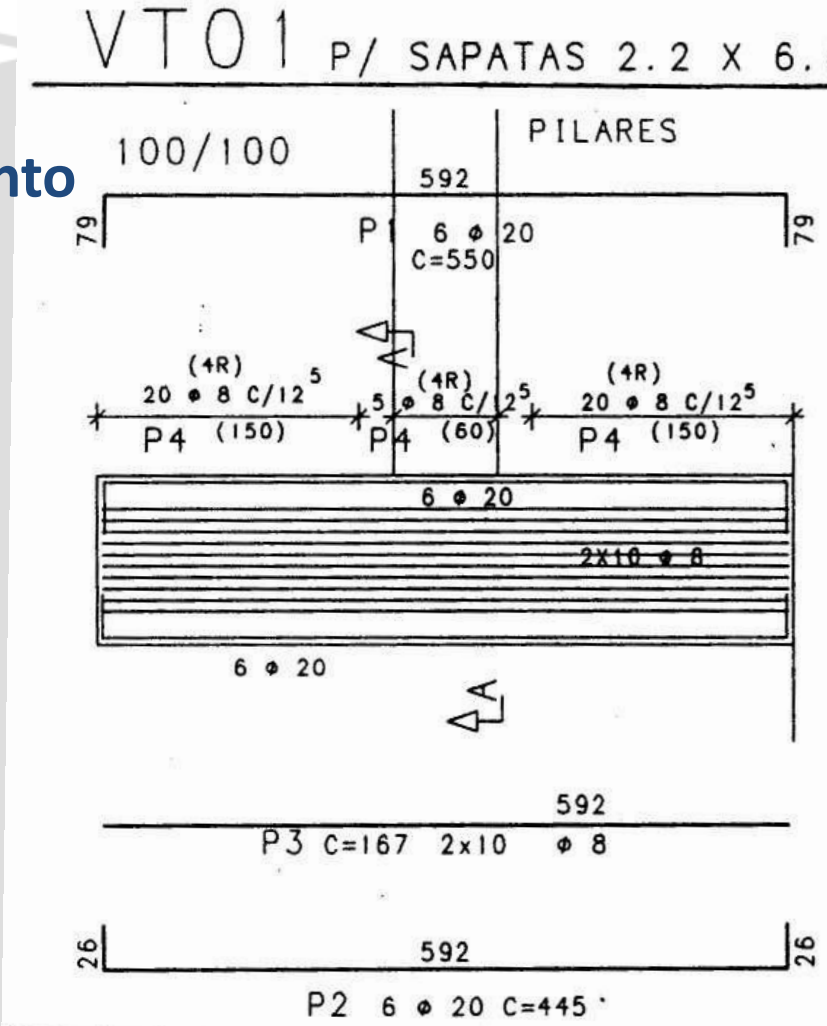
Planejamento

Projeto

Materiais

Execução

Uso



Causa

Agente

Cargas

Agentes atmosféricos

Variações higroscópicas

Variações térmicas intrínsecas e extrínsecas

Incompatibilidade entre materiais

Agentes biológicos

Outros



Conseqüência

Redução da vida útil, com o comprometimento da segurança ou das condições de serviço e funcionamento ou das condições estéticas



Ataque ao Concreto

Águas Agressivas

Sulfatos

Mg NH₄ Na Ca K

Água do mar

Águas subterrâneas

Águas residuais industriais

Água de chuva

Primeira:



Segunda:



Terceira: Decomposição do C-S-H com perda de resistência

Ataque ao Concreto

Águas Agressivas

Águas Puras (Soft Water)

Anidrido Carbônico - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

Ácidos

Ácidos Minerais - Clorídrico, Sulfúrico, etc

Ácidos Orgânicos - Acético, Láurico, Oleico, etc

Sais de Amônia

Temperatura Bactérias (S) Carbonatos

Óleos e Graxas Nitratos e Nitritos

Cloro Fluoretos, Silicatos e Cromatos

Ataque às Armaduras

Corrosão das Armaduras

Agentes Agressivos

O_2 CO_2 H_2O SO_4^- Cl^-

Mecanismos

Carbonatação
Cloretos

Proteção ao aço

Proteção física

Cobrimento nominal

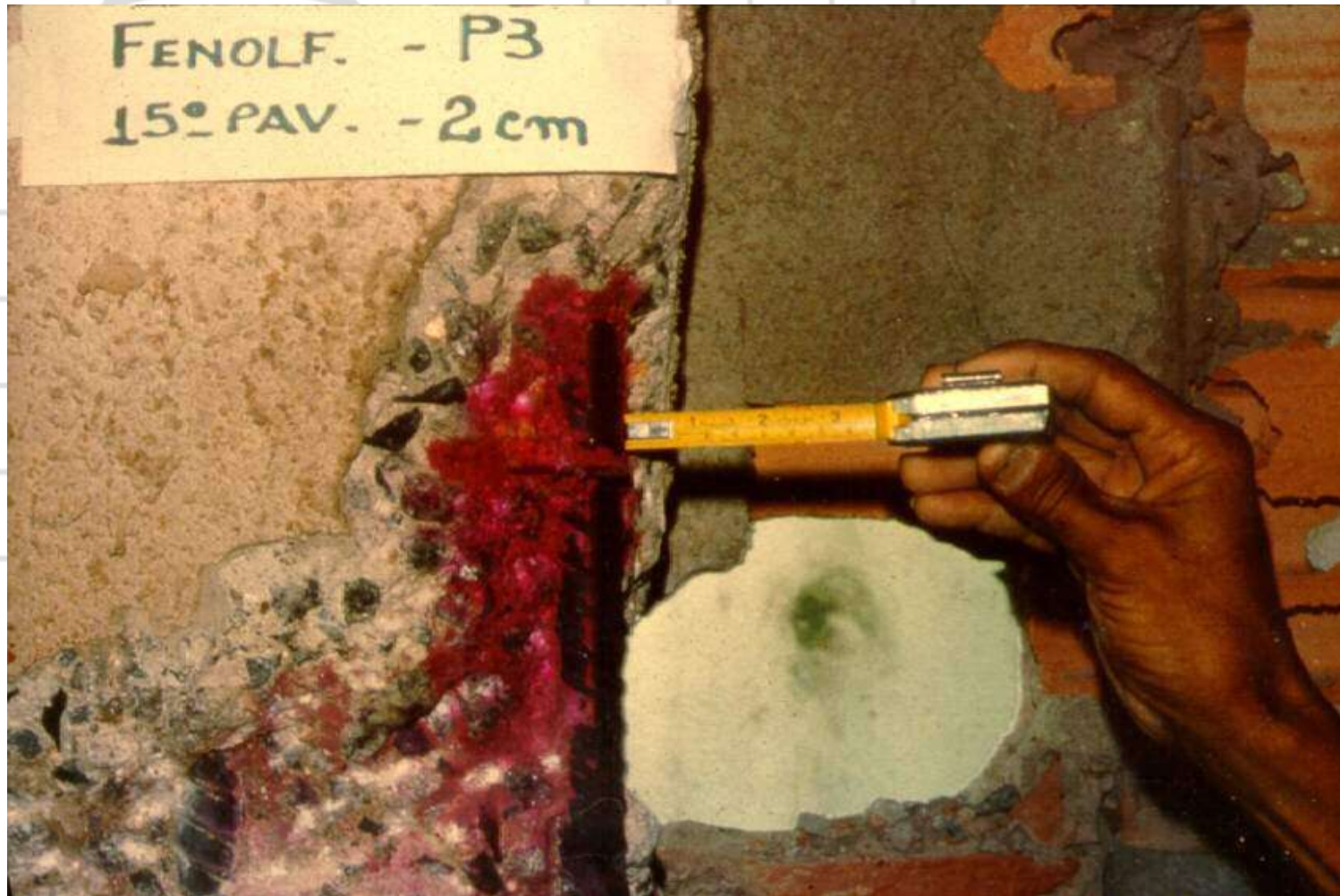
Propriedades do
concreto

Proteção química

Capa passivante

Meio alcalino do
concreto

Carbonatação do Concreto



Carbonatação do Concreto

Penetração da frente de carbonatação em concretos de cimento Portland

Cobrimento (mm) Relação a/c	TEMPO (em anos)					
	05	10	15	20	25	30
0,45	19	75	>100	>100	>100	>100
0,50	6	25	56	99	>100	>100
0,55	3	12	27	49	76	>100
0,60	1,8	7	16	29	45	65
0,65	1,5	6	13	23	36	52
0,70	1,2	5	11	19	30	43

Íons de Cloro (Cloretos)

Extração do concreto com o uso de furadeira e avaliação da quantidade de cloretos em relação à massa de cimento ou à massa de concreto



Limite máximo geral:

0,4% em relação à massa de cimento

0,05 a 0,1% em relação à massa de concreto

EH-88 - CA - Máximo de 0,4% em relação à massa de cimento

EH-80 - CP - Máximo de 0,1% em relação à massa de cimento

Norma Brasileira NBR 6118/2003

Vida útil

Período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de **uso e manutenção** prescritos pelo **projetista** e pelo **construtor**, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

Projeto

Até a despassivação das armaduras, considerando o período de 50 anos para obras correntes e 100 anos para obras de maior importância social

Serviço

Até o surgimento de manchas e/ou fissuras e o destacamento do concreto de cobrimento

Última

Colapso parcial ou total

Inspeção Detalhada

Comportamento das estruturas em função das solicitações

Carregamentos

Corrosão das armaduras

Ataques químicos

Recalques

Histórico de utilização

Outras ações

Identificação

Fissurações

Deformações e deslocamentos

Desplacamentos

Indícios de reações químicas

Indicações de perda de capacidade portante









































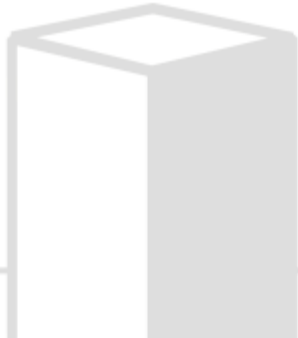




















Reparo

Recuperação superficial que visa restabelecer a integridade estrutural e a proteção às armaduras, bem como as condições de estética dos elementos e da obra como um todo

Reconstituição

Intervenção que restabelece as condições estruturais de suporte de cargas, a proteção às armaduras e, por fim, de estéticas da estrutura

Reforço

Inserção de elementos que restabeleçam e/ou ampliem a capacidade portante da estrutura original

Reconstrução

Estado de ruína parcial ou total, em que nenhuma das anteriores possa ser aplicada e no qual é necessário modificar o arranjo geométrico da estrutura

Etapas

Preparo do substrato

Tratamento das armaduras

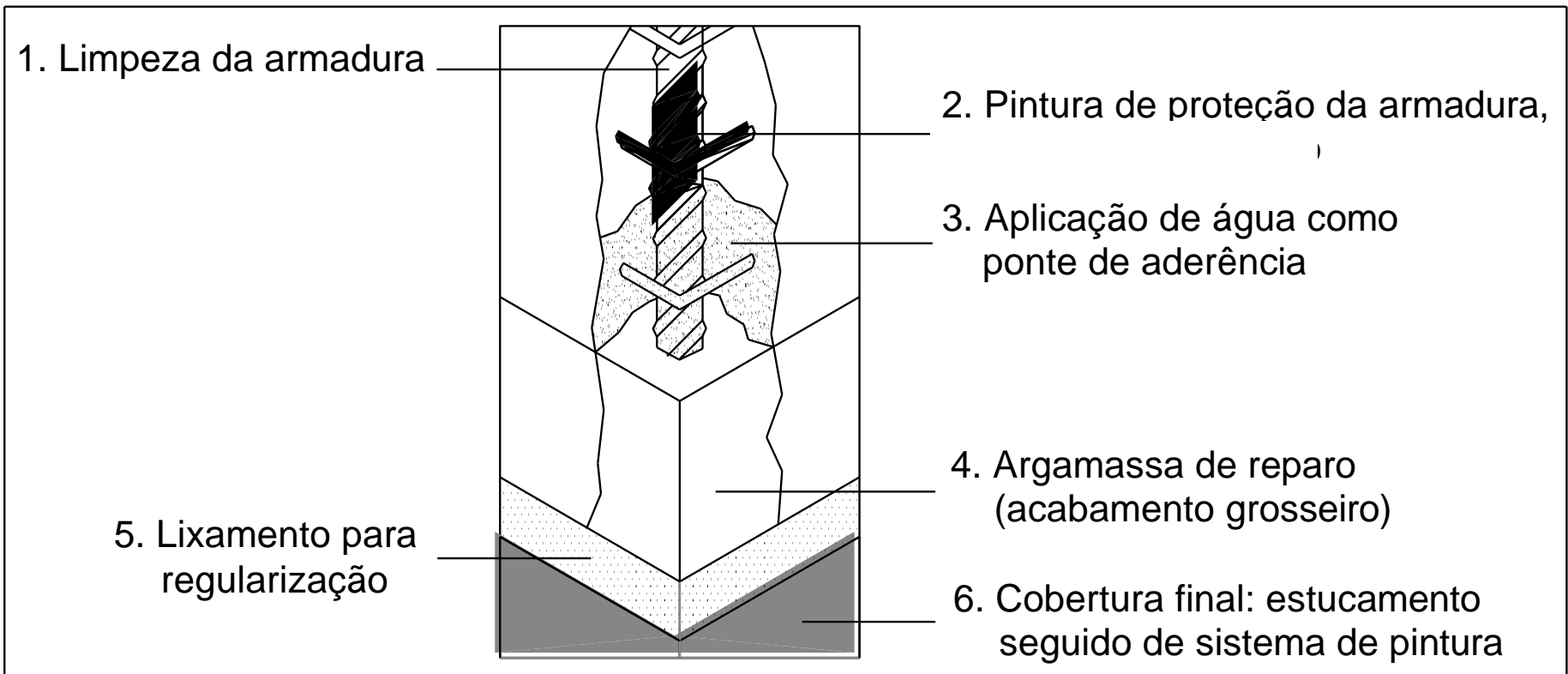
Recomposição das seções dos elementos estruturais

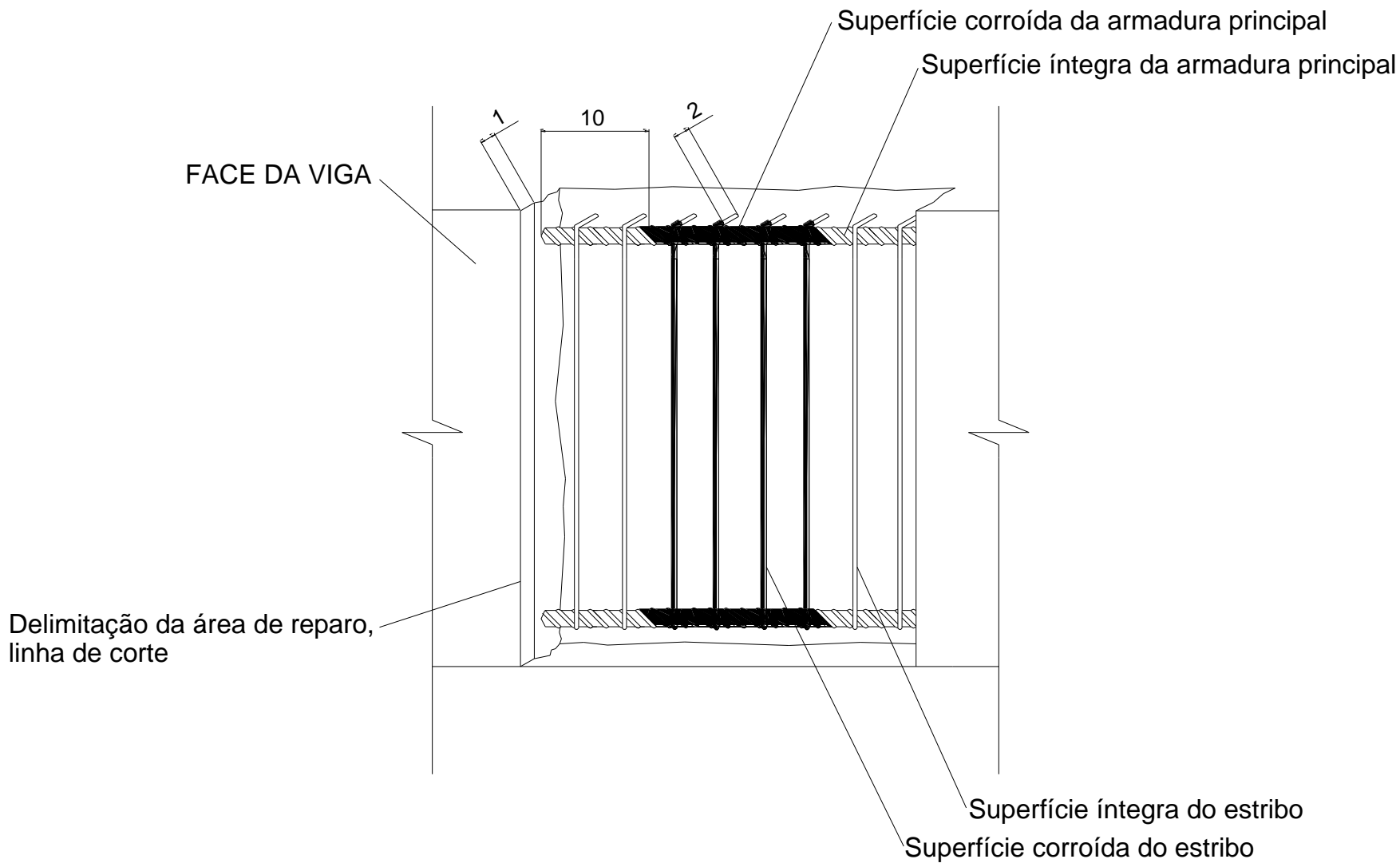
Cura do material de reparo

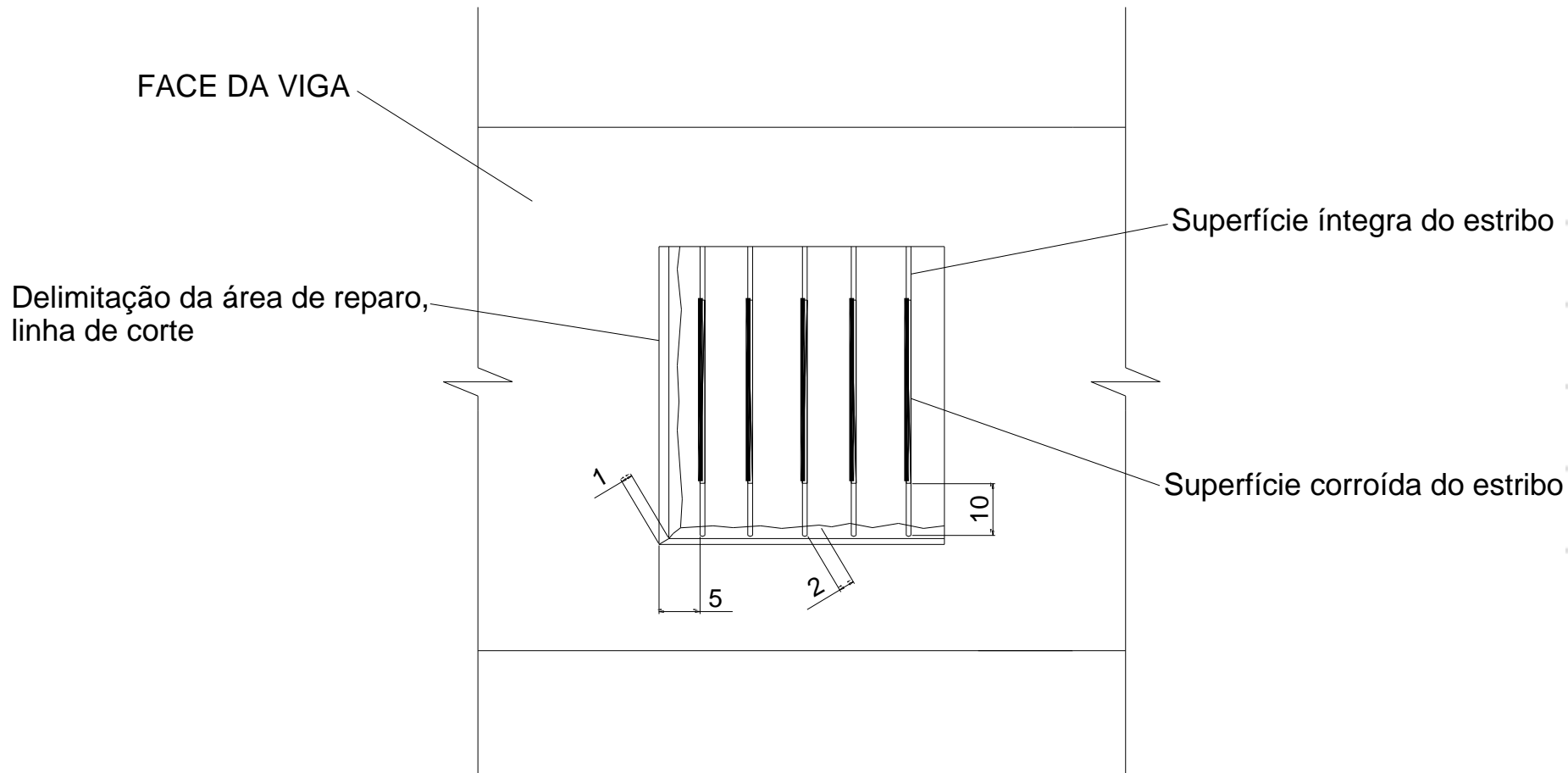
Estucamento

Pintura de proteção superficial

Etapas do processo de recuperação



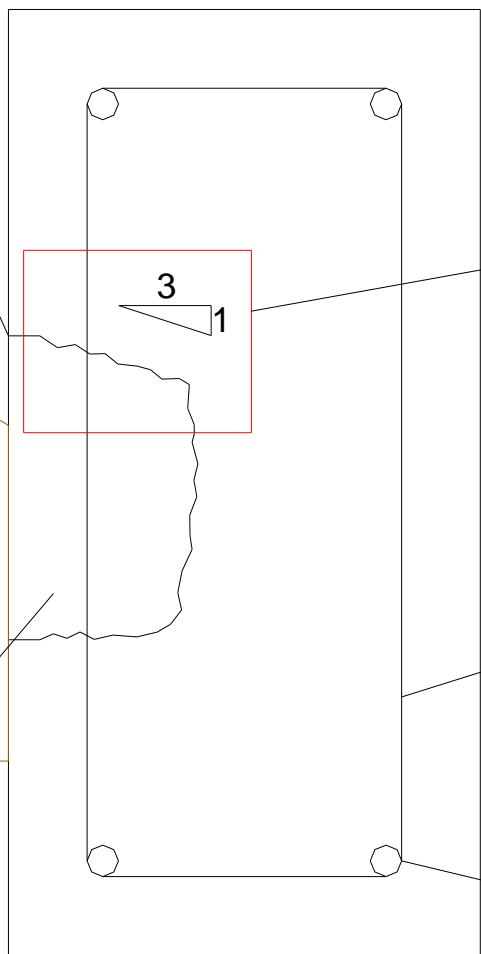




Delimitação do reparo

Forma tipo cachimbo

Falha de concretagem



Superfície inclinada - 1:3

Estribo

Armadura principal

CORTE

Execução

Tomar cuidado com procedimentos que provocam a “maquiagem” do problema

Aumento dos custos das intervenções em curto a médio prazo

Observar a *Lei de Sitter*



Excelência Executiva

Uso de Aditivos e/ou Adições

Redutores de Água

Redutores de Permeabilidade

Densificadores

Procedimentos Executivos

Lançamento

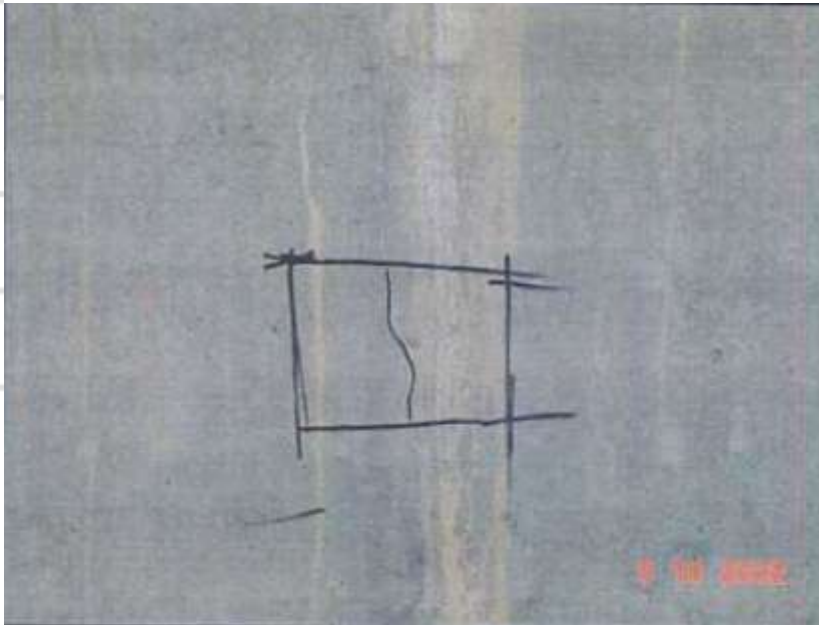
Adensamento

Cura Rigorosa





Análise microscópica dos testemunhos de concreto do muro de contenção do terminal 3 do Changi Airport



Identificação das fissuras



Extração dos testemunhos



Análise microscópica dos testemunhos de concreto do muro de contenção do terminal 3 do Changi Airport



Cristais formados na fissura



Cristais de Penetron alongados e tipo agulha

Universidade Leibniz de Hannover na Alemanha

Análise microscópica do efeito autocicatrizante do aditivo de cristalização integral



Imagem inicial de fissura
com 0,4 mm

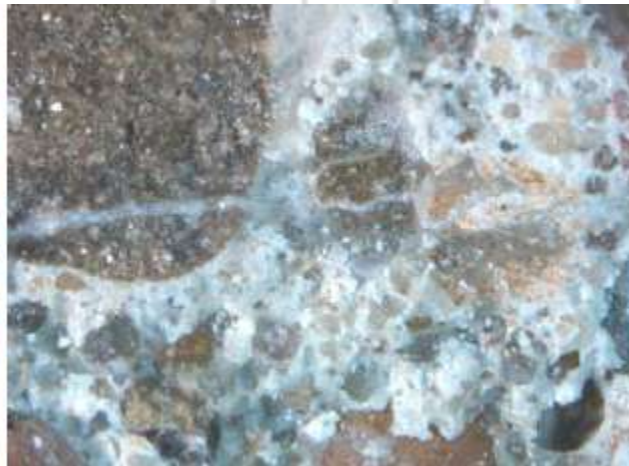


Imagem após 15 dias em
contato com a umidade

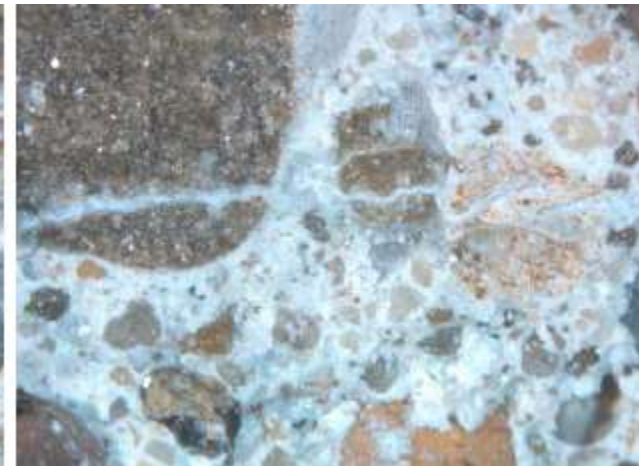


Imagem após 30 dias em
contato com a umidade

Tecnologia de Materiais

Tipos

Hidro-repelentes ou Tratamentos Hidrofóbicos

Endurecedores de Superfície

Pinturas

Membranas

Membranas Pré-fabricadas

Membranas Especiais

Revestimentos

Baixa Espessura

Alta Espessura

Mantas

Tecnologia de Materiais

Bases Químicas

Silanos

Silicatos

Látex PVA

Epóxi

Poliuretanos

Borracha Clorada

Cimentícia

Silano-Siloxano

Fluorsilicatos

Acrílicos

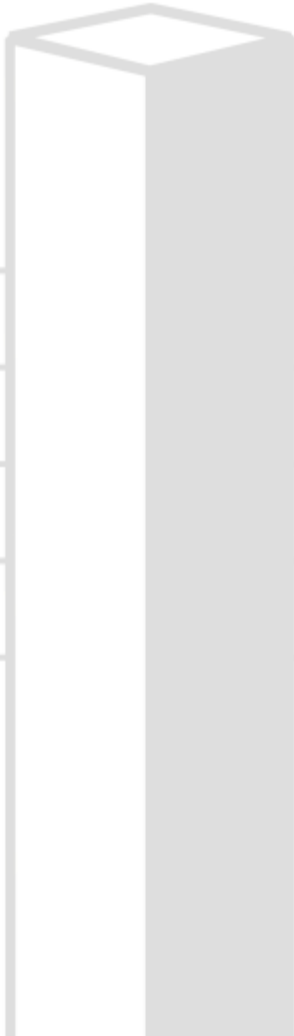
Epóxi-Novolac

PVC

Poliuréias

Cimento Modificado

Hidro-repelentes



Endurecedores de Superfície



Pinturas



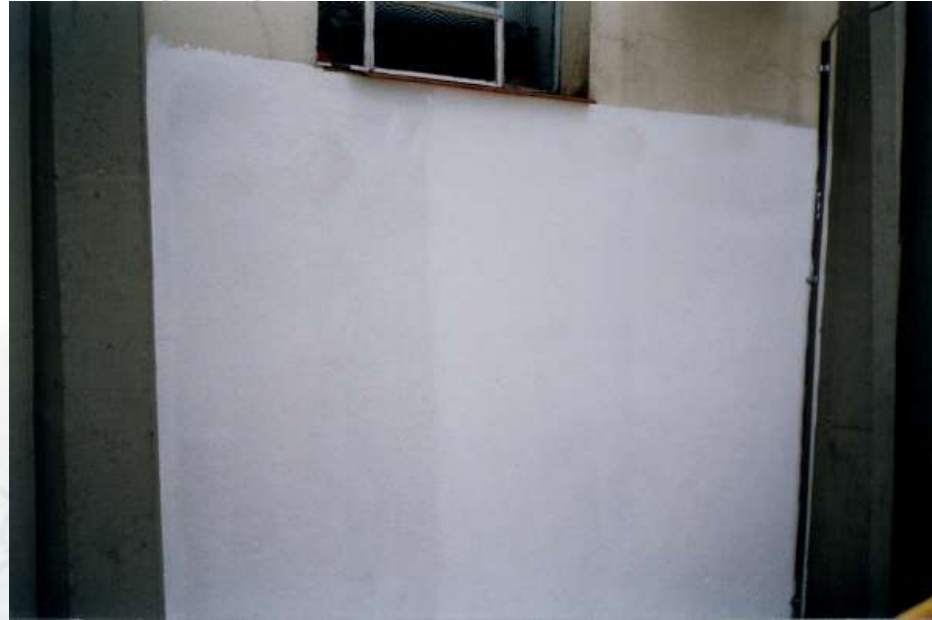
Pinturas



Pinturas e Revestimentos



Membranas



Membranas



Membranas



Revestimentos



Revestimentos



Membranas Especiais



Membranas Especiais



AGRADECIMENTOS



MUITO OBRIGADO