



CREA-SP

Conselho Regional de Engenharia e
Agronomia de São Paulo

Seminário de Inspeção em Pontes e Viadutos

Paulo Helene

Diretor PhD Engenharia

Prof. Titular Universidade de São Paulo

Gestor e Ex-Presidente ALCONPAT Internacional

Ex-Presidente e Conselheiro Permanente IBRACON

Member fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life Design

Membro do ACI, fib, ABCIC, ABNT, ABECE

Conselheiro da CNTU, SEESP, PMSP e ABNT

Autor de 8 livros e orientador de 30 teses e 50 dissertações

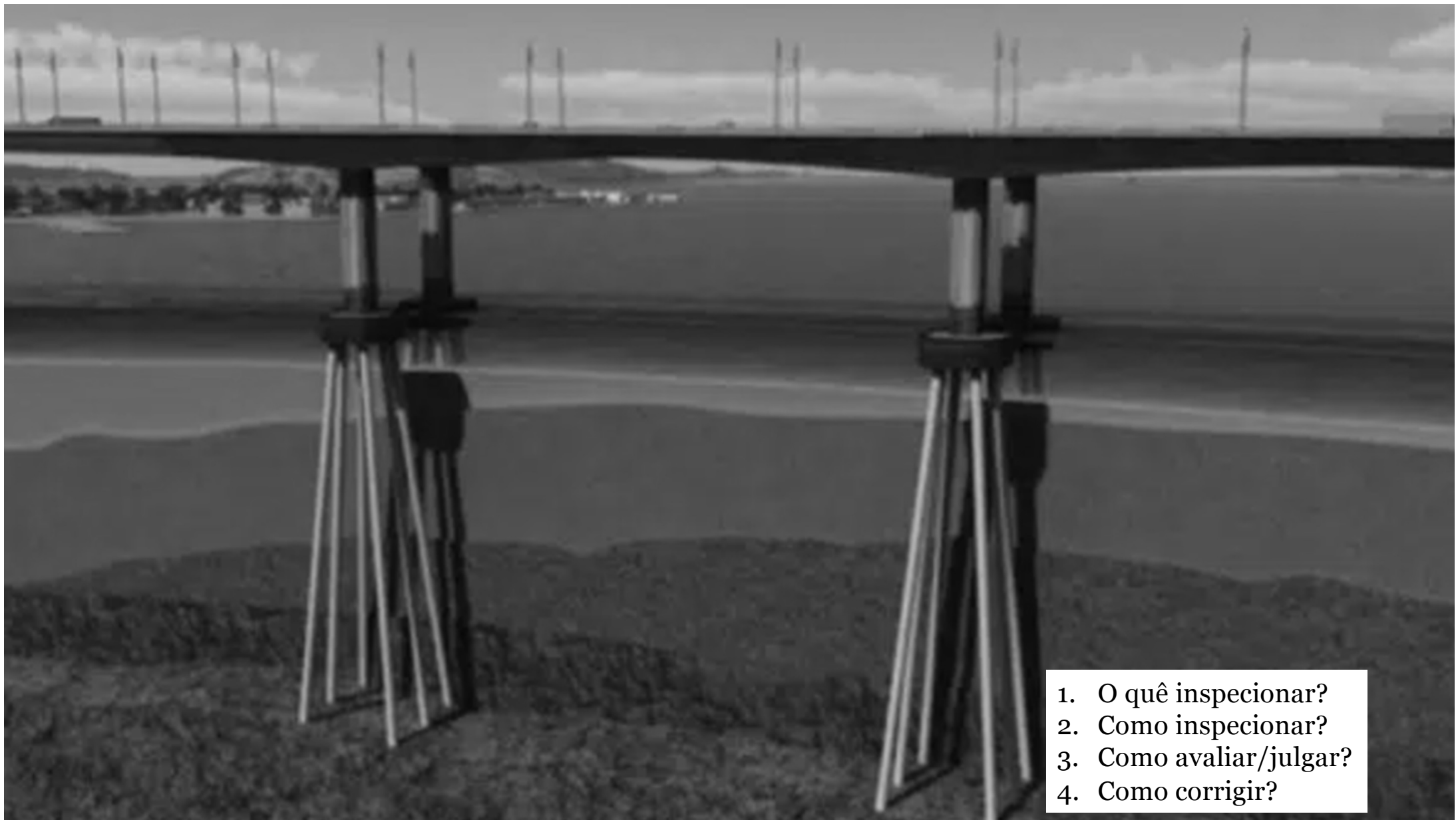
São Paulo, CREA.SP, sede Angélica, Auditório, 2 andar. 05 de Novembro de 2025



CREA-SP

Conselho Regional de Engenharia e
Agronomia de São Paulo

MECANISMOS FÍSICO-QUÍMICOS DE DETERIORAÇÃO



1. O quê inspecionar?
2. Como inspecionar?
3. Como avaliar/julgar?
4. Como corrigir?

MECANISMOS DE ENVELHECIMENTO E DETERIORAÇÃO

ABNT NBR 6118:2023 (2003)

"mecanismos de deterioração e envelhecimento"

6.3.2 Concreto

- ✓ lixiviação;
- ✓ expansão → sulfatos externos
- ✓ Expansão → sulfatos internos/DEF
- ✓ expansão → álcalis+agregados (internos)/AAR
- ✓ intemperismo → pirita/pirrotita(Fe+S)

6.3.3 Aço

- ✓ corrosão por carbonatação
- ✓ corrosão por cloretos

6.3.4 Estrutura

ações mecânicas, movimentações térmicas, impactos,
ações cíclicas, retração, fluência e relaxação

Ponte A Tribuna

São Vicente/SP

**Interdição: nov/2019,
após relatório de inspeção do
IPT e determinação do TJSP**

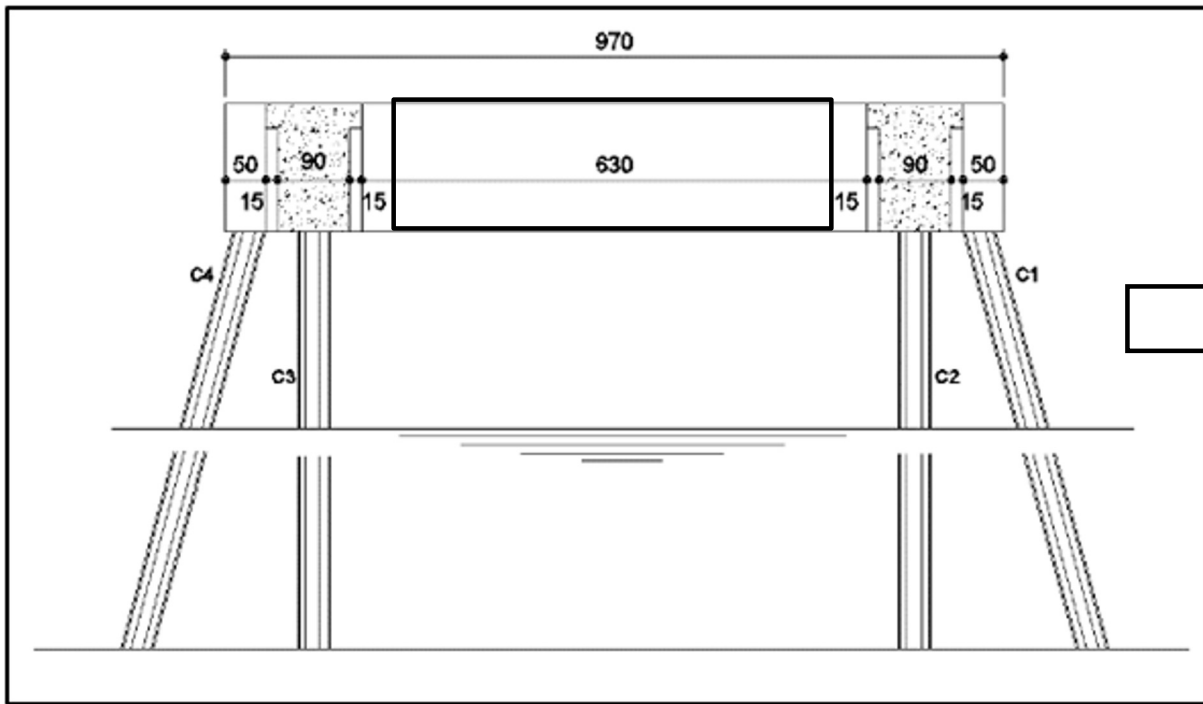
32 anos de idade





Detalhe do fuste emerso de
duas estacas distintas









Procedimentos de reabilitação













Principais Problemas

**corrosão armadura
(CO₂ & Cl⁻)**

lixiviação

(buzinotes, pingadeiras, impermeabilizações...)

**reações expansão
(AAR & DEF)**

**fissuras estruturais
ativas**

**aparelhos de
apoio**

**juntas de
dilatação**

Julio Timerman

Principais Aspectos da NBR 9452

TIPOS DE INSPEÇÃO

- Cadastral



- Rotineira



- Especial



- Extraordinária (acidentes, colapsos, etc.)

Anexo B
(normativo)

Requisitos mínimos relativos a ensaios de campo

Tabela B.1 – Requisitos mínimos relativos a ensaios de campo

Ensaio	Inspetor I	Inspetor II
Medidor de espessura de cobrimento de armadura, estimativa do diâmetro e sua posição (pacometria)	EX	AR
ABNT NBR 7584	EX	AR
ABNT NBR 7680	EX	AR
ABNT NBR 8802	EX	AR
ABNT NBR 12655	EX	AR
ASTM C 876	CB	AR
DIN EN 14630	EX	AR
CB Conhecimento básico do ensaio, ou seja, princípio de funcionamento, condições de aplicação, limitações de uso, natureza dos resultados esperados. EX Além do previsto em CB, executa o ensaio e registra as condições de ensaio e resultados obtidos. AR Além do previsto em EX, planeja, orienta a execução do ensaio, interpreta e avalia os resultados, ou seja, tem discernimento sobre procedimentos executivos de inspeção, amostragem, quantidade de ensaios, periodicidade e pontos de coleta e avalia os limites de aceitação ou representatividade dos resultados. NOTA Os inspetores I e II podem dispor de mão de obra auxiliar para transporte e manipulação dos equipamentos necessários à execução dos ensaios.		

BS 1881
Pacometria

ABNT NBR 7584
Esclerometria

ABNT NBR 7680
Testemunhos

ABNT NBR 8802
Ultrasom

ABNT NBR 12655
Durabilidade

ASTM C 876
Potencial

ABNT DIN EN 14630
Carbonatação

CONCORRÊNCIA 005/2017-SMSO

**TERMO DE REFERÊNCIA PARA CONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS DE
INSPEÇÕES ESPECIAIS E PROJETOS DE RECUPERAÇÃO EM OBRAS DE ARTE
ESPECIAIS DA CIDADE DE SÃO PAULO**

Setembro/2017

3.3. Realização de Ensaios na OAE

A fim de caracterizar mais precisamente o estado de deterioração ou comprometimento do quadro patológico, poderão ser realizados, a partir de um plano desenvolvido com base na análise dos resultados da Inspeção, devidamente justificado, ensaios destrutivos ou não-destrutivos nas estruturas. Os ensaios previstos são os seguintes:

3.3.1 Determinação da profundidade de carbonatação do concreto e do cobrimento das armaduras

3.3.2 Verificação do Potencial de Corrosão

3.3.3 Verificação da Resistividade Elétrica do Concreto

3.3.4 Verificação da homogeneidade do concreto

3.3.5 Verificação do fck do concreto

3.3.6 Determinação do teor de íons cloretos

3.3.7 Determinação do teor de sulfatos

3.3.8 Reação Álcali Agregado (RAA)

3.3.9 Instrumentação

BS 1881

Pacometria

posição da armadura, bitola & cobrimento

Pacometria

para quê serve?

1. Posição da armadura → *extrair testemunho; potencial de corrosão; ultrassom; esclerometria, as-built.*
2. Bitola → *precisa do projeto e do cobrimento. Alternativa prospecção*
3. Cobrimento → *precisa do projeto e da bitola. Alternativa prospecção.*

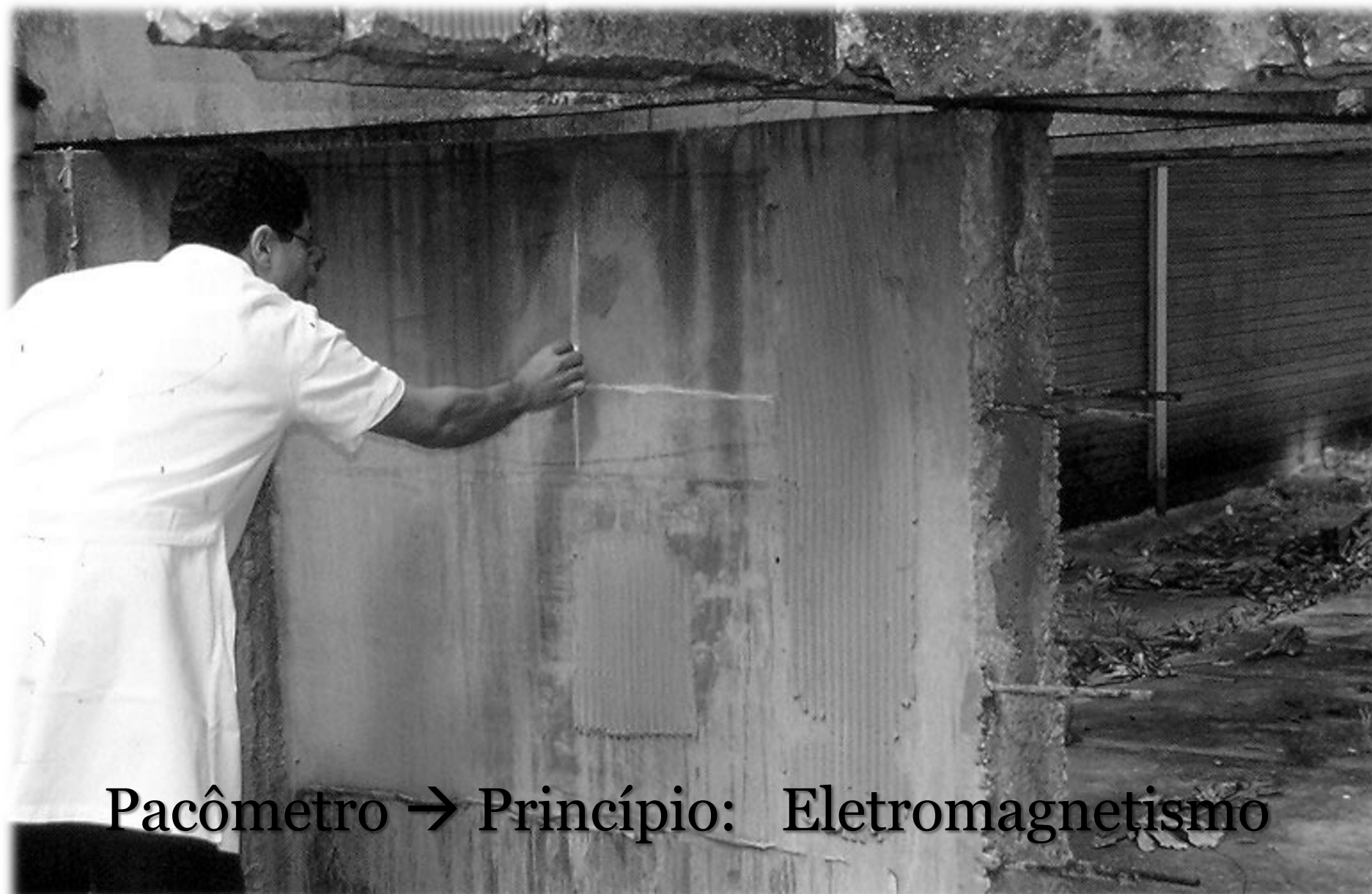
Pacômetro

→ localizador da posição da armadura, bitola & cobrimento





Pacômetro BS 1881



Pacômetro → Princípio: Eletromagnetismo

Pacômetro



DIN EN 14630

Carbonatação

passivado ou despassivado

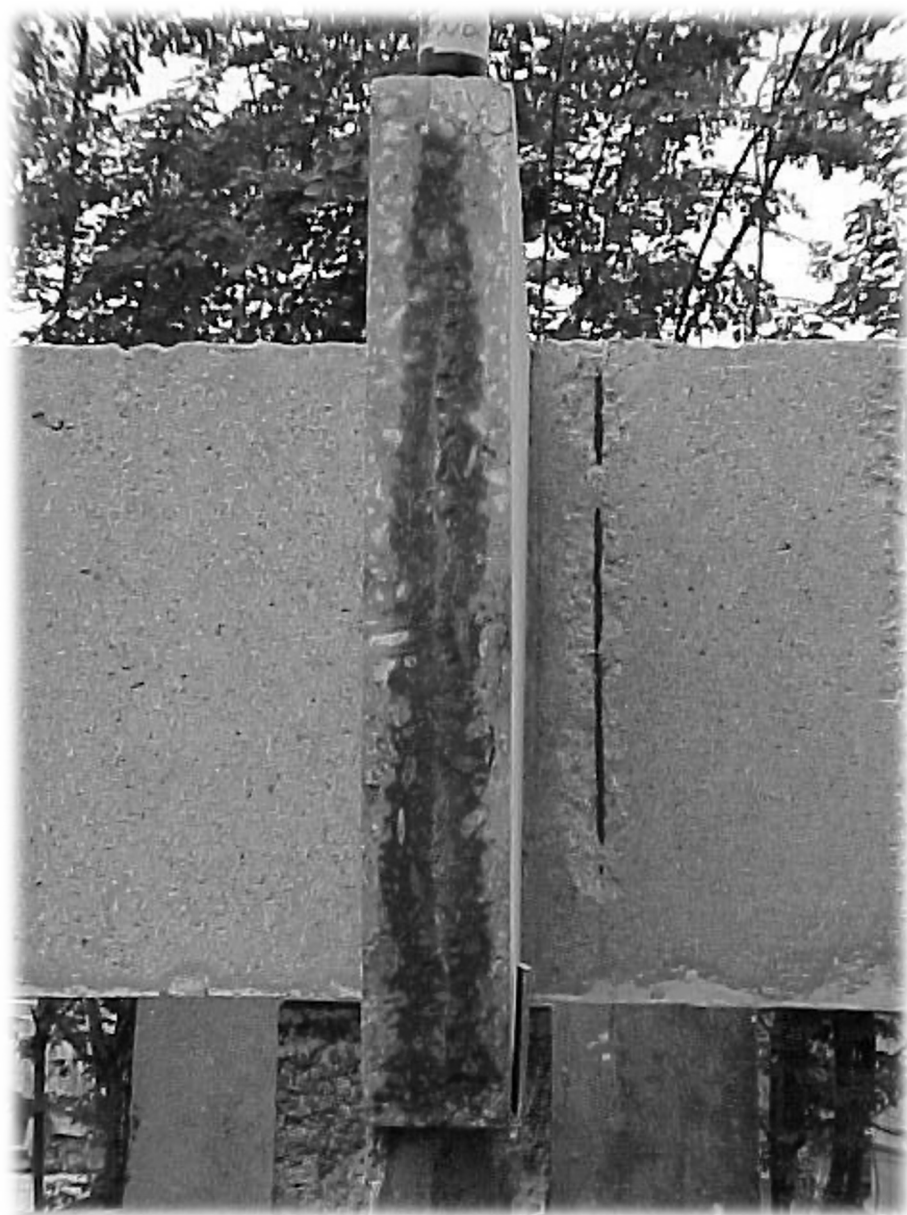
DIN EN 14630

Carbonatação

- ✓ *Indicador colorimétrico → 49% álcool + 50% água potável + 1% fenolftaleína*
- ✓ *Cor → vermelho carmim/rosado forte*
- ✓ *pH de viragem → 9 (8 a 10)*

**Medida da profundidade de
carbonatação**





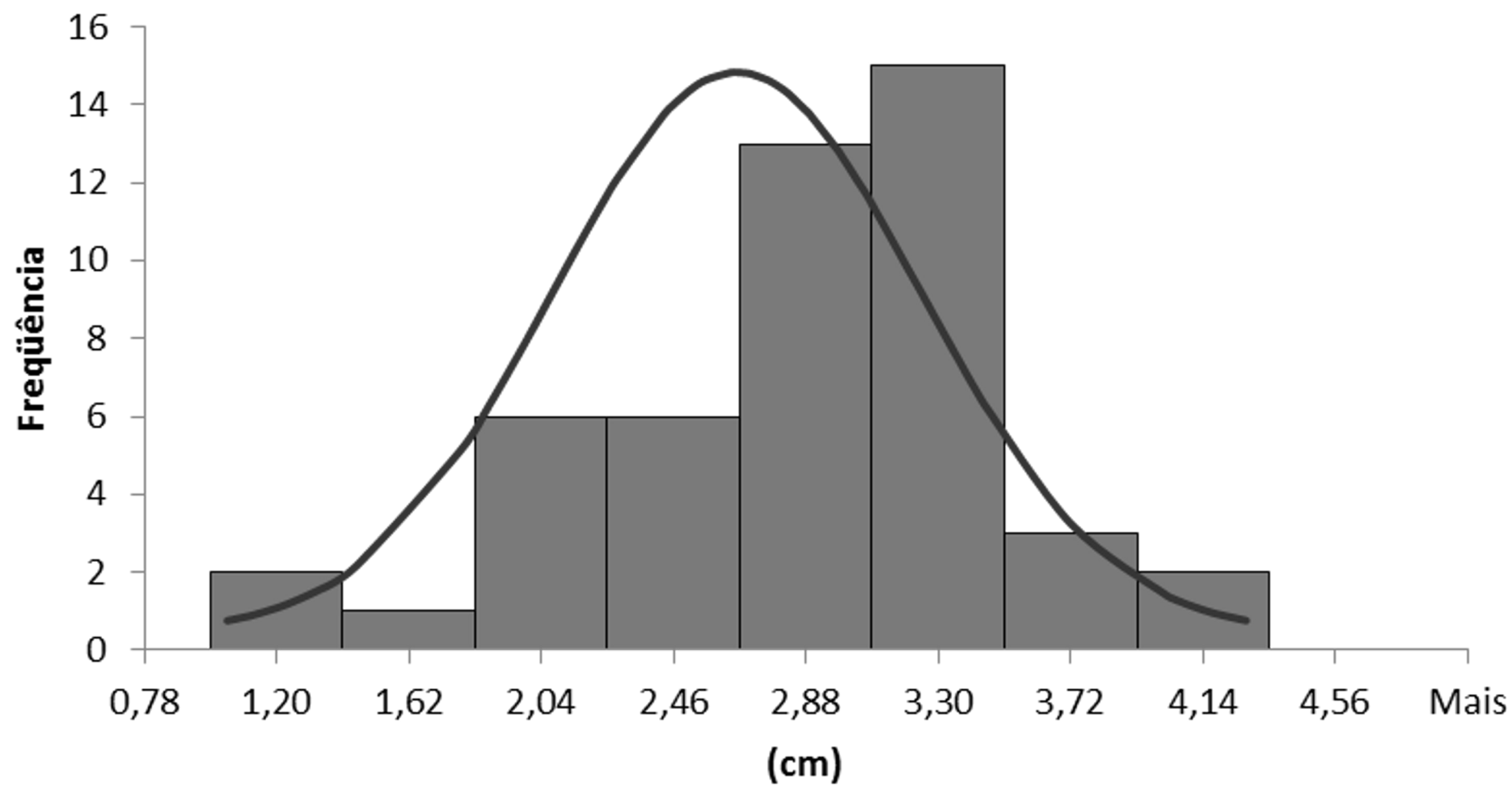
Aço → ***Corrosão de Armaduras***

Despassivação por carbonatação

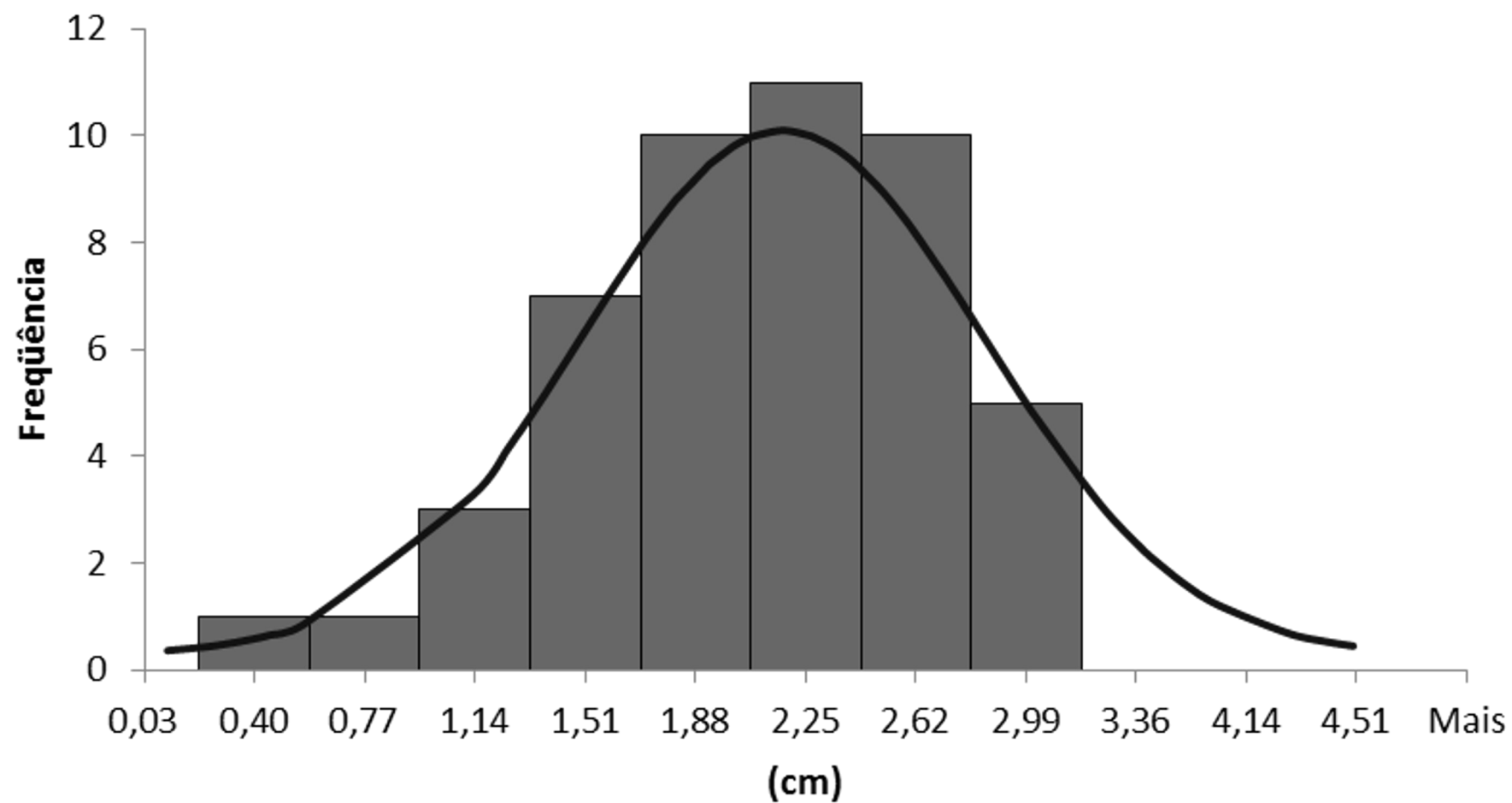
- Ca(OH)_2 --- $\text{pH} \geq 12$
(aço passivado)
- $\text{CO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$



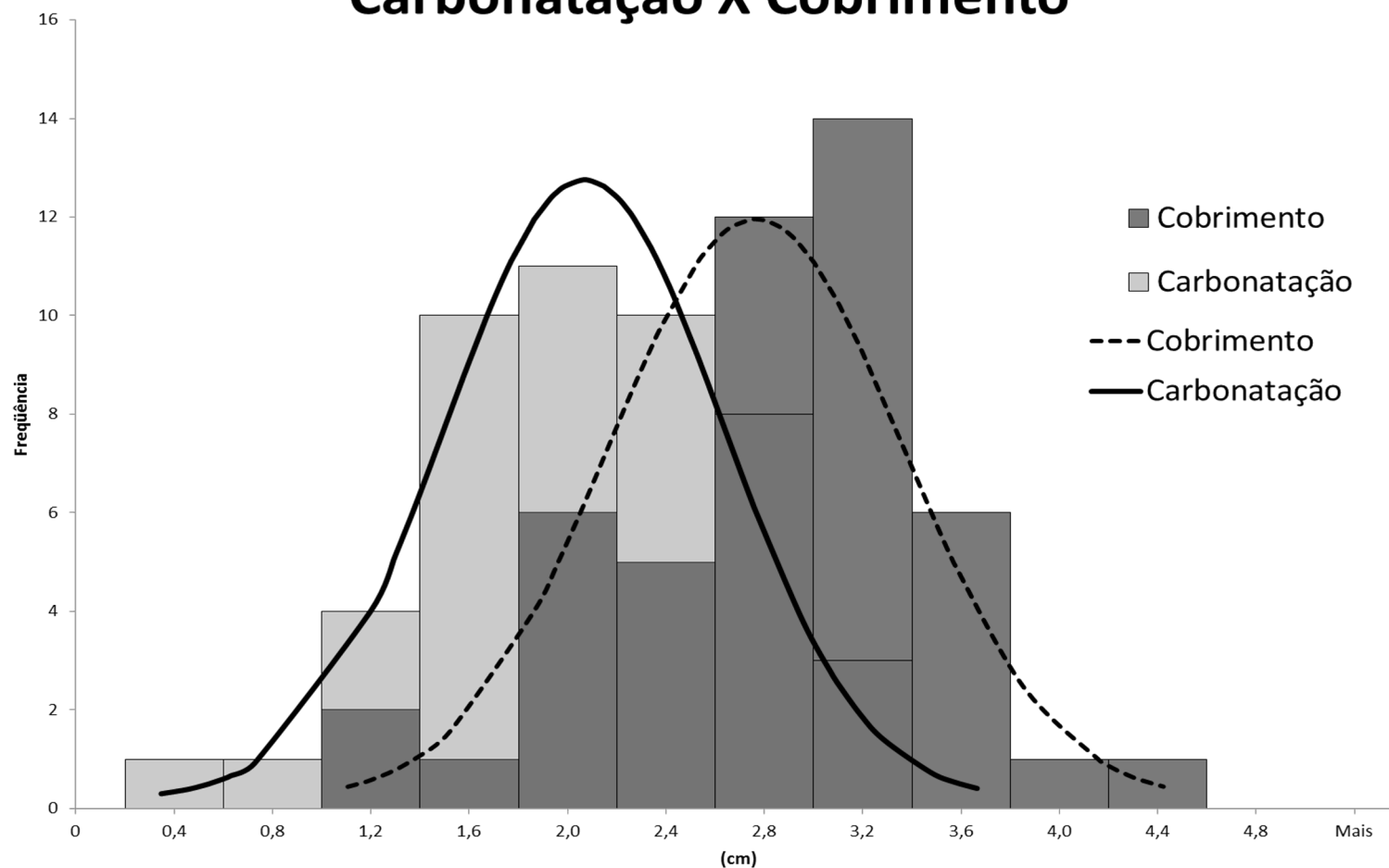
Cobrimento (cm)



Carbonatação (cm)

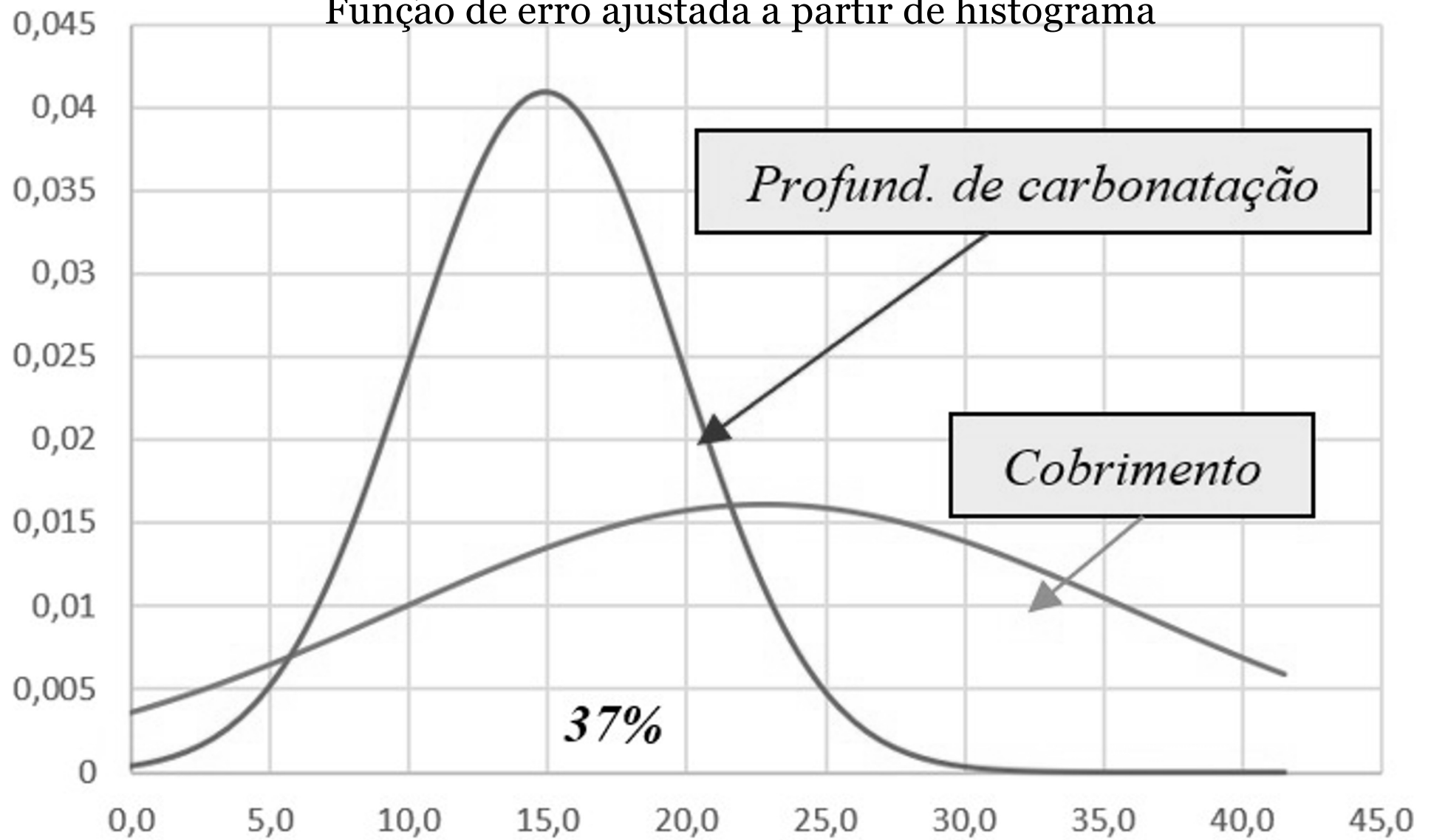


Carbonatação X Cobrimento



Sobreposição das distribuições de frente de carbonatação (vermelho) com espessura de cobrimento observando-se que em várias situações há armaduras despassivadas, pois a frente de carbonatação já atingiu a armadura.

Função de erro ajustada a partir de histograma

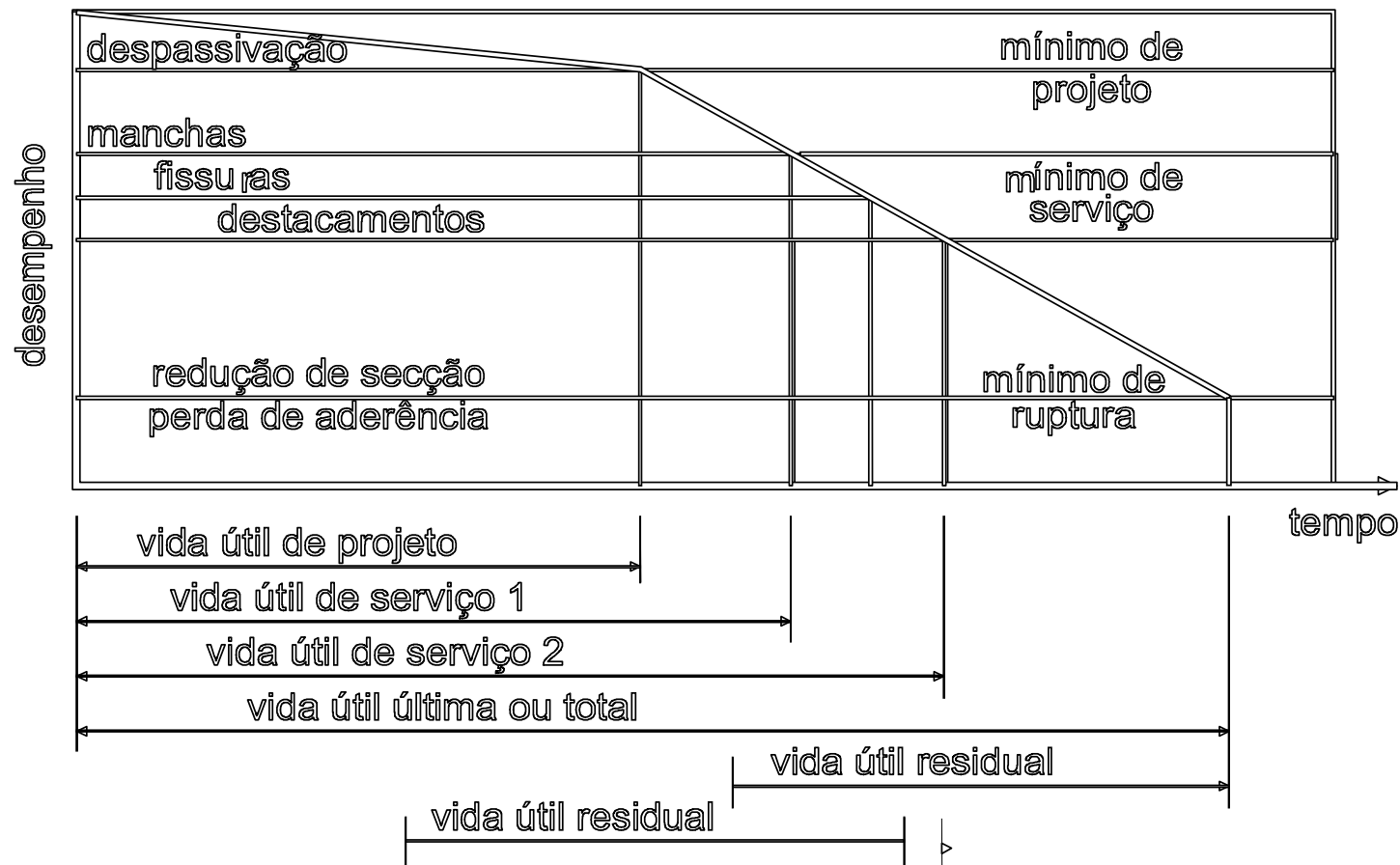


Vida útil de Projeto ABNT NBR 15575

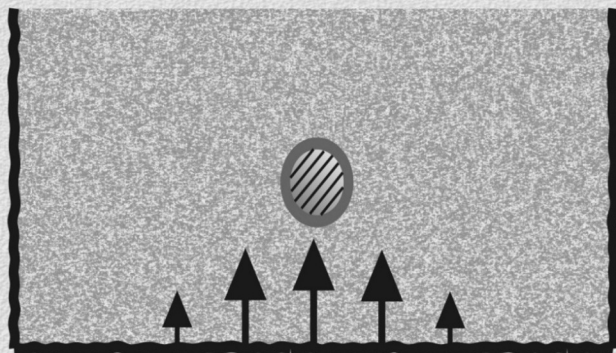
Sistema	VUP (anos)		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos Internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30

(a) Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.

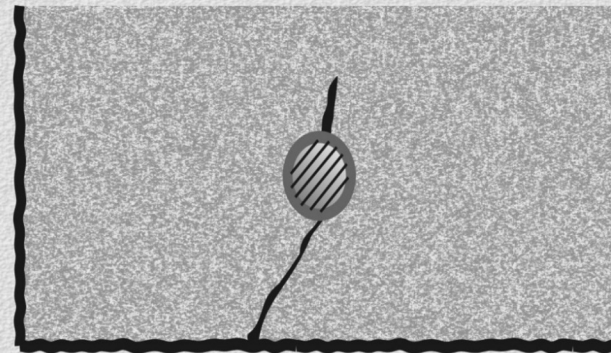
Vida Útil das Estruturas de Concreto



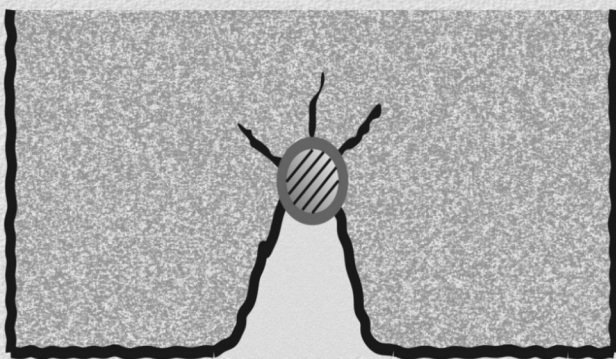
Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno de corrosão das armaduras



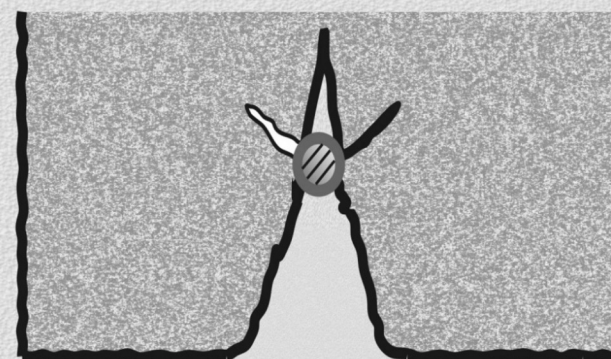
A) Penetração de agentes agressivos por difusão, absorção ou permeabilidade



B) Fissuração devida as forças de expansão dos produtos de corrosão



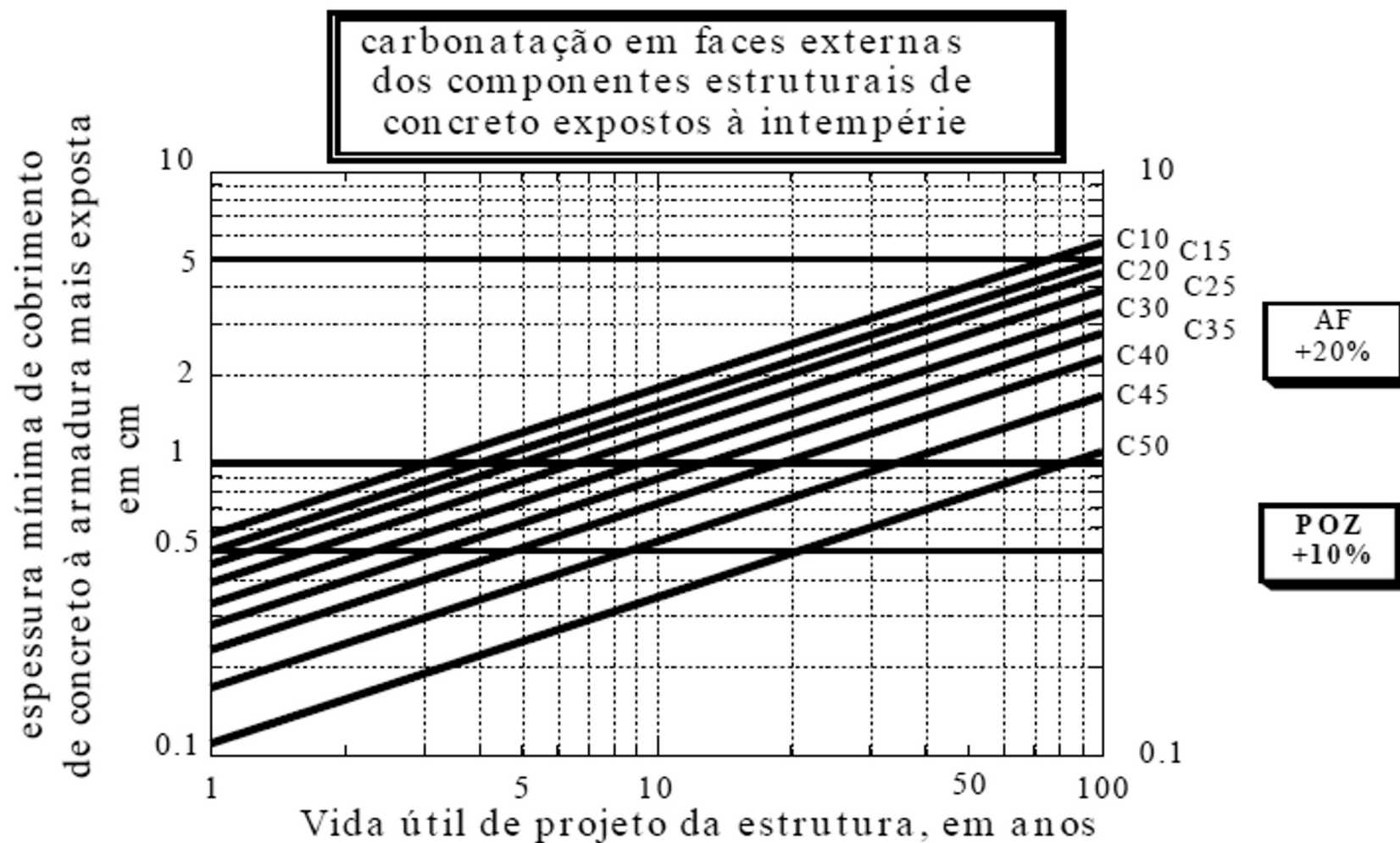
C) Lascamento do concreto e corrosão acentuada



D) Lascamento acentuado e redução significativa da secção da armadura

Vida Útil de Projeto VUP

HELENE (1997)



- ✓ Pacometria
- ✓ Carbonatação

ABNT NBR 7584

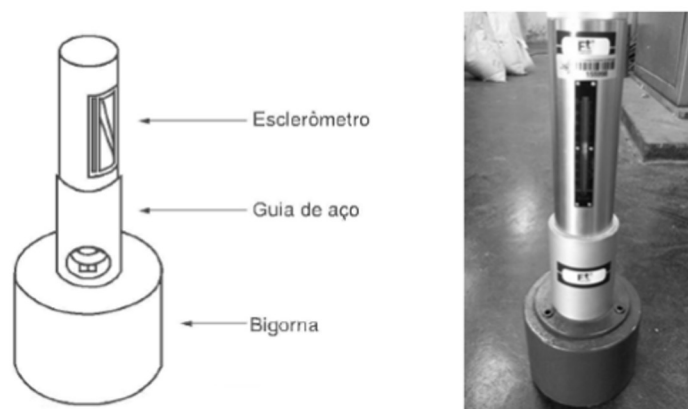
Esclerometria

dureza superficial, homogeneidade, “resistência”





Figura 2.2 – Bigorna de aço



3. Aferição do esclerômetro

O esclerômetro deve ser aferido antes de sua utilização ou a cada 300 impactos realizados.

Para aferição utiliza-se uma bigorna especial de aço. A cada inspeção deverá ser feitos pelo menos 10 impactos na bigorna e deve fornecer índices esclerométrico 80.

O esclerômetro não poderá ser utilizado devendo ser calibrado quando:

- Se for obtido índices médios com valores menores que 75
- Nenhum índice individual obtido entre os 10 impactos, deve diferir do índice esclerométrico médio de ± 3 .

4. Fator de correção

O coeficiente de correção do índice esclerométrico é obtido pela equação:

$$K = 80 / \text{média dos valores dos impactos na bigorna de aço}$$

➤ **Esclerômetro de reflexão**

Brasil → ABNT NBR 7584

England → BS 1881

Europa → EN 12504

Europa → EN 13791

MERCOSUL → NM 78

USA → ACI 228

USA → ASTM C805



Limpar e lixar a superfície

Esclerometria

carborundum





**esclerômetro
de reflexão**

**“Muito importante a
postura correta no
ensaio”**



**Medição da dureza superficial
através de Esclerometria**



Ao par destes estudos relacionados a dureza BRINELL, ultimamente (1950) na Suíça o Eng. SCHMIDT de Basileia apresentou um aparelho para medir a dureza de concreto pelo método de SHORE, isto é a dureza pelo recuo de uma massa elástica.

O aparelho foi aferido e estudado no laboratório federal de ensaio de materiais de Zürich (EMPA).

F — PROCESSO DE DUREZA DE RECUO

Dois são os aparelhos, apresentados por seu inventor, denominados tipo I e II. O aparelho tipo I (Fig. 3), consiste numa massa leve (6) acondicionada em um tubo guia (4) e que pode ser pro-

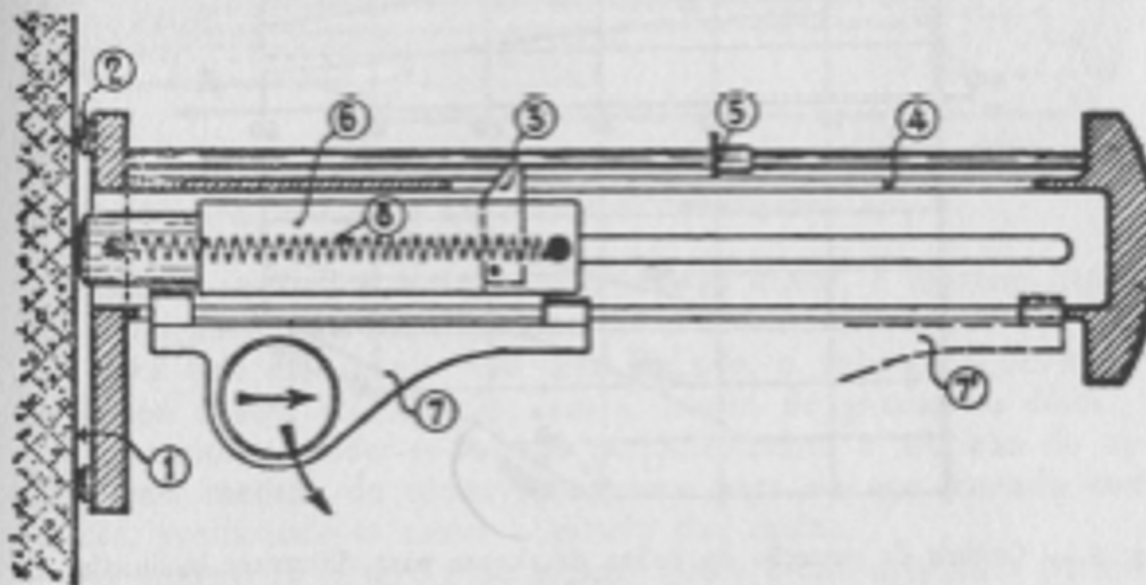
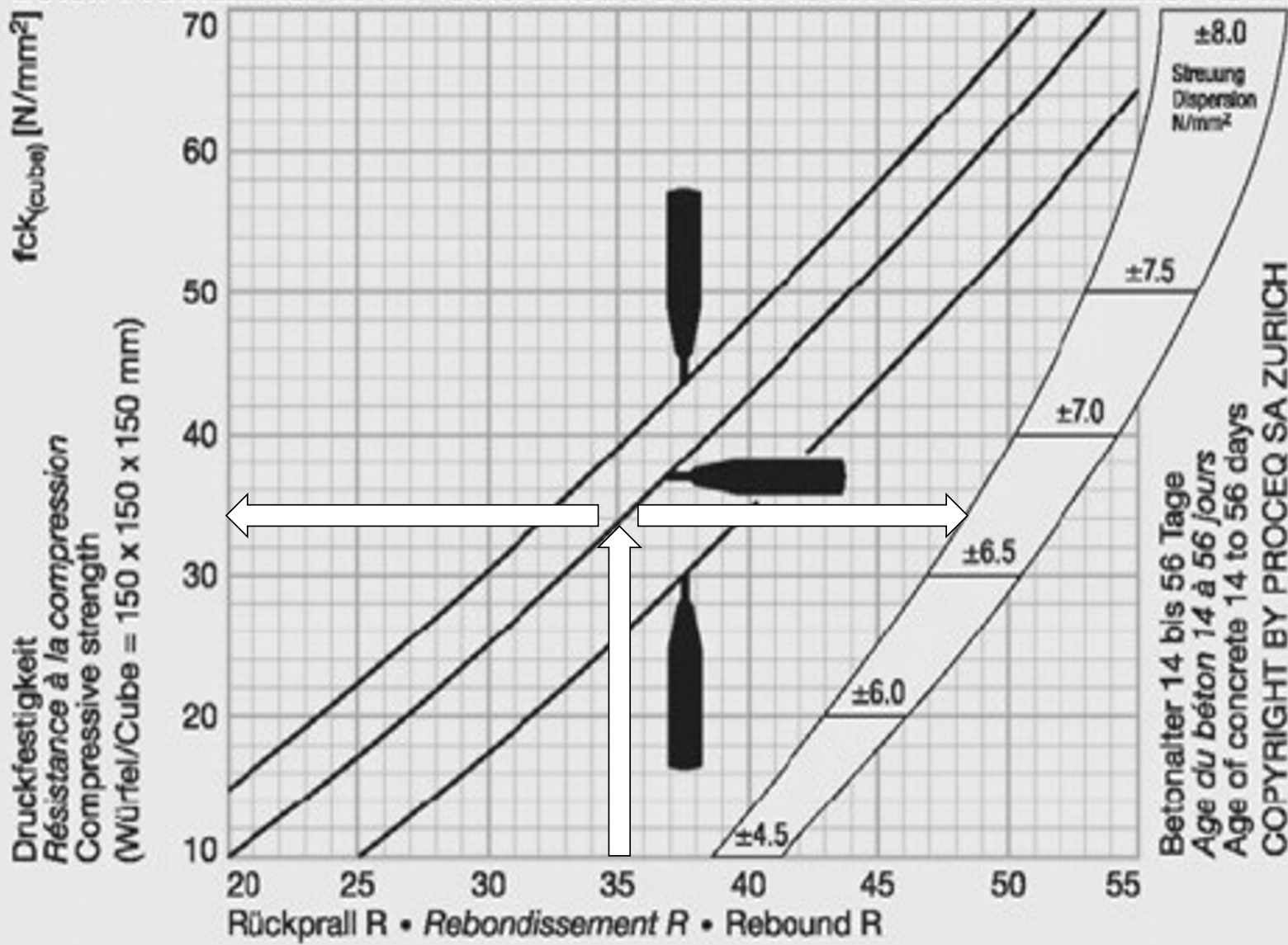


Fig. 3 — Corte longitudinal do esclerômetro de recuo

Manual do Engenheiro
Editora GLOBO, 1960
Prof. Eládio Petrucci

Beton-Prüfhammer N/NR • Scléromètre à béton N/NR • Concrete Hammer N/NR



Conclusões “pessoais”

1. Excelente, não destrutivo e prático para avaliar homogeneidade do concreto *in loco*
2. Excelente para identificar comparativamente regiões de baixa resistência
3. Razoável auxiliar para medir resistências do concreto *in situ*

- ✓ Pacometria
- ✓ Carbonatação
- ✓ Esclerometria

ABNT NBR 7680

Testemunhos

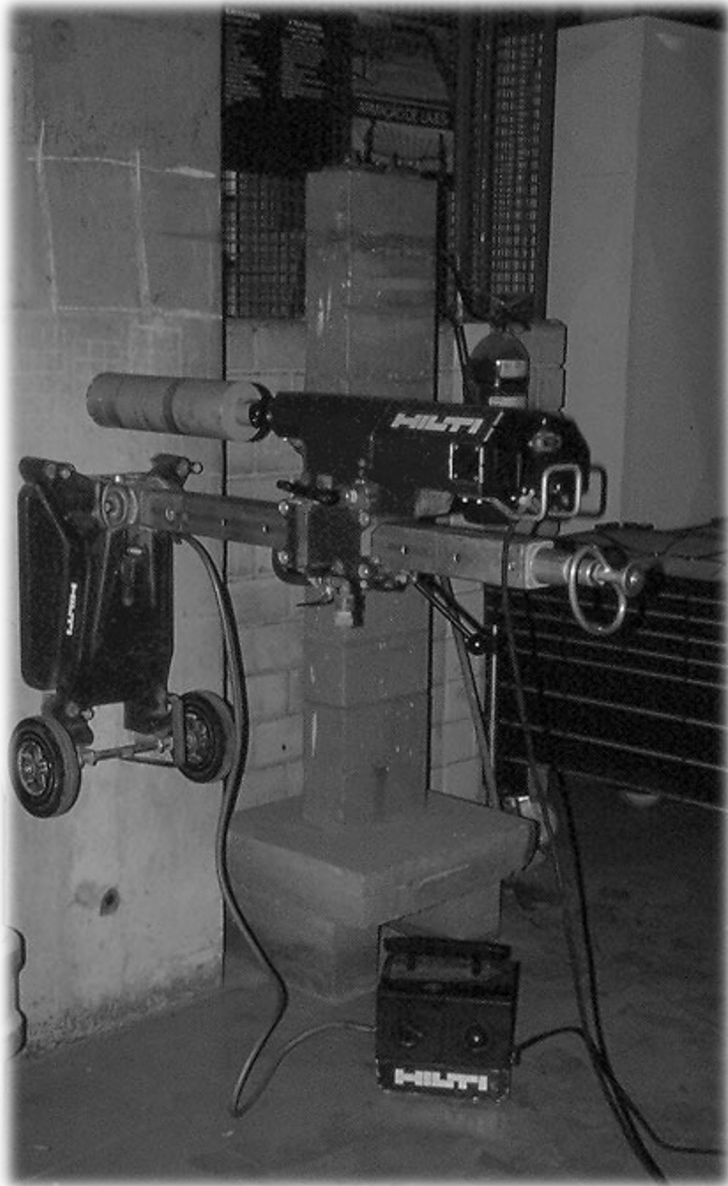
f_c, f_{ck} , módulo, porosidade, absorção de água, carbonatação, cloretos, massa específica, reconstituição traço, AAR, DEF, sulfatos, execução....

Referencial de Segurança $\rightarrow f_{ck}$



corpos de prova moldados $\rightarrow f_{ck,est}$

testemunhos



$f_{c,ext}$

TESTEMUNHOS



$f_{c,ext}$



ABNT NBR 7680:2015 $f_{ck,ext,j}$

ABNT NBR 6118:2014 f_{ck}

ABNT NBR 12655:2015 $f_{ck,est}$

**referencial de segurança
 f_{ck}**

moldado $\rightarrow f_{ck}$ $\rightarrow$ resistência potencial do concreto
estrutura $\rightarrow f_{c,obra}: f_{ck,ais} = f_{ck,real} \rightarrow$ sempre menor
testemunho extraído $\rightarrow f_{c,ext} \rightarrow$ menor ainda

ABNT NBR 6118 ABNT NBR 7680

$\gamma_c = 1,4/1,1 \rightarrow$ portanto $\gamma_c = 1,27 \rightarrow$ portanto se usar $\gamma_c = 1,4$

$\rightarrow$ aumentar f_c do testemunho $*_{1,1}$

ACI 318 * 1,18 média
 * 1,33 individual



Procedimentos de reforço



Sobrecarga



- ✓ Pacometria
- ✓ Carbonatação
- ✓ Esclerometria
- ✓ Testemunhos

ABNT NBR 8802

Ultrassom

vazios internos, módulo, homogeneidade, “resistência”

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

onde: V : velocidade do pulso de ondas longitudinais (m/s);
 E : módulo de elasticidade dinâmico (N/m²);
 μ : coeficiente de Poisson dinâmico;
 ρ : densidade (kN/m³).

A ABNT NBR 8802 (2013) fornece a Equação 2.4 para o cálculo da velocidade de propagação de ondas.

$$V = \frac{L}{t}$$



ultrassom

ultrassom calibragem





ultrassom



ultrassom







**Medida de propagação
de ondas ultrassônicas**

DESCRIÇÃO	SEGMENTO N°	COMPRIMENTO / DISTÂNCIA (m)	TEMPO DE PROPAGAÇÃO (10 ⁻⁰⁵)	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM (m/s)	QUALIDADE DO CONCRETO
VIGA LONGARINA VL4 - FACE OESTE	1-2	0,1	66,1	3953	BOM
	1-3	0,2	116,7		
	1-2	0,1	66,3	4376	BOM
	1-3	0,2	112,0		
	1-2	0,1	62,1	4073	BOM
	1-3	0,2	111,2		
MURO DE ALA AL2 - FACE SUL	1-2	0,1	44,3	3373	ACEITÁVEL
	1-3	0,2	103,6		
	1-2	0,1	47,0	5168	EXCELENTE
	1-3	0,2	85,7		
	1-2	0,1	48,1	3448	ACEITÁVEL
	1-3	0,2	106,1		
LAJE LATERAL EM BALANÇO LB2 - FACE OESTE	1-2	0,1	67,2	1497	PÉSSIMO
	1-3	0,2	20,1		
	1-2	0,1	74,6	1986	PÉSSIMO
	1-3	0,2	175,3		
	1-2	0,1	41,7	1263	PÉSSIMO
	1-3	0,2	200,0		

BS 1881. Testing Concrete

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA NO CONCRETO (m/s)	QUALIDADE DO CONCRETO
> 4500	EXCELENTE
3500 a 4500	BOM
3000 a 3500	REGULAR
2000 a 3000	RUIM
< 2000	PÉSSIMO

- ✓ Pacometria
- ✓ Carbonatação
- ✓ Esclerometria
- ✓ Ultrassom

ABNT NBR 12655

Agressividade

sulfatos externos, cloretos, pH, magnésio, amônia..



**Coleta de material para
detectar a presença
de íons cloreto no concreto**

ABNT NBR 6118:2023 & ABNT NBR 12655:2022

“qualidade do cobrimento”

Tabela 4 Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel (SO ₄) presente na água ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal ^a	Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Conforme Tabela 2	Conforme Tabela 2
Moderada ^b	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa ^c	> 0,20	> 1500	0,45	40

- (a) Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa difusibilidade do concreto ou proteção contra corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.
- (b) A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO₄ seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.
- (c) Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Processo Construtivo Cimento + Gesso → 1981



5.000 unidades (edifícios “térreo+4” e casas)



Video



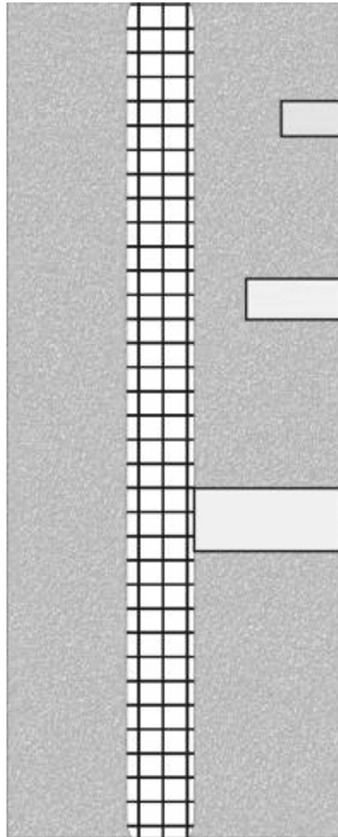
Cloretos

ABNT NBR 12655:2022

Tabela 5 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Cloretos



ACI, CEB, Internacionais

$\leq 0,4\%$ concreto armado

$\leq 0,05\%$ concreto protendido.

Outros agentes agressivos

ABNT NBR 12655:2022

Tabela 6 – Características para concreto exposto a soluções aquosas agressivas

Condições de exposição	pH ^a (ABNT NBR 16937-7)	CO ₂ agressivo mg/L (ABNT NBR 16937-5)	Íon magnésio mg/L (ABNT NBR 16937-3)	Íon amônia mg/L (ABNT NBR 16937-2)	Resíduo sólido mg/L (ABNT NBR 16937-4)	Sulfatos ppm (ABNT NBR 16937-6)	Máxima relação água/cimento ^a	Mínimo f _{ck} MPa
Fraca	7 a 6	< 30	< 100	< 100	> 150	< 150	Conforme a Tabela 2	Conforme a Tabela 2
Moderada	6 a 5,5	30 a 45	100 a 200	100 a 150	150 a 50	150 a 1 500	0,50	35
Severa	< 5,5	> 45	> 200	> 150	< 50	> 1 500	0,45	40

^a Propriedade adimensional.

NOTA Esta Tabela não é exaustiva e, para casos em que as soluções aquosas apresentem movimentação, temperatura elevada, maior mobilidade iônica, valores de pH diferentes ou outros, recomenda-se consultar a literatura técnica aplicável aceita pela comunidade tecnocientífica internacional, como as constantes na Bibliografia desta Norma.

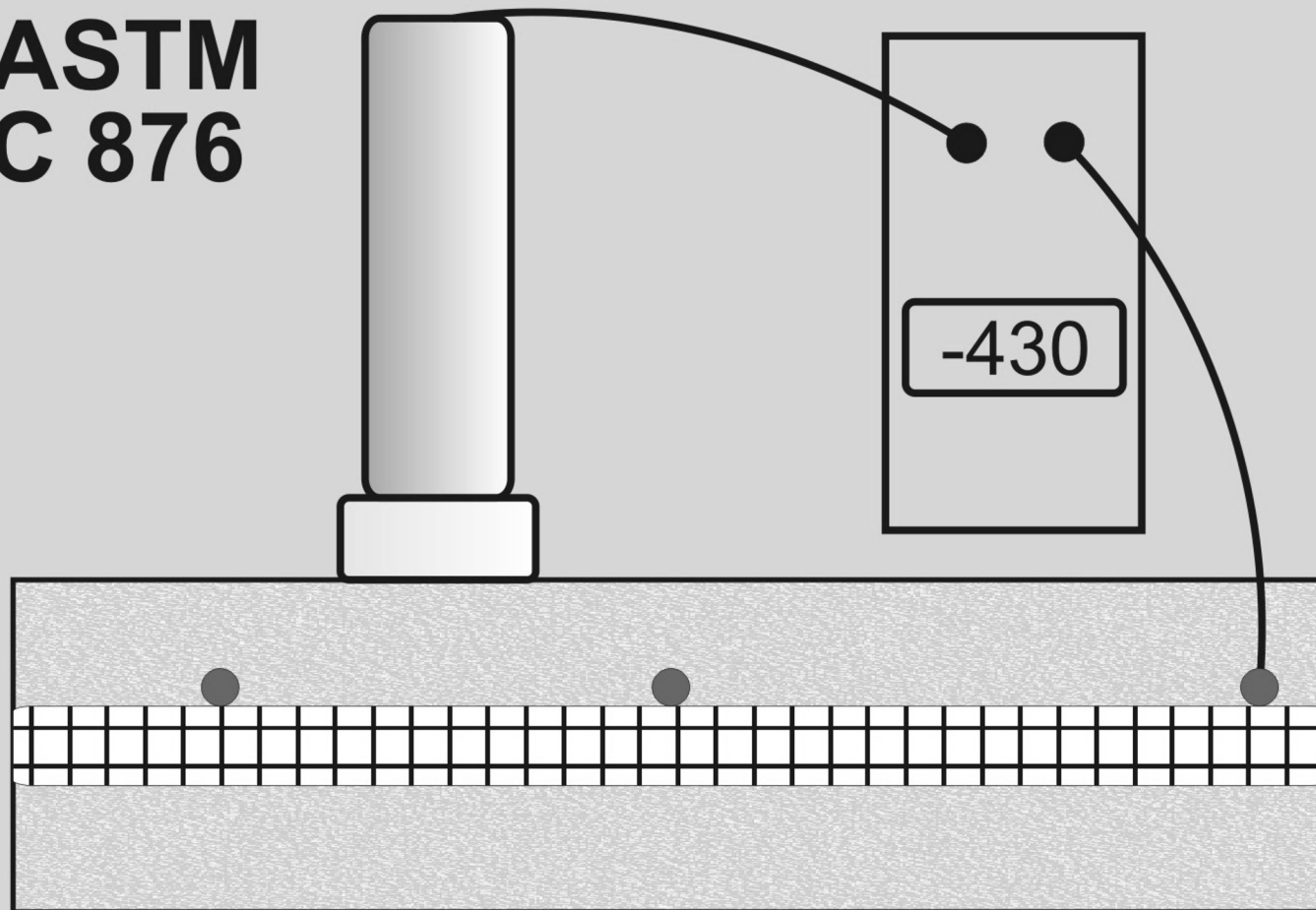
- ✓ Pacometria
- ✓ Carbonatação
- ✓ Esclerometria
- ✓ Ultrassom
- ✓ Cloretos, sulfatos

ASTM C 876

Potencial de Corrosão

*equilíbrio termodinâmico instantâneo, passivado
ou despassivado*

**ASTM
C 876**



Potencial de corrosão







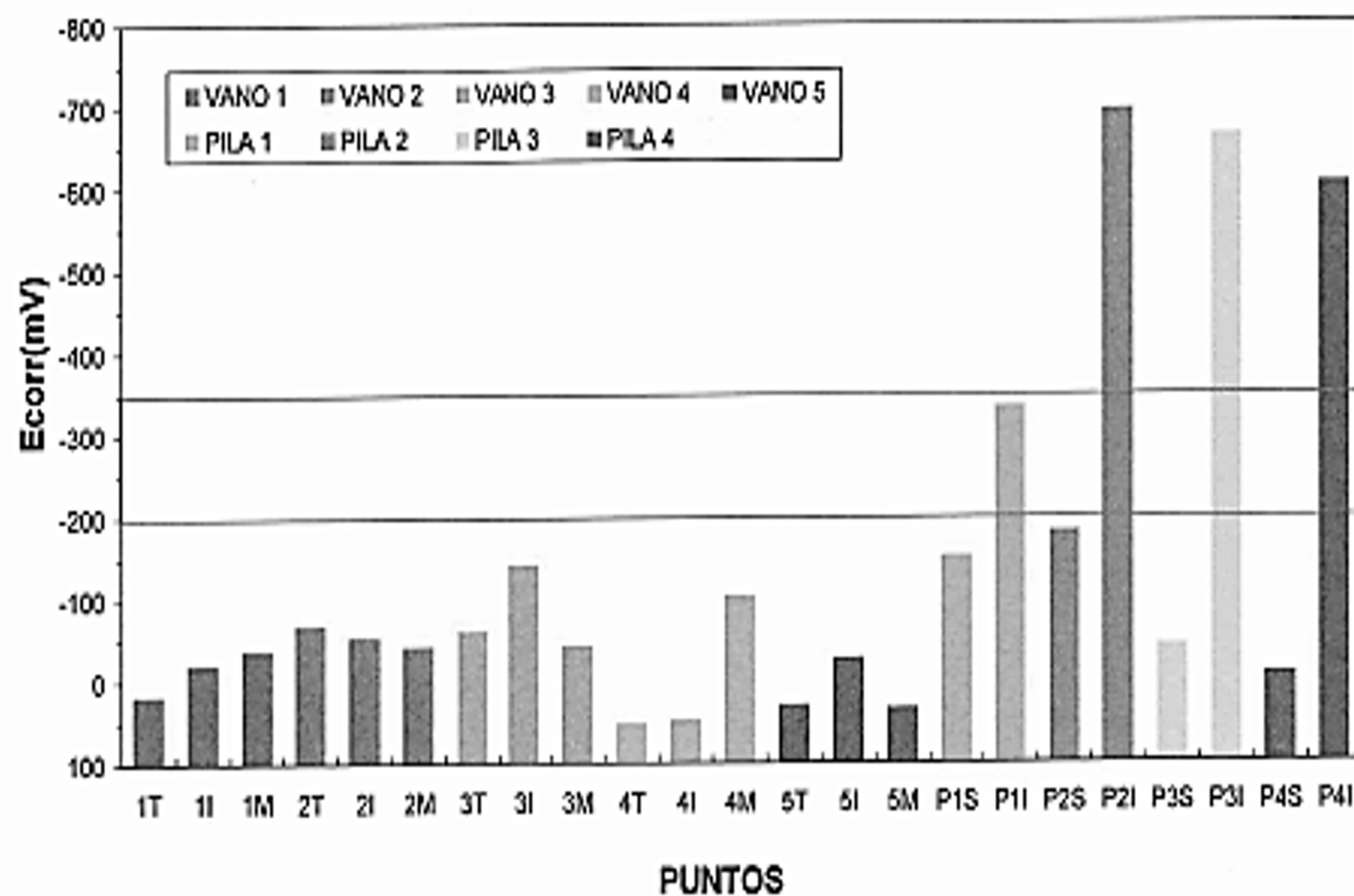
POTENCIAL DE CORROSÃO

Critérios de avaliação segundo a ASTM C-876

E_{corr} (mv, Cu/SO ₄ Cu)	PROBABILIDADE DE CORROSÃO
> -200	< 5%
entre -200 e -350	50%
< -350	> 95%

A utilização dessa técnica para a obtenção de um mapa de linhas equipotenciais pode ser bastante útil no momento de identificar as regiões de caráter anódico de uma estrutura de grandes dimensões (FIGUEIREDO et al., 1991). Esses mapas têm sido usados para planejar trabalhos de reparo de estruturas de concreto.

POTENCIAL DE CORROSIÓN



[illegible]



DESABAMENTO da ponte sobre o RIO TOCANTINS! O Que Levou à queda da Po...



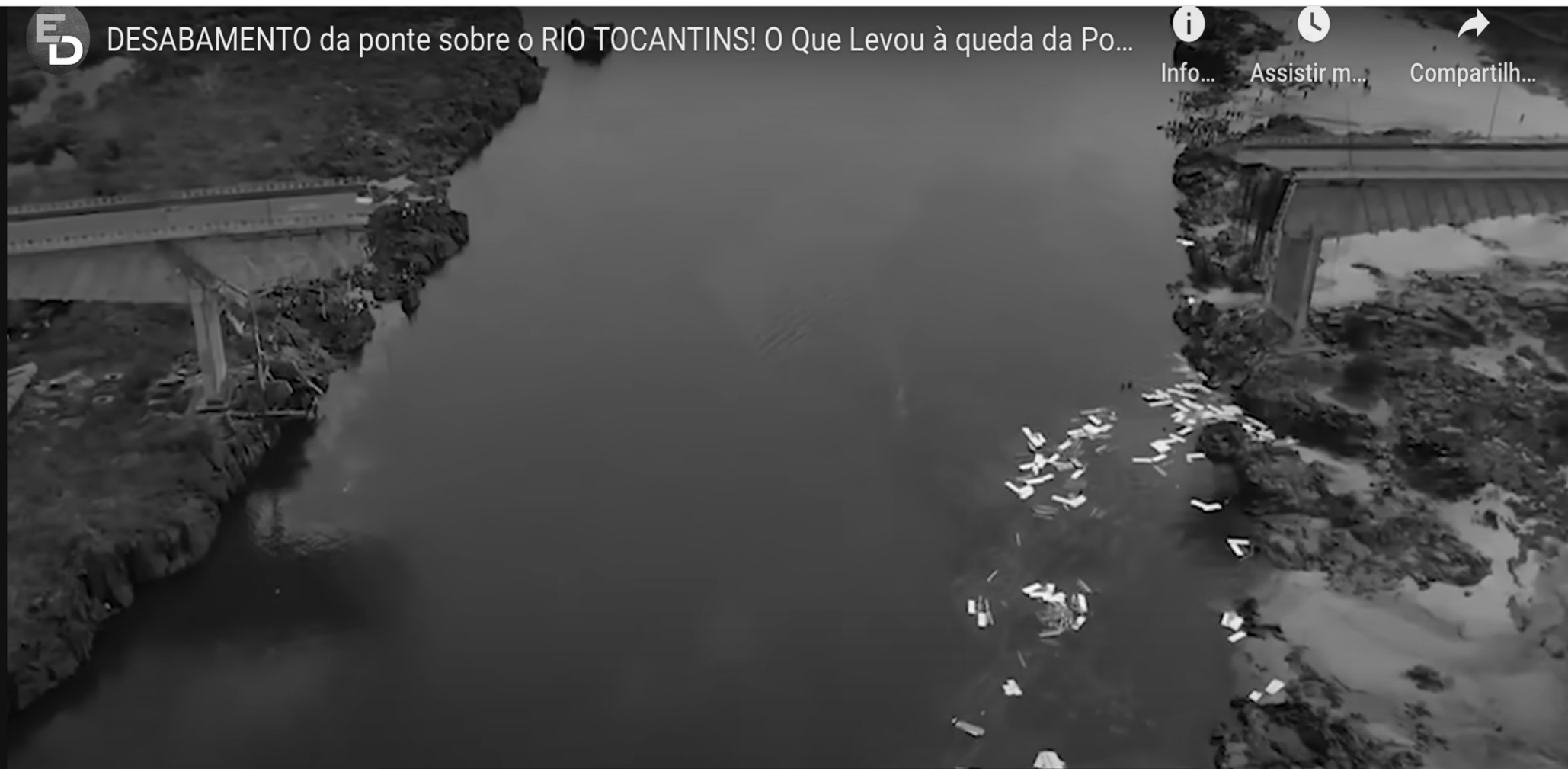
Info...



Assistir m...



Compartilh...



4/17/25, 5:32 AM

Dresden bridge failure caused by hydrogen-induced stress corrosion, report confirms | New Civil Engineer



Dresden bridge failure caused by hydrogen-induced stress corrosion, report confirms

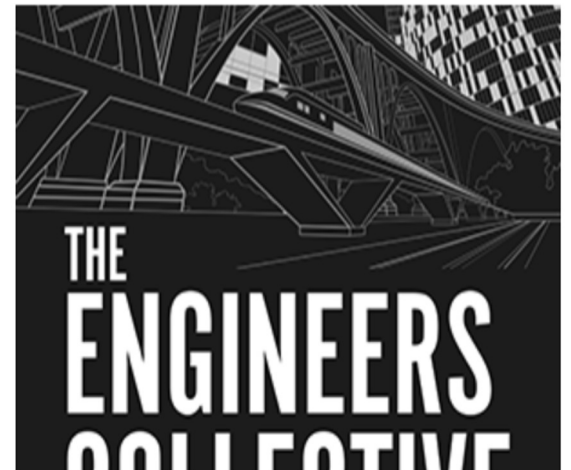
19 DEC, 2024 | BY ROB HAKIMIAN

Hydrogen-induced stress corrosion cracking has been identified as the primary cause of the failure of the Carola Bridge in Dresden earlier this year.

The City of Dresden has received a comprehensive report from Professor Steffen Marx of the Institute of Concrete Structures at TU Dresden, regarding the catastrophic collapse of the Carola Bridge on September 11, 2024.

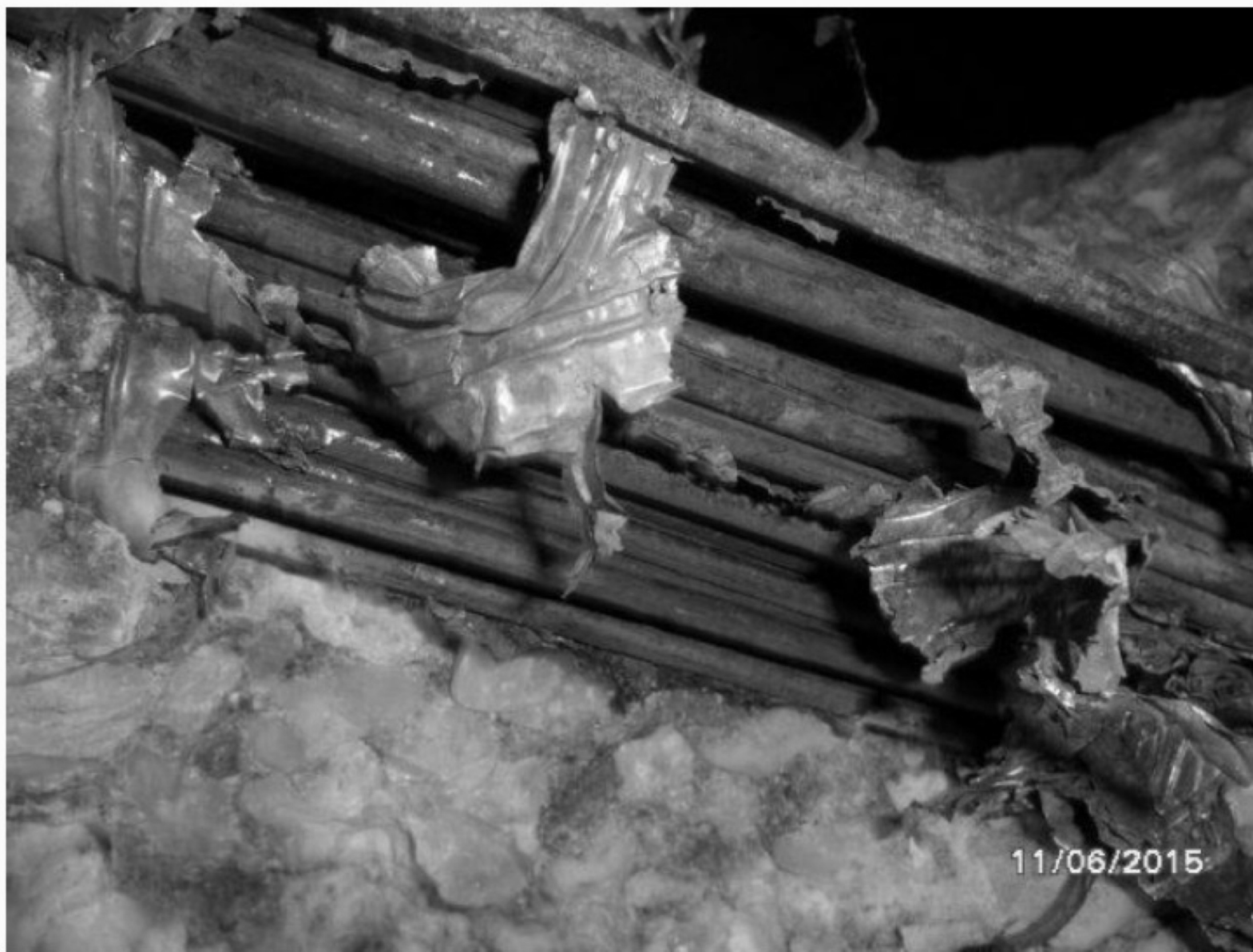
The findings, presented to the city's building committee on December 11, 2024, highlight that corrosion damage to the bridge's steel components played a critical role in the incident.

PODCAST



Corrosão sob tensão → fragilização por hidrogênio nascente
Como Inspeccionar Cabos de Protensão?





Pitting Corrosion in Prestressed Piles

by Gray Mullins, Rajan Sen, David Ostrofsky, and Kwangsuk Suh

This study characterized pitting corrosion in prestressed piles, linked it to stress concentration factors through ultimate strength tests, and incorporated the findings into a simple predictive damage assessment model. Six one-third-scale Class V concrete prestressed piles were exposed for 38 months to outdoor tidal cycles simulating a marine environment. At the end of exposure, 24 strands were extracted from the piles, and corrosion loss along the strands was quantified using a new Pascal's law-based strand profiler. This identified regions of locally higher steel loss caused by pitting corrosion. The same data set was used to confirm gravimetric loss measurements by summing localized section losses over the specimen length. Profiler data was complemented by microscopic imaging to further define pitting geometry. Ultimate load tests were conducted to examine the effect of pitting on residual tensile strength and ductility. Similitude principles were used to develop a model for predicting in-service stress in pile strands using available inspection report crack width data.

Keywords: gravimetric; imaging; marine; model; pitting; prestressed piles; profile; stress concentration (SC); tensile test.

INTRODUCTION

Pitting or localized corrosion is characteristic of chloride exposure damage. It refers to metal loss in the form of holes or pits at random locations on the steel surface and can occur with little or no corrosion elsewhere. Because of this randomness and nonuniformity, it is more dangerous because estimates of residual strength based on uniform corrosion losses can be unreliable. Therefore, much of the research has been directed toward developing simplified models for characterizing pitting geometry, which are used for estimating residual tensile strength.

Pitting corrosion is prevalent in prestressed concrete piles in coastal areas exposed to tidal cycles. The smooth prestressing steel surface ensures the passive oxide film that forms inside an alkaline concrete environment adheres securely. In contrast, rib deformations in reinforcing steel prevent this passive film from being similarly well bonded. As a result, it can be dislodged at multiple locations, and metal loss is more uniform. In this context, it is surprising that more studies have investigated pitting corrosion in reinforced concrete specimens than in prestressed specimens.¹

In the late 1980s, the Florida Department of Transportation (FDOT) began revising specifications, requiring prestressed piles exposed to aggressive chloride environments to be fabricated using high cementitious, low water-cement ratio (w/c), Class V concrete. This low-diffusion concrete was expected to improve durability by increasing the time for chloride ions to diffuse through the concrete cover and depassivate the protective oxide layer on the steel surface. Later, in the early 1990s, FDOT sponsored a research study

to conduct detailed substructure surveys to assess the performance of the new concrete.² Six of the 13 bridges evaluated were fabricated using Class V concrete. At the time of the survey, the prestressed piles were relatively new, ranging in age from 2 to 10 years.

The FDOT survey identified the presence of some shrinkage cracks—and, more importantly, vertical cracks—on the face of the piles, through the cover concrete, and to the level of the steel. Core samples taken near the waterline from different bridges indicated chloride concentrations at the level of the steel were an order of magnitude higher at the cracked locations.³

The much faster chloride-ion transport through cracked concrete ensured it would reach the corrosion initiation threshold range of 0.6 to 0.9 kg/m³ (1 to 1.5 lb/yd³)⁴ earlier and destroy the protective passive oxide layer. Localized or pitting corrosion was thereby initiated, driven by the potential difference between the relatively small, cracked region (where the passive film was destroyed) and the surrounding sound concrete sections (where it remained intact).⁵

PREVIOUS RESEARCH

The sudden and catastrophic failure of prestressed bridges in Italy, the United Kingdom, and elsewhere prompted research on pitting corrosion in prestressing steel.^{6,7} Given this legacy of structural failure, research focused on idealizing observed pitting damage and developing closed-form expressions of the net cross-sectional area¹⁻⁷ to allow residual tensile strength to be reliably estimated.

The prestressing wire/strand samples evaluated in these studies were either retrieved from accelerated exposure testing laboratory specimens^{8,9} or obtained from decommissioned beams that had corroded because of outdoor chloride exposure.^{1,10} Sample length evaluated varied from 100 to 1000 mm^{1,10} (4 to 39 in.) depending on the scope of the investigation and how measurements were undertaken.

Geometric characterization

In most steel loss studies, the volume of a sample was determined from its length, width, and depth. Calipers were typically used. However, Jeon et al.¹⁰ used an ASTM G46-21¹¹ recommended gauge containing a retractable needle, which made it more convenient for measuring pit depth. This was used to characterize the pitting geometry

ACI Structural Journal, V. 122, No. 3, May 2025.
MS No. S-2023-304.R1, doi: 10.14359/51745641, received June 12, 2024, and reviewed under Institute publication policies. Copyright © 2025, American Concrete Institute. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors. Permission to discuss including author's closure, if any, will be published ten months from this journal's date if the discussion is received within four months of the paper's print publication.

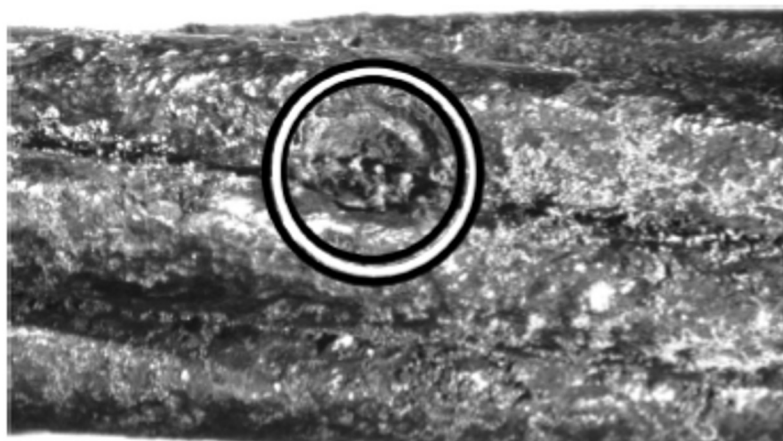


Fig. 10—Example of small-size pit (sample 46BC); image is 12.6 mm (0.5 in.) wide and 9.5 mm (0.375 in.) high.

their frequency was categorized as low, medium, or high. Table 2 summarizes damage scale thresholds.

The strands displayed differing corrosion states, collectively ranging from the initial surface corrosion to high frequency, large pits, and strands with wires completely broken. Pitting was most commonly observed, with some areas showing concentrated damage and others showing more distributed damage covering differing lengths. Because pitting is localized, ultimate strength can be significantly reduced despite a comparatively small percent difference in the overall gravimetric steel loss. Figures 10 to 12 show examples of small, medium, and large pitting corrosion damage, respectively. All microscope images represent a 12.6 mm (0.5 in.) wide and 9.5 mm (0.375 in.) high viewing window. Table 1 lists the corrosion state for all strands.



Fig. 11—Example of medium-size pit (sample 39AB); image is 12.6 mm (0.5 in.) wide and 9.5 mm (0.375 in.) high.

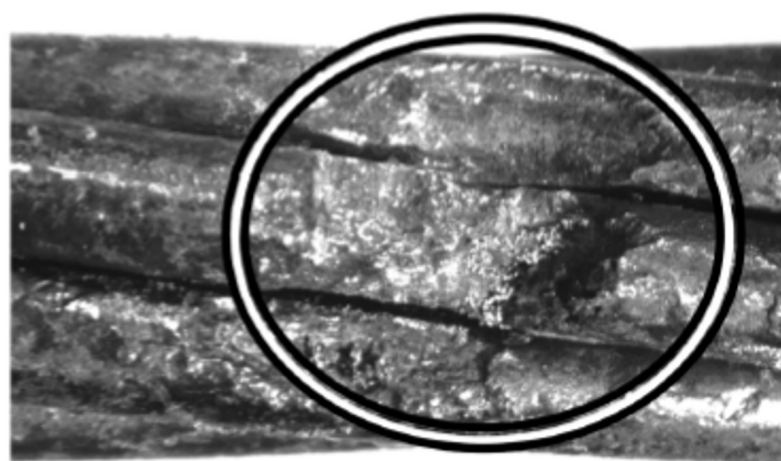


Fig. 12—Example of large-size pit (sample 38CD); image is 12.6 mm (0.5 in.) wide and 9.5 mm (0.375 in.) high.

CONCLUSIONS

Pitting corrosion in prestressed piles has not been investigated before. This paper is the culmination of multiple research studies extending over a 25-year period and advances the state of knowledge and practice in three distinct areas: 1) developi

profiler to characterize stress concentration (SC) reduction through ultimate simple, conservative mo uses routinely collected nance authorities a ration

The following are the study:

1. The application of P a simple, accurate, and pitting corrosion damage measurement resolution to be controlled by altering the scan rate. The same data set can also be used to characterize gravimetric or uniform corrosion metal loss (Eq. (5), Fig. 8). As noted earlier, profiling can only be performed on extracted strands, which is necessary to better understand the morphology of strand section loss

2. The relationship between uniform and pitting corrosion given by the pitting factor (Table 1) varied between 2.6 and 7.94. Its average value was 4 (Fig. 9)—that is, the localized cross-sectional area from pitting loss was four times the uniform loss.

2. The relationship between uniform and pitting corrosion given by the pitting factor (Table 1) varied between 2.6 and 7.94. Its average value was 4 (Fig. 9)—that is, the localized cross-sectional area from pitting loss was four times the uniform loss.

Corrosão de armaduras

➤ Condições para ocorrência no concreto

3. Oxigênio + “água” → “ferrugem”





Ponte em Recife

- ✓ Pacometria
- ✓ Carbonatação
- ✓ Esclerometria
- ✓ Ultrassom
- ✓ Cloretos, sulfatos
- ✓ Potencial de corrosão

ABNT NBR 15577
Reação Álcali-Agregado
AAR

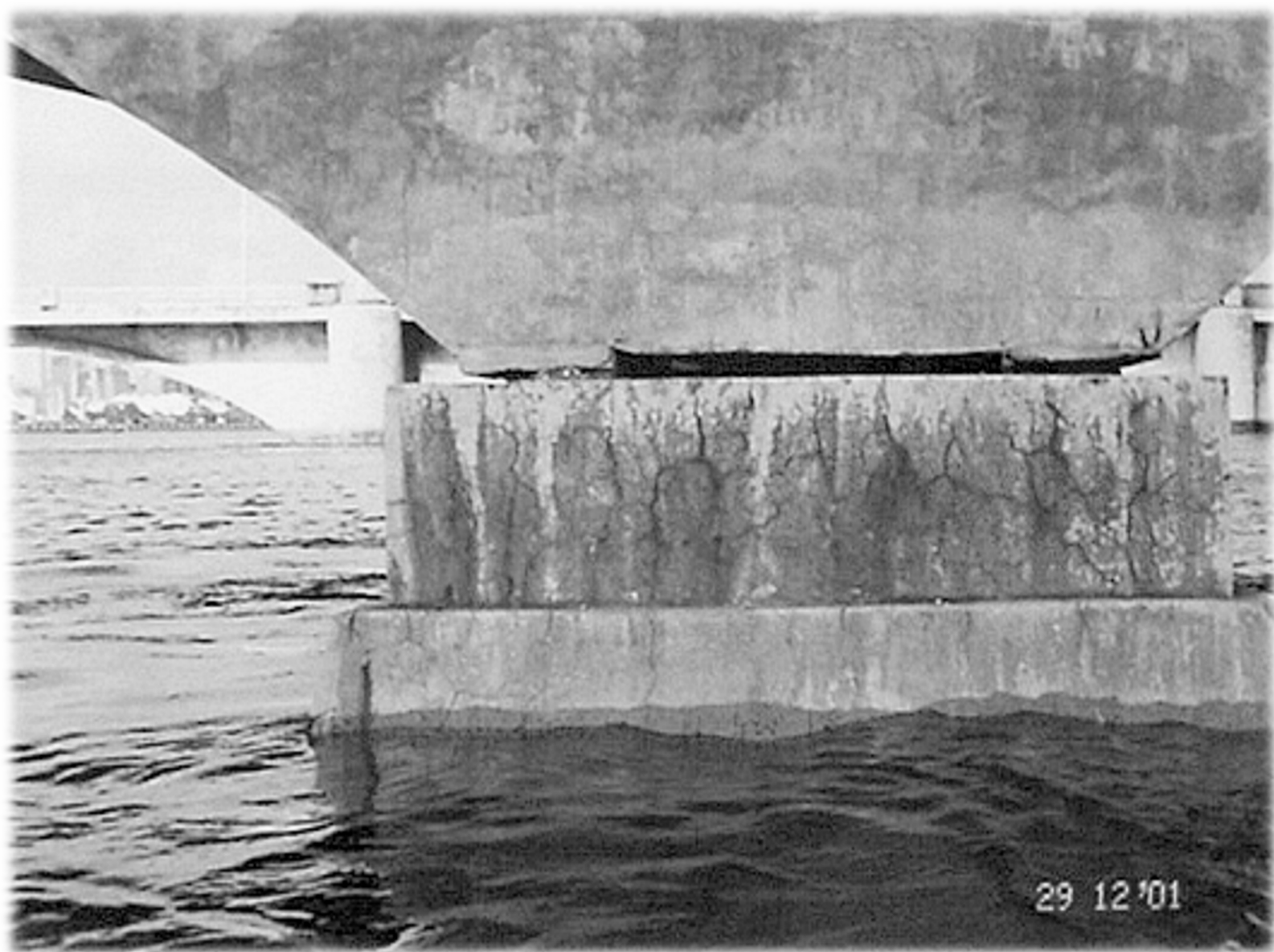




Ponte Paulo Guerra, Recife, PE



acervo de Paulo Helene



Ponte Paulo Guerra

Recife PE → 2002

inaugurada 1980 22 anos

blocos de fundação $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$

Tabuleiro de concreto armado

$f_{ck} = 22 \text{ MPa}$

sobre rio, junto ao mar, fora de respingos



acervo de Paulo Helene



acervo de Paulo Helene



acervo de Paulo Helene

Diagnóstico → “*in loco*” e em laboratório (testemunhos)

- Observação visual
- Data, idade, anamnese
- Características originais do concreto
- Projeto estrutural
- Resistência à compressão
- Módulo (ultrassom)
- Ensaio de expansibilidade
- Petrografia ASTM C 856
- Difração Raios X
- Microscopia eletrônica e estereoscópica
- Espectroscopia Energia Dispersiva
- Espectroscopia Infravermelho
- Termogravimetria

Tests for Alkali-Aggregate Reaction

A case study of a bridge in Brazil

BY PAULO HELENE, M. FERNANDA PEREIRA, AND PEDRO CASTRO

The Paulo Guerra Bridge in Recife, Brazil, was constructed in 1977. Because the bridge is subject to marine spray as well as wet and dry cycles, it can be considered to be in a marine environment.¹ It is therefore not surprising that signs of deterioration are already evident on the deck, superstructure, and substructure. This article provides a summary of the inspection (previously provided in Portuguese) and the recommended repairs for the bridge's foundation blocks (pile caps).² These blocks were constructed using precast, reinforced concrete boxes that served as permanent forms for cast-in-place footings connecting the bridge piers to supporting piles (Fig. 1).

INSPECTION AND TESTING

Visual inspection of the foundation blocks was performed according to well-established procedures.³ Stains typical of corrosion and leaching were detected, as well as cracks with defined paths (Fig. 1). Possible explanations for the cracking included expansion due to corrosion products, expansive reactions (alkali-aggregate reaction [AAR] or sulfate attack), or delayed hydration of magnesium or calcium oxides.

Figure 2 is a schematic view of the bridge, showing the relative locations of the foundation blocks. A commercially

available pachometer was used to detect bars in the concrete. Ultrasonic pulse tests⁴ were conducted, as well as tests for carbonation,⁵ chloride concentration,⁶ electrochemical resistivity,⁷ and corrosion potential.⁸ Because of the concrete thickness, it was not possible to measure corrosion rate.

Concrete cores were obtained at several locations and were used to determine compressive strength⁹ and modulus of elasticity.¹⁰ Further, portions of these cores were used for petrographic evaluations.^{11,12}

OBSERVATIONS

Ultrasonic pulse velocity tests indicated that velocity increased with depth. Compressive strength and modulus of elasticity values taken from cores are shown in Table 1. As with the pulse velocity results, the strength and elastic modulus values increased with depth.

As expected in a marine environment, the depth of carbonation was insignificant.

The specified concrete cover for the blocks was 100, 150, and 125 mm (4, 6, and 5 in.) for the top, bottom, and side bars, respectively. Although the minimum cover measured using the pachometer was close to 80 mm (3.1 in.), corrosion potential was generally between

Revista
Concreto & Construções
57
Ano XXXVIII
Jan. • Fev. • Mar. 2010
ISSN 1809-7197
www.ibracon.org.br

pesquisa aplicada
ensaio acelerado brasileiro

Reação álcali-agregado - Método Acelerado Brasileiro de Prismas de Concreto (ABCPT)

LEANDRO SANCHEZ - MSc - DOUTORANDO
UNIVERSITÉ LAVAL

SELMO KUPERMAN - DIRETOR
DESEK

PAULO HELENE - PROFESSOR TITULAR
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

RESUMO

Muitos são os métodos de ensaio de laboratório que vêm sendo atualmente utilizados na prevenção da reação álcali-agregado (RAA). Dentre estes, destacam-se: a análise petrográfica, preconizada pela NBR-15577-3 ou ASTM C 295; o método acelerado de barras de argamassa (AMBT), preconizado pela NBR 15577-4 ou ASTM C 1260; e o método de prismas de concreto (CPT), preconizado pela NBR 15577-6 ou ASTM C 1293. Entretanto, ainda não existe um ensaio que seja consenso no

seis agregados (granito de Embu das Artes, seixo de quartzo de Três Lagoas, basalto de Americana, basalto de Birigui, milonito de Recife e calcário de Spratt, Canadá). Os agregados foram testados pelos métodos ABCPT e CPT e, após a confecção dos ensaios, uma análise comparativa entre os métodos foi realizada. Paralelamente aos ensaios de expansão, foi feita a análise petrográfica das amostras. Os resultados indicam que o ABCPT demonstra grande potencial para utilização na análise e classificação de agregados em obras correntes de engenharia,

Guia de Prevenção da Reação Álcali-agregado



A publicação em e-book e edição impressa será lançada no 60º Congresso Brasileiro do Concreto às 16 horas do dia 19 de setembro próximo, em Foz do Iguaçu (PR).

Essa atividade sucedeu uma contribuição anterior do CT-201, que ofereceu ao CB18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados da ABNT sete textos-base, elaborados pelo mesmos especialistas e que deram os subsídios técnicos para as novas normas ABNT NBR 15577, partes 1 a 7, sobre RAA lançadas pela ABNT, em julho passado.

Está na agenda do CT-201 a elaboração de outra Prática Recomendada ligada ao tema, que abordará os diagnósticos da ocorrência de RAA em campo e em condições laboratoriais.

PATROCÍNIO

EMBU

Ação do fogo

- Perda de aderência entre aço e concreto (descaracteriza comportamento estrutural previsto no projeto);
- Aumento de flechas e deformações;
- Ruptura parcial ou total.

Incêndio Viaduto Santo Amaro

São Paulo/SP

Acidente: 13/02/2016,
madrugada de sábado

atualmente em uso

13/02/2016 07h30 - Atualizado em 13/02/2016 17h09

Acidente entre caminhões causa fogo e fecha Avenida Bandeirantes, em SP

Uma das carretas estava carregada de gasolina e houve uma explosão. Motorista disse que tentou desviar de carro e passou por semáforo fechado.

Do G1 São Paulo



Um acidente envolvendo um caminhão bi trem e um caminhão-tanque carregado com gasolina na Avenida dos Bandeirantes, Zona Sul de São Paulo, causou explosão na madrugada deste sábado (13). A colisão traseira ocorreu embaixo do Viaduto Santo Amaro, sentido Imigrantes, e a estrutura pode ter sido abalada, segundo o Corpo de Bombeiros. O incêndio foi controlado por volta das 6h20.

<http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2016/02/acidente-entre-caminhoes-causa-fogo-e-fecha-avenida-bandeirantes-em-sp.html>



<http://veja.abril.com.br/brasil/apos-acidente-e-incendio-defesa-civil-interdita-viaduto-santo-amaro-que-pode-ser-ate-demolido/>

► inspeção e manutenção

Recuperação e reabilitação estrutural do Viaduto Santo Amaro

MAURO LEMOS DE FARIA – GERENTE DE PROJETOS

CATÃO F. RIBEIRO – DIRETOR TÉCNICO E COMERCIAL

ENESCIL ENGENHARIA DE PROJETOS





► **Figura 1**

Vista inferior do vão central do Viaduto Santo Amaro, após ser atingido por incêndio

- Ensaios em testemunhos de concreto extraídos da estrutura mostraram que o concreto remanescente ainda possui resistência à compressão satisfatória, inclusive em diversos casos acima da resistência característica especificada em projeto até 70,2 MPa, para $f_{ck} = 30\text{MPa}$



► **Figura 9**

Imagem de uma das regiões do viaduto onde foram retirados os corpos de prova

- Amostras de armaduras CA-50 na região atingida pelo fogo também foram ensaiadas com resultados satisfatórios.
- Em média, o limite de escoamento ficou em 484 MPa (-3,2%), com menor resultado igual a 442 MPa

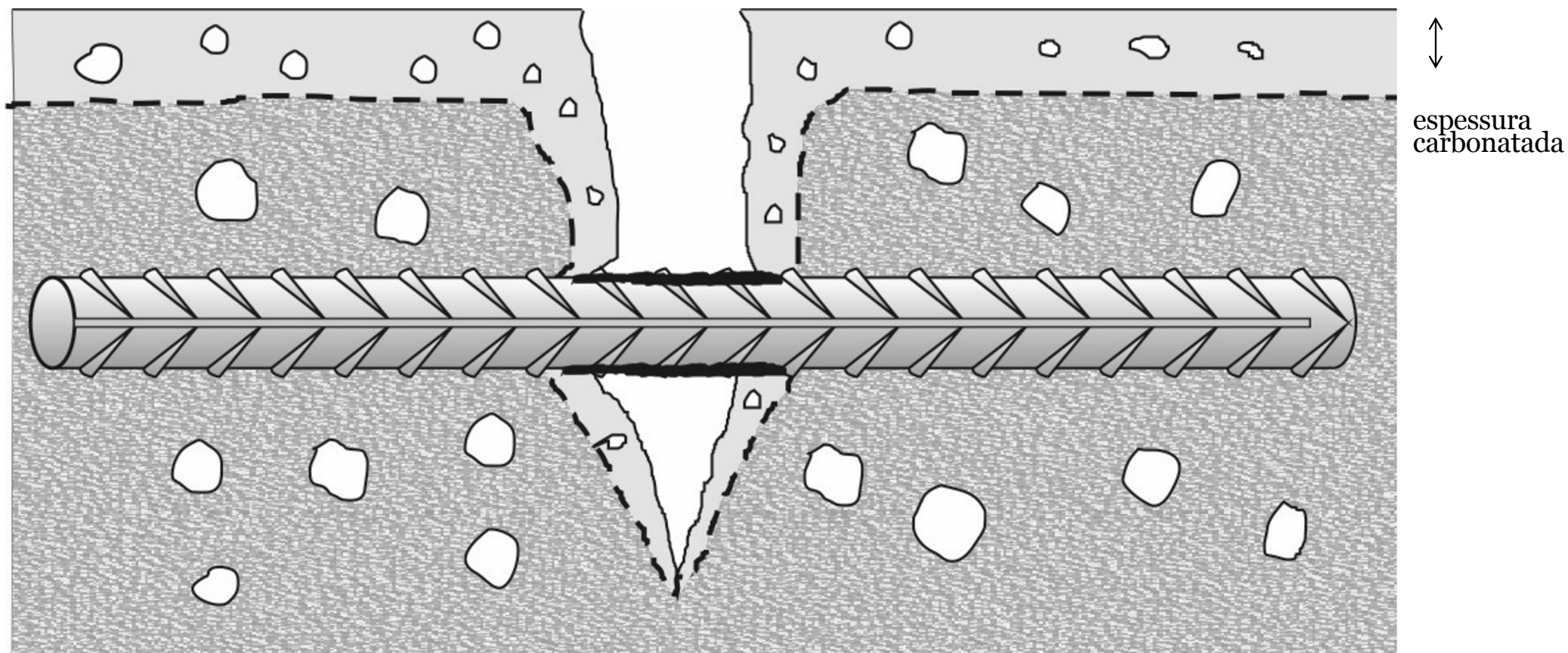
para $f_{sk} = 500$ MPa

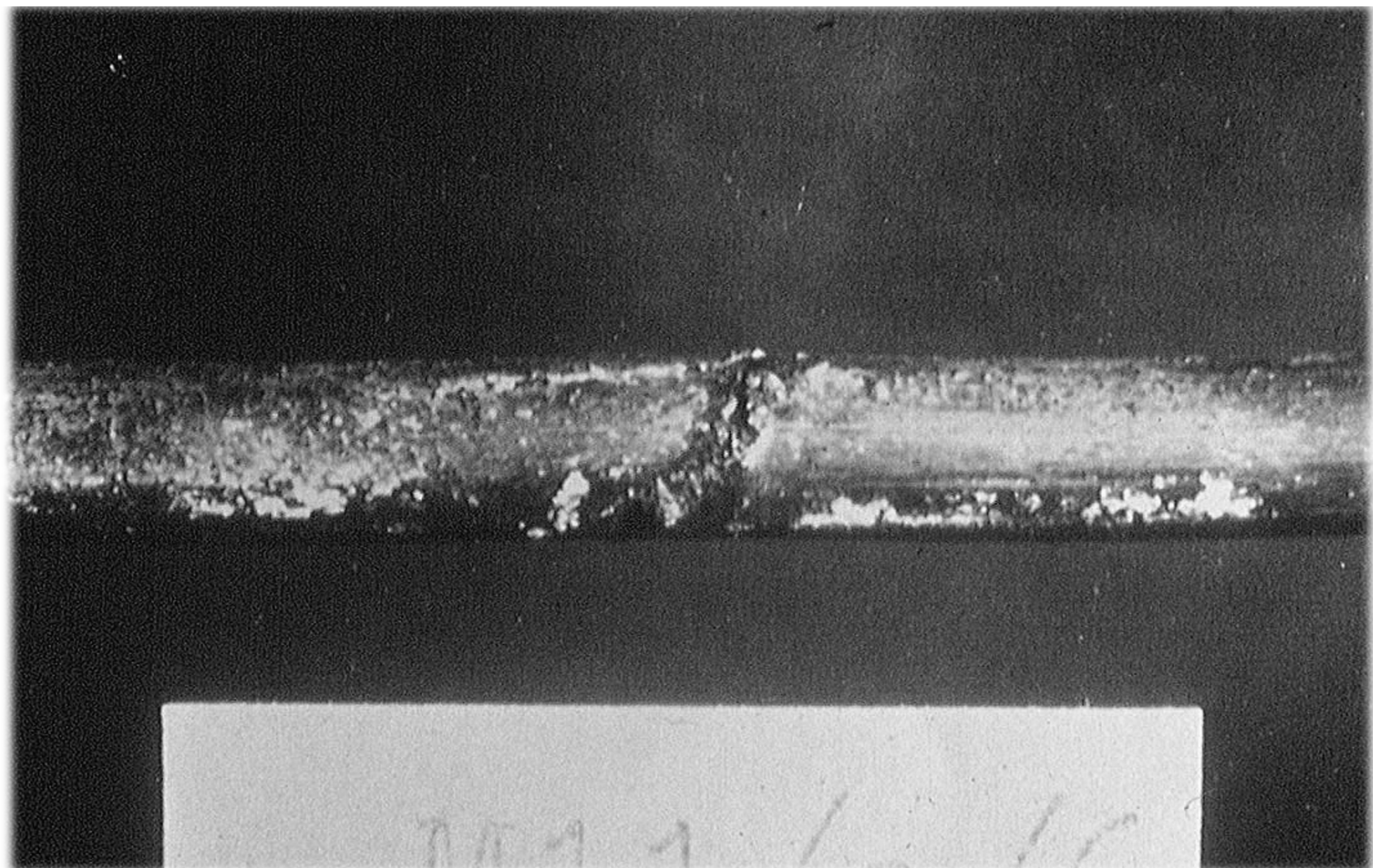


► **Figura 8**

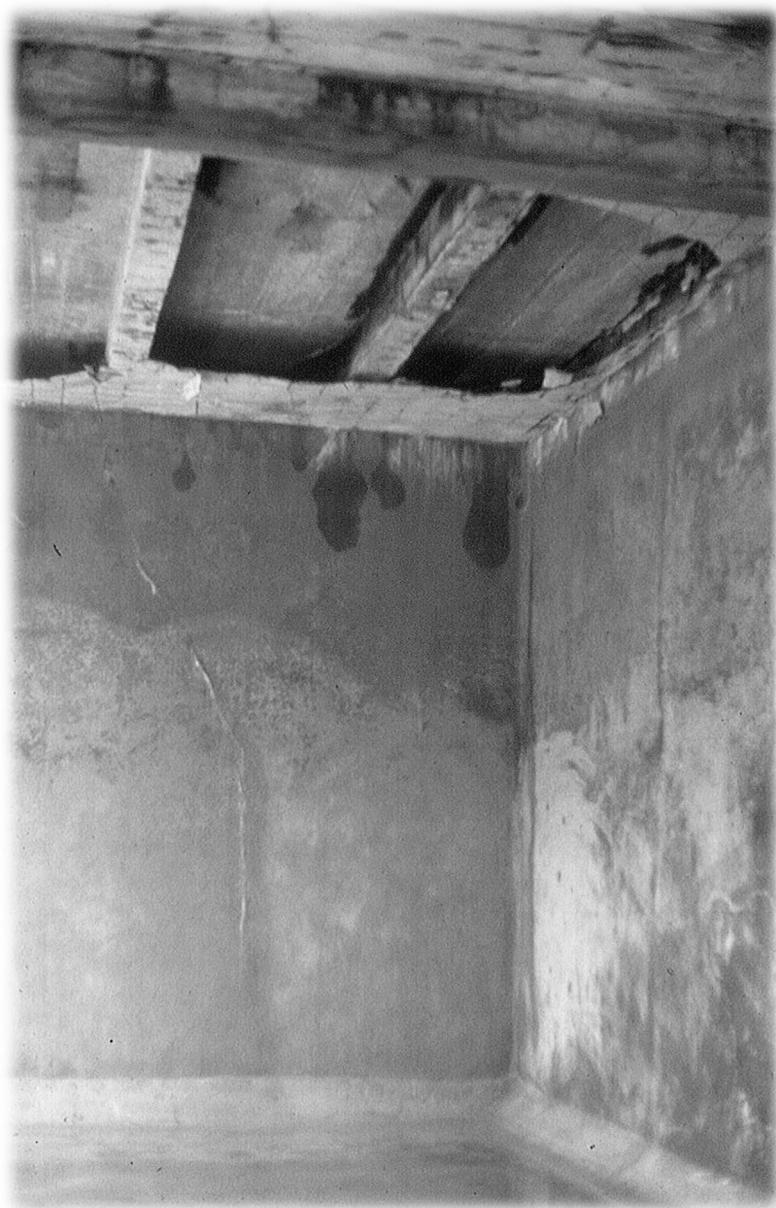
Detalhes da região do viaduto mais afetada pelo incêndio, onde é possível ver as bainhas de protensão

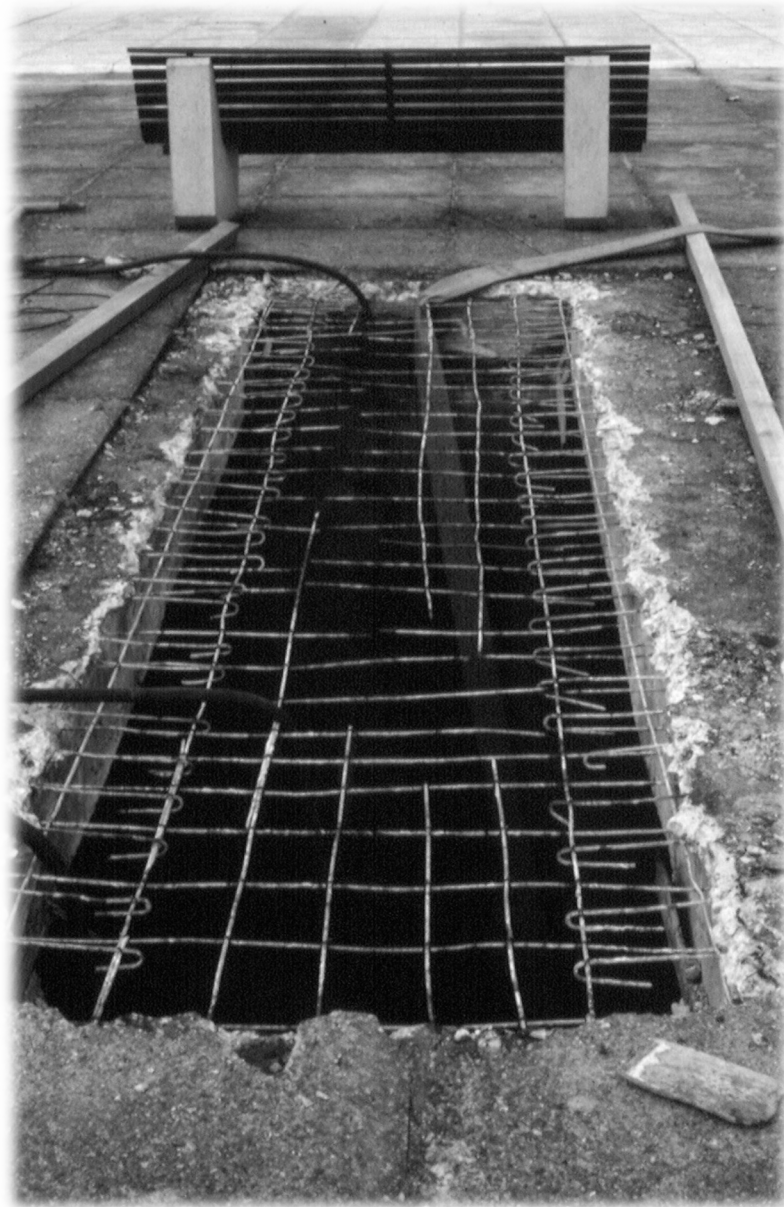
Fissuração













o de Processo Penal e as leis de execução penal e de economia popular. Com as alterações, acaba a lei Fleury, que permitia aos réus primários responder processo em liberdade.

Página 4

Agricultura e Saúde brigam pelos dietéticos

Os refrigerantes dietéticos são disputados por dois ministérios. O da Saúde publica hoje no Diário Oficial uma liberação para o comércio, pela Antartica e pela Coca-Cola. O da Agricultura avisa: mandará apreendê-los.

Página 24

Bom tempo para viajar no feriado

Quem vai passear no fim de semana pode contar com bom tempo. Os bancos fecham hoje e só reabrem terça. Os postos de gasolina estão liberados para funcionar domingo e segunda.

Página 13

TURISMO

Boston é conhecida pela Universidade de Harvard, a mais tradicional dos Estados Unidos, e a tonalidade vermelha de seus prédios. Mas a capital de Massachusetts, na região da Nova

ves para os empregados do Departamento Nacional de Produção Mineral. Ontem, o presidente José Sarney resolveu conceder-lhes um reajuste salarial entre 95% e 120%.

Página 26

Marquise cai e mata nove em Porto Alegre

Nove pessoas morreram, entre as quais uma criança, dez ficaram gravemente feridas e outras 30 sofrem escoriações leves com o desabamento, ontem à tarde, da marquise da Loja Arapua, no centro de Porto Alegre, na rua Doutor Flores. No momento do acidente, muitas crianças estavam na frente do prédio, recebendo doces de funcio-

obediência a nova Carta, será permitido o registro de candidaturas votadas por tribunais regionais porque a Constituição anterior fixava prazo de um ano para o domicílio eleitoral.

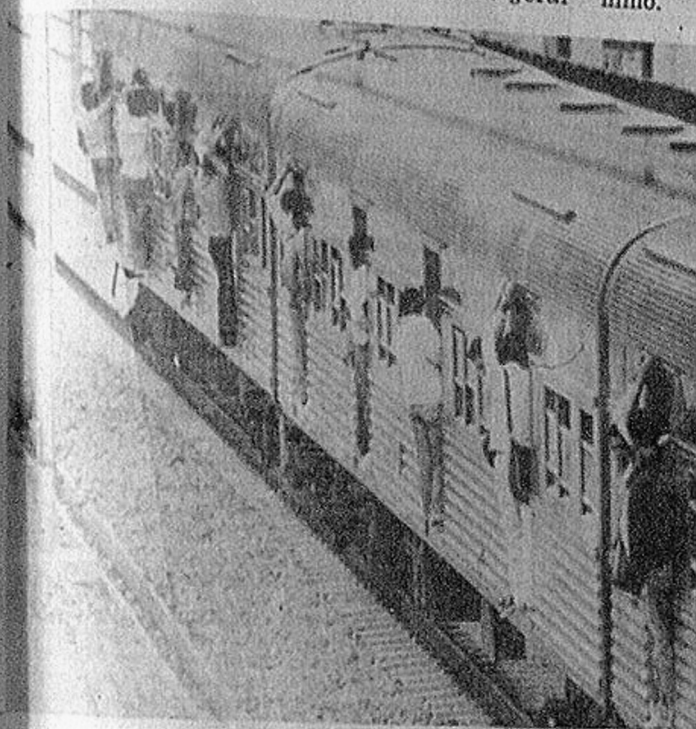
nários, numa promoção da loja. O estrondo provocado pela queda das lajes de concreto espalhou o pânico entre as pessoas que passavam, dificultando o trabalho do Corpo de Bombeiros de remoção das vítimas. Técnicos do Instituto de Criminalística da Polícia Civil estiveram no local, mas o resultado da perícia ainda demorará dias.

Página 14

celas não precisarão cumprir o limite do tabelamento dos juros de 12% ao ano imposto pela nova Constituição. O Banco Central emitiu ontem uma circular estabelecendo que, en-

quanto não sair a lei regulamentadora do sistema financeiro, continuarão a valer as normas atuais. O esclarecimento foi feito depois que o presidente José Sarney aprovou o parecer do consultor-geral

da República, Carlos de Araújo Alencar Gomes. O publicado hoje. Em consulta uma pos- beas data nimo.



Osúrbio da CBTU entre Jundiaí e Paranapiacaba: o perigo, a violência e

Para PM, fogo no trem foi planejado

A Polícia Militar acredita que o incêndio do trem da CBTU na quarta-feira tenha sido uma ação premeditada, pos-

Notas e Informações

Apesar de todo o autoritarismo e de todo o temor que parecia inspirar, o governo do general Augusto Pinochet realizou um plebiscito livre e

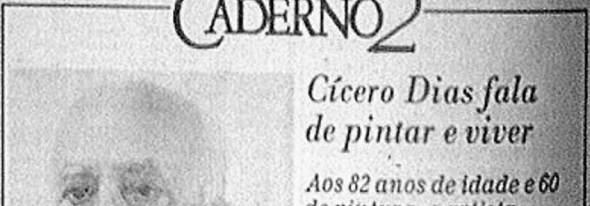
46 p

Mais o Supl
Cidade
Ciência e Tecnol
Classificados
Comportamento
Corrupção
Economia
Educação
Espaço
Esportes

CADERNO 2

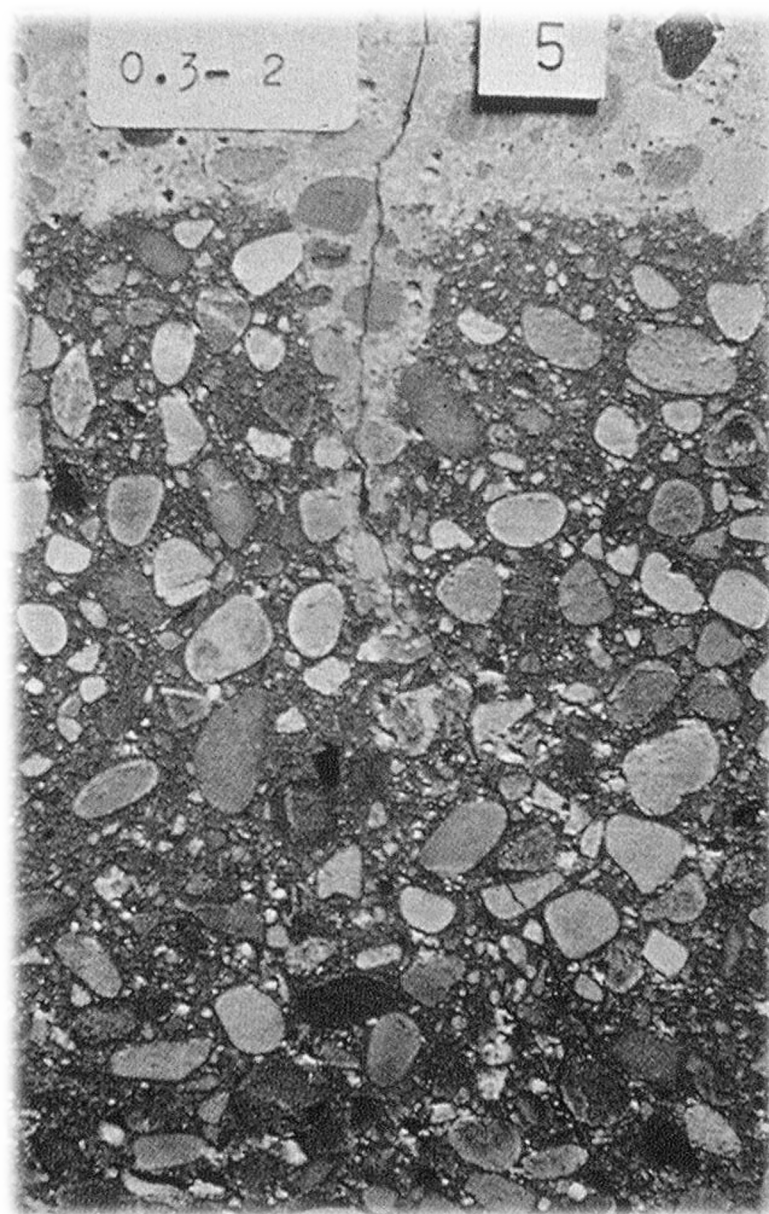
Cícero Dias fala de pintar e viver

Aos 82 anos de idade e 60



ilustrada





PONTE DOS REMÉDIOS

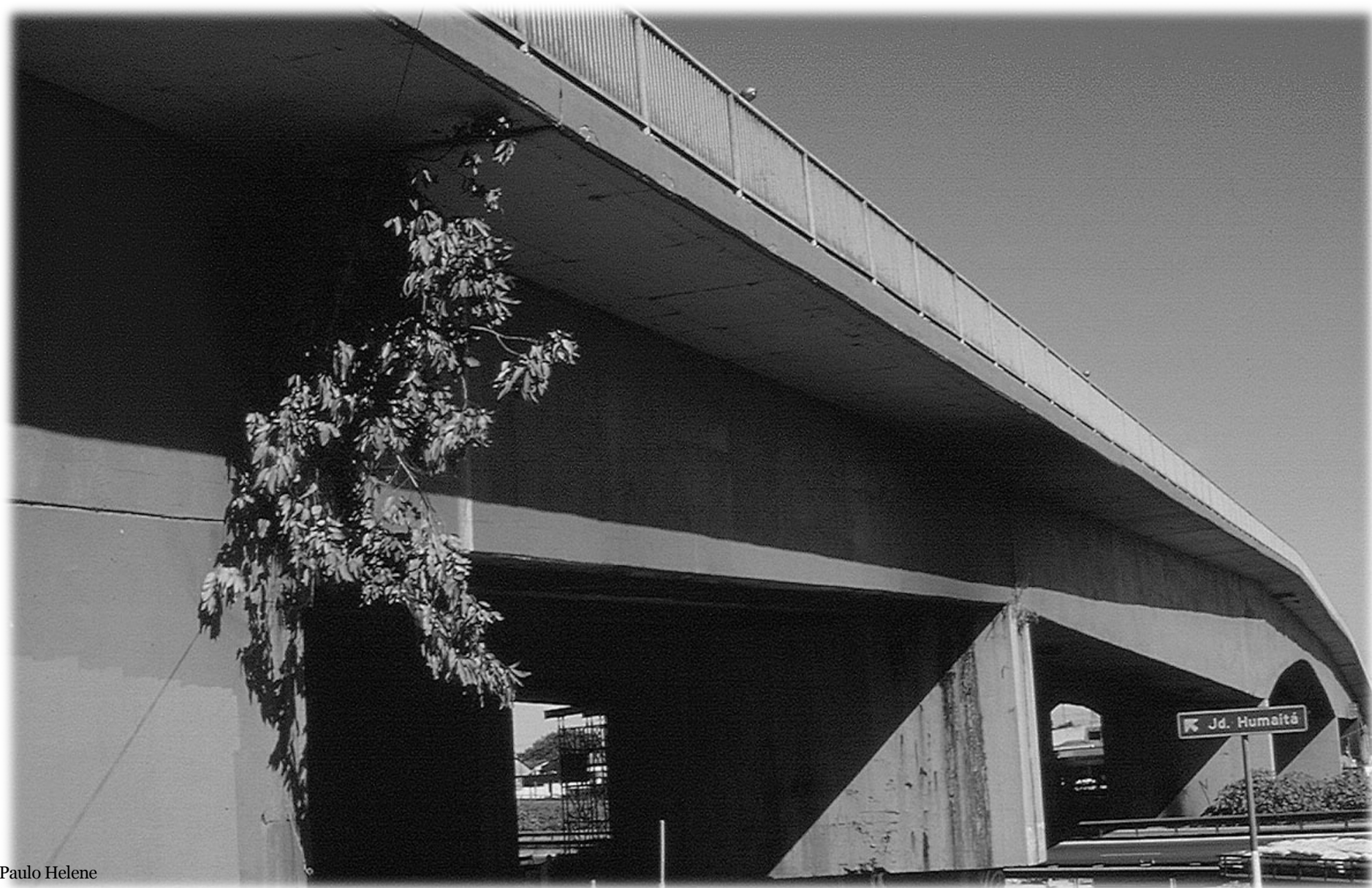
São Paulo, 1997

Laudo 6 meses antes

36 anos

$f_{ck} = 21$ MPa

Custo = 3 vezes uma ponte nova



acervo de Paulo Helene



**Ponte
dos
Remédios**

Vista superior
da fissura



**Ponte
dos
Remédios**

**Vista
lateral da
fissura**



**Ponte
dos
Remédios**

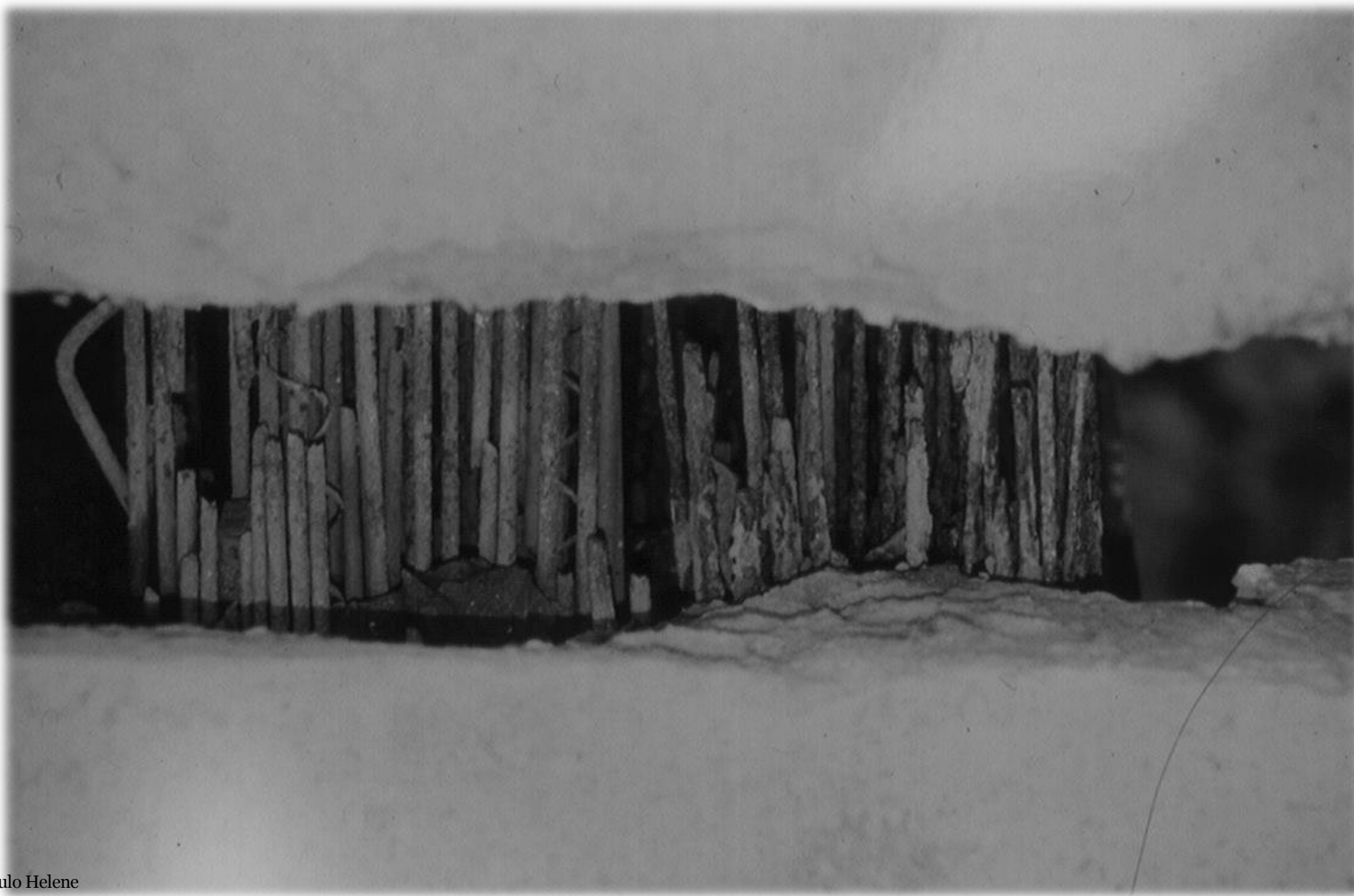
vista interna
da fissura



acervo de Paulo Helene



acervo de Paulo Helene

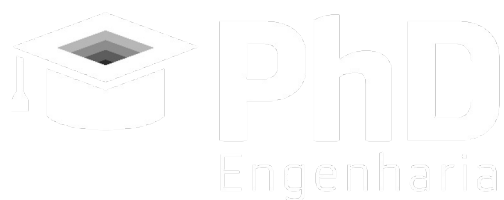


acervo de Paulo Helene



CREA-SP
Conselho Regional de Engenharia e
Agronomia de São Paulo

Muito Obrigado!



“do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras”

