

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SÃO PAULO**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PCC-740 - Patologia e Terapia das Construções de Concreto**

**Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene**

**CORROSÃO DE ARMADURAS**

**- Trabalho Experimental -**

**Participantes:**

**Oswaldo Cascudo Matos**

**Mario William Esper**

**Denise Coitinho Dal Molin**

**São Paulo  
dezembro de 1988**

## SUMÁRIO

### ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO .....	2
2 MECANISMOS E FATORES INTERVENIENTES NA CORROSÃO DAS ARMADURAS .....	2
2.1 Mecanismo de Corrosão .....	2
2.2 Fatores Intervenientes .....	4
2.2.1 Relação água/cimento .....	4
2.2.2 Tipo de cimento .....	5
2.2.3 Fissuras .....	6
3 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	7
3.1 Materiais e preparação dos corpos de prova ..	7
3.2 Método de Ensaio .....	9
4 RESULTADOS .....	10
5 CONCLUSÕES .....	12
5.1 Relação Água/Cimento .....	12
5.2 Tipo de Cimento .....	12
5.3 Fissuras .....	13
BIBLIOGRAFIA .....	14

## 1 INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras é um fenômeno patológico dos mais importantes, haja visto suas relevantes consequências no comprometimento estrutural de uma edificação. Além deste fator de alta gravidade, segundo informações de HELENE<sup>1\*</sup>, a incidência da corrosão das armaduras não é baixa, ficando por volta dos 20% em comparação com as outras manifestações patológicas.

Este é um assunto controvertido, complexo e cheio de fatores intervenientes. Um destes fatores, por exemplo, é a questão da fissuração como um agente facilitador ou acelerador do processo corrosivo; a sua real importância no fenômeno da corrosão tem gerado discussões e muita polêmica entre os entendidos.

Dentre outros fatores intervenientes, está a questão da profundidade de carbonatação, o papel do revestimento (proteção física), o meio-ambiente, etc., que, entretanto, não fazem parte do escopo deste trabalho.

O principal objetivo do trabalho, então, é o de analisar experimentalmente os aspectos da relação água/cimento, do tipo de cimento e da fissuração quanto à velocidade e intensidade de corrosão, em meio a um ensaio acelerado, ou seja, verificar a influência desses aspectos na corrosão das armaduras.

## 2 MECANISMO E FATORES INTERVENIENTES

### 2.1 Mecanismo de Corrosão

A armadura presente no interior do concreto, em meio alcalino, está protegida do fenômeno da corrosão devido a presença de uma capa ou película protetora de caráter passivo, que envolve esta armadura. A despassivação da armadura, que caracteriza a sua perda de proteção, pode se dar tanto pela queda do pH oriunda das reações de carbonatação, quanto pela presença de concentração suficiente de íons cloreto na solução (ação de íons agressivos).

Uma vez caracterizada a despassivação, a formação de pilhas ou células de corrosão se dará com a presença dos seguintes elementos, segundo HELENE<sup>2\*</sup>:

a) **Eletrólito:** água em quantidades suficientes, além de certos produtos de hidratação do cimento como a portlandita, que é solúvel em água, e também formam nos poros capilares uma solução saturada que constitui um bom eletrólito.

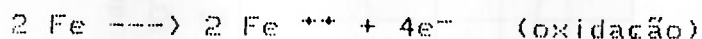
b) **Diferença de potencial:** esta induz a formação de corrente elétrica entre dois pontos da armadura e pode se originar de umidade diferencial, aeração diferencial, concentração salina diferencial, tensões no aço e no concreto, etc.

c) **Oxigênio:** é necessário que haja oxigênio, além do eletrólito representado pela umidade e pelo hidróxido de cálcio, para que ocorra a formação de ferrugem (óxido/hidróxido de ferro).

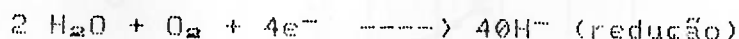
d) **Podem existir agentes agressivos:** estes aceleram o processo de corrosão melhorando a condutividade elétrica do eletrólito no concreto, além de não permitirem a formação ou então de quebrarem a película já existente de passivação do aço. Entre outros pode-se citar os íons sulfetos ( $S^{--}$ ), os íons cloretos ( $Cl^-$ ), o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), os nitritos ( $NO_2$ ), o gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o cátion amônio ( $NH_4$ ), os óxidos de enxofre ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ), fuligem, etc.

Nas regiões anódicas e catódicas ocorrem as seguintes reações que caracterizam o mecanismo de formação da célula de corrosão mostrado na Figura 1:

. Zonas anódicas: o ferro perde elétrons, ocasionando a dissolução do metal.



. Zonas catódicas: há um ganho de elétrons.



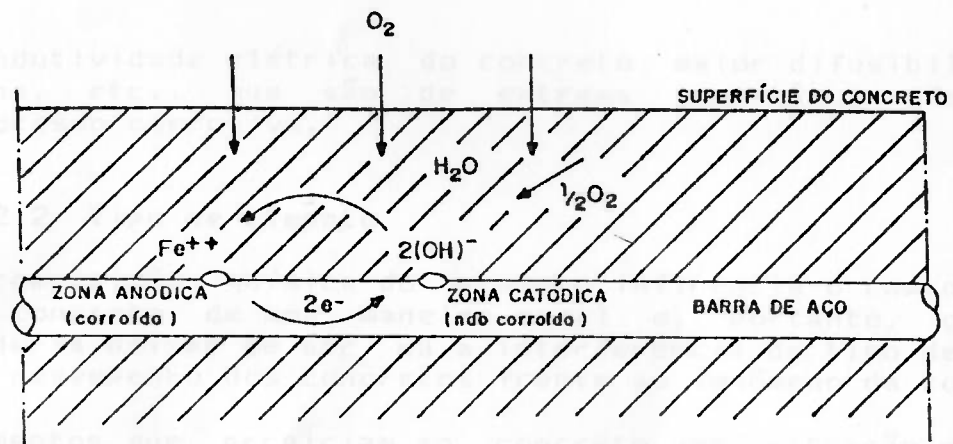


Figura 1 - Modelo simplificado da corrosão do aço no concreto (CEB<sup>4</sup>).

## 2.2 Fatores Intervenientes

### 2.2.1 Relação água/cimento

A uma maior relação água/cimento corresponde uma maior permeabilidade do concreto, segundo pode se ver na Figura 2.

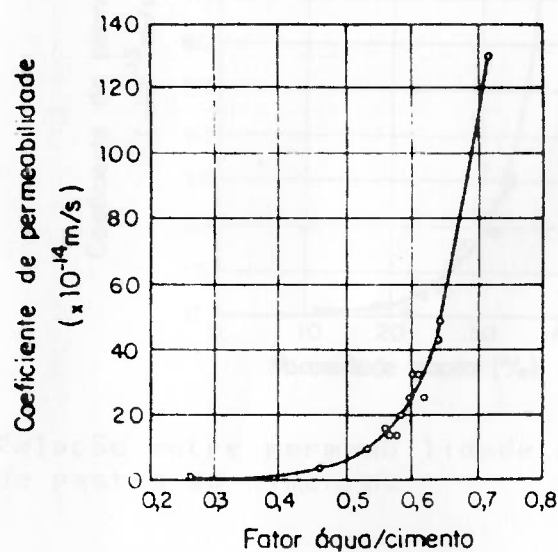


Figura 2 - Relação entre permeabilidade e fator água/cimento de pastas endurecidas (93% do cimento hidratado <11>).

Essa maior permeabilidade traz uma série de implicações na corrosão, um maior acesso de agentes agressivos, uma maior

condutividade elétrica do concreto, maior difusibilidade de íons, etc., que são de extrema importância dentro do processo corrosivo.

### 2.2.2 Tipo de cimento

A composição química do cimento influencia o comportamento do concreto de uma maneira geral e, portanto, como não poderia deixar de ser, há a interferência do tipo de cimento no desempenho dos concretos frente ao fenômeno da corrosão.

Cimentos que propiciam ao concreto uma situação de menor compacidade, isto é, maior porosidade capilar, propiciam também ao mesmo tempo uma maior permeabilidade (Figura 3) com todas as suas implicações na corrosão, conforme visto no subitem 2.2.1 (maior acesso de agentes agressivos, maior difusibilidade de íons, etc.). Dentre estes fatores vale ressaltar a difusibilidade de cloretos que é marcante na corrosão das armaduras.

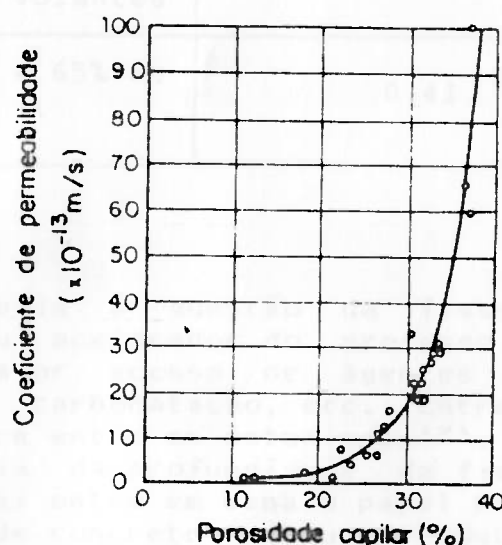


Figura 3 - Relação entre permeabilidade e porosidade capilar de pastas de cimento.

Por outro lado, cimentos com uma certa quantidade de aluminatos podem promover uma maior remoção de cloretos deletérios ao concreto, pela formação do sal de Friedel, ou seja, pela combinação dos aluminatos do cimento com os cloretos, formando o cloroaluminato de cálcio (sal de Friedel) <sup>(8)</sup>. Este fenômeno, portanto, reduz a ação deletéria dos cloretos, implicando numa menor difusibilidade

dos mesmos no concreto. A TABELA 1, segundo Page, citado por ESPER<sup>(6)</sup>, retrata a influência do tipo de cimento no que diz respeito à difusibilidade de cloretos e mostra o notável melhor desempenho do cimento de alto-forno frente aos demais.

TABELA 1 - Difusibilidade de cloretos, de acordo com PAGE<sup>(6)</sup>.

Tipo de Cimento	Difusibilidade do $Cl^-$ ( $10^{-8}$ cm <sup>2</sup> /s)
CPC (A)	3,14
CPC (B)	4,47
CPC (B) + 30% de cinzas volantes	1,47
CPC (B) + 65% de escória	0,41

### 2.2.3 Fissuras

Parece ser óbvia a questão da fissuração como fator desencadeante ou acelerador do processo corrosivo, já que ela propicia maior acesso de agentes agressivos, maior profundidade de carbonatação, etc. Entretanto a questão é bastante polêmica entre os estudiosos<sup>(7)</sup>. Alguns ressaltam a maior importância da profundidade da fissura em relação a sua abertura e aí entra em cena o papel por demais relevante do cobrimento de concreto adequado. Outros questionam a respeito da presença de fissuras longitudinais ou transversais à armadura, sendo que alguns pensamentos consideram as fissuras transversais menos prejudiciais por se apresentarem mais localizadas<sup>(8)</sup>.

Além destes fatores, há uma dificuldade em se estabelecer limites no que se refere a abertura de fissuras consideradas danosas ao concreto, tanto devido à grande variabilidade da abertura ao longo da fissura e diferentes métodos e condições de ensaio, quanto devido à dificuldade de medição propriamente dita (dimensões muito pequenas, da ordem de décimos de milímetro)<sup>(1,9,6)</sup>.

A questão da real importância da fissuração no fenômeno da corrosão é complexa e culmina com o pensamento de BURMAN<sup>(2)</sup>,

que diz que a abertura de fissuras influencia apenas o tempo de início do processo de corrosão, que é desprezível frente a vida útil da edificação.

### 3 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Conforme justificado na introdução deste trabalho, o experimento realizado teve por objetivo verificar a influência exercida pela relação água/cimento ( $a/c$ ), pelo tipo de cimento utilizado e pela existência de fissuras transversais às barras na velocidade e intensidade da corrosão de armaduras.

Com este intuito, foram utilizados três tipos de cimento (CP 32, POZ 32 e AF 32) e duas relações água/cimento (0,45 e 0,90).

#### 3.1 Materiais e Preparação dos Corpos-de-Prova

Para a realização do experimento foram moldados 24 corpos-de-prova prismáticos retangulares de concreto, nas dimensões  $15 \times 15 \times 25$  cm, armado com uma barra de 12 mm de diâmetro, previamente polida e pesada, mantendo um cobrimento uniforme de 2 cm da face exterior, conforme Figura 4.

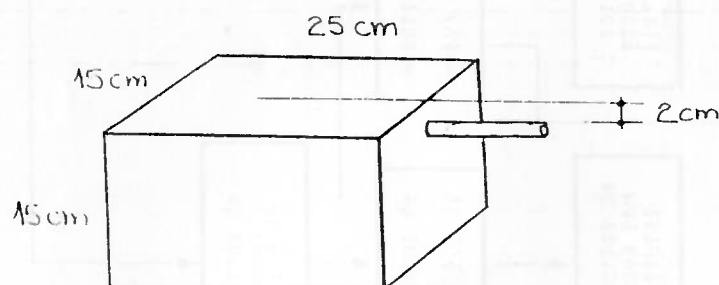


Figura 4 - Caracterização dos corpos-de-prova.

Dos 24 corpos-de-prova, 12 foram preparados com relação  $a/c$  de 0,45 no traço 1 : 1,64 : 2,34 (consumo de cimento de  $433 \text{ kg/m}^3$ ) e 12 com relação  $a/c$  de 0,90 no traço 1 : 4,11 : 4,84 (consumo de cimento de  $217 \text{ kg/m}^3$ ), com abatimento fixado em  $80 \pm 10$  mm para ambos os casos, utilizando-se os cimentos CP 32, POZ 32 e AF 32, de acordo com o fluxograma da Figura 5.



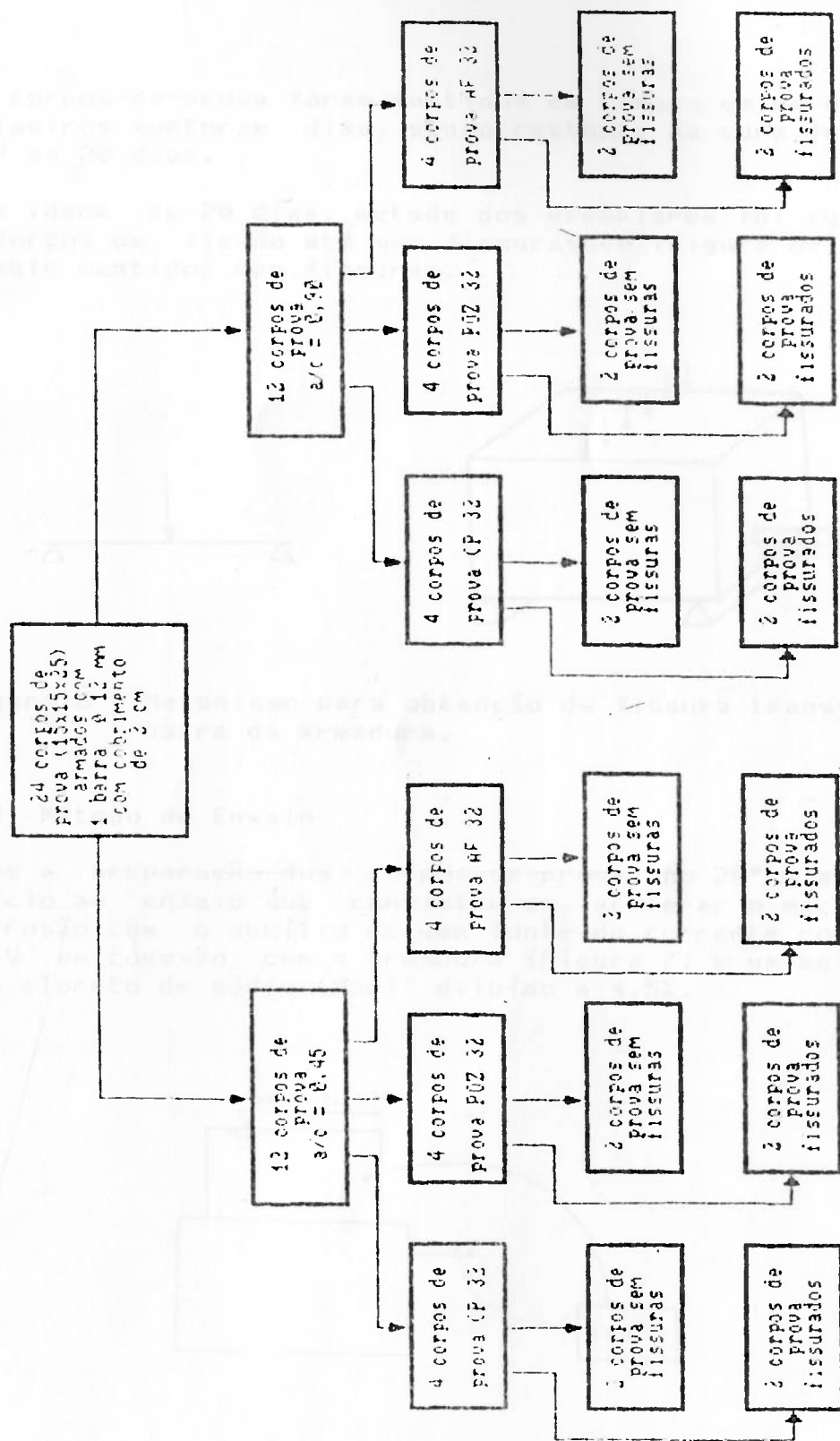


Figura 5 - Preparação dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida durante os primeiros quatorze dias, sendo restante da cura feita ao ar até os 28 dias.

Com idade de 20 dias, metade dos exemplares foi submetida a esforços de flexão até que fissurassem (Figura 6), sendo os demais mantidos sem fissuras.

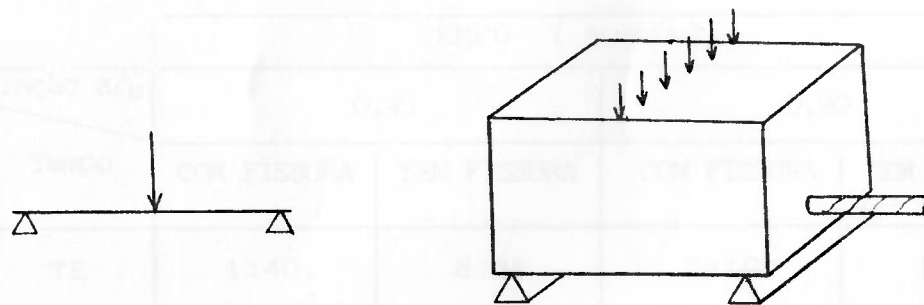


Figura 6 - Mecanismo para obtenção da fissura transversal à barra da armadura.

### 3.2 Método de Ensaio

Após a preparação dos corpos-de-prova, no 28º dia foi dado início ao ensaio que consistiu em acelerar o mecanismo de corrosão com o auxílio de uma fonte de corrente contínua de 70 V em conexão com a armadura (Figura 7) e um meio aquoso com cloreto de sódio (NaCl) diluído a 4,5%.

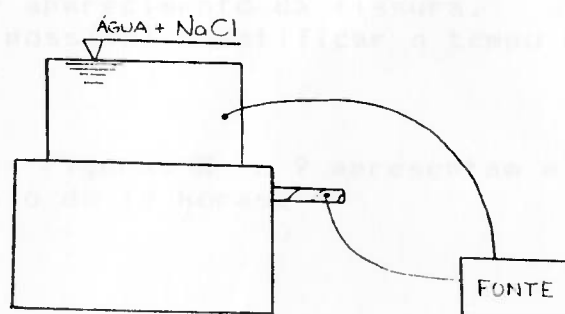


Figura 7 - Mecanismo para acelerar o processo corrosivo.

Para cada corpo-de-prova foi cronometrado o tempo necessário ao aparecimento da fissura longitudinal formada a partir das

tensões geradas pelos produtos da corrosão e, após um período de tempo fixo para todos os exemplares (10 horas), foi verificada a perda de massa do aço.

#### 4 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

Relação a/c		TEMPO ( h:min)			
		0,45		0,90	
		COM FISSURA	SEM FISSURA	COM FISSURA	SEM FISSURA
Tipo de Cimento	Tempo				
CP	TE	1:40	8:35	5:10	17:00
	TF	1:40	6:50	4:55	?
POZ	TE	2:15	8:35	5:10	17:00
	TF	2:00	7:20	5:10	?
AF	TE	3:15	8:35	5:10	17:00
	TF	3:15	-	-	-

TE = tempo de duração do ensaio.

TF = tempo de aparecimento da fissura.

? = não foi possível quantificar o tempo de surgimento da fissura.

A Tabela 3 e Figuras 8 e 9 apresentam a perda de massa do aço após ensaio de 10 horas.

Tabela 3 - Perda de massa do aço.

Tipo de Cimento \ Relação a/c	Perda de Massa do Aço (%)			
	0,45		0,90	
	COM FISSURA	SEM FISSURA	COM FISSURA	SEM FISSURA
CP	1,3	0,2	2,9	2,2
POZ	0,2	0,2	1,7	1,1
AF	0,0	0,0	0,3	0,1

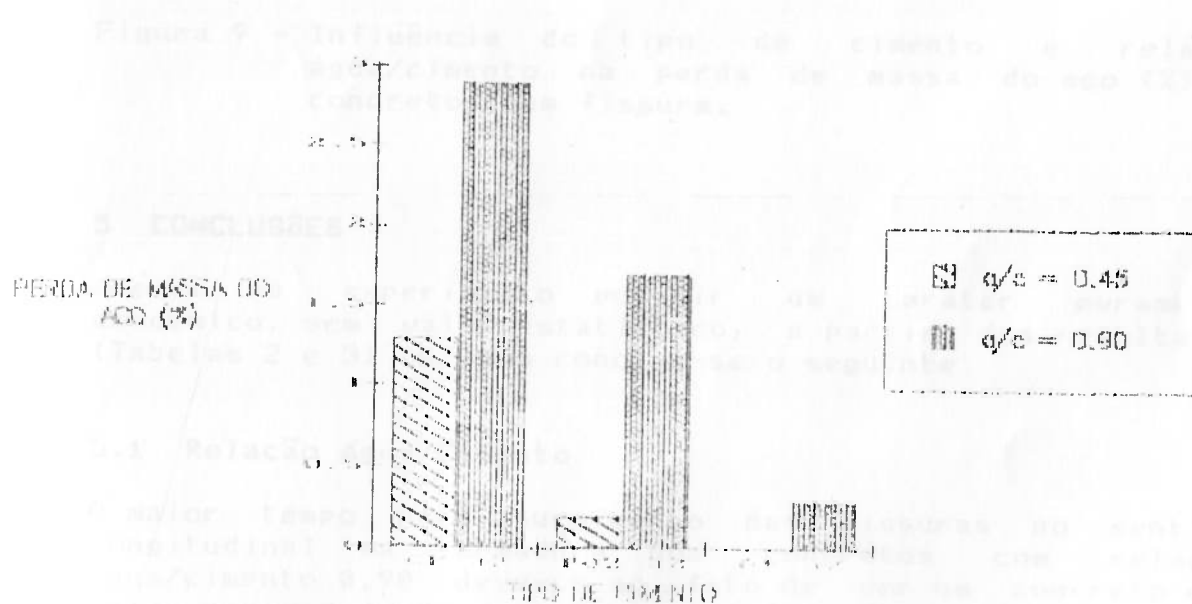


Figura 8 - Influência do tipo de cimento e relação água/cimento na perda de massa do aço (%) em concretos com fissura.

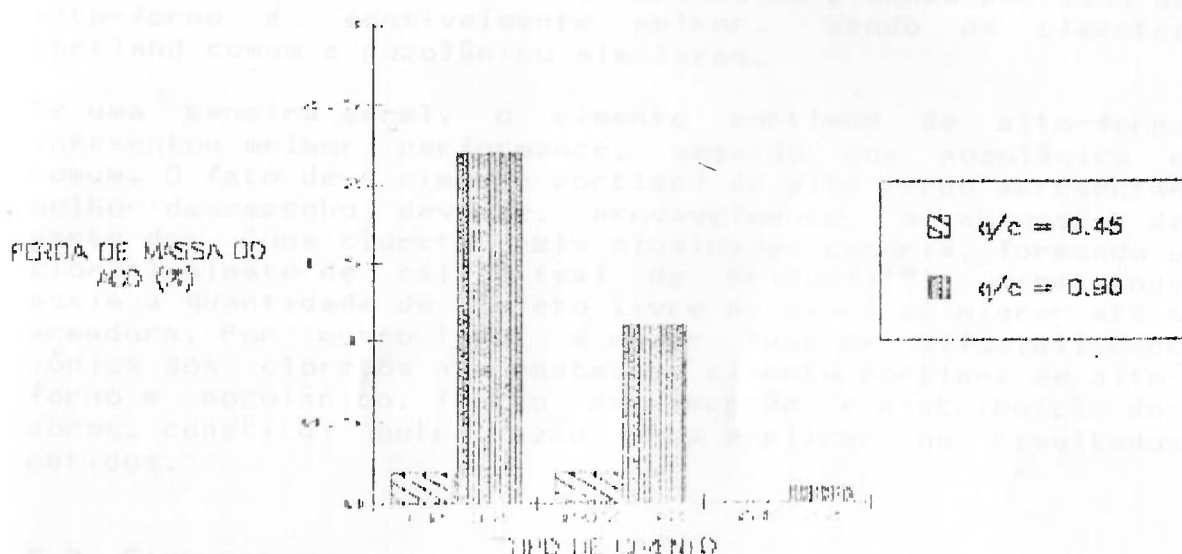


Figura 9 - Influência do tipo de cimento e relação água/cimento na perda de massa do aço (%) em concretos sem fissura.

## 5 CONCLUSÕES

Apesar do experimento possuir um caráter puramente acadêmico, sem valor estatístico, a partir dos resultados (Tabelas 2 e 3) obtidos conclui-se o seguinte:

### 5.1 Relação Água/Cimento

O maior tempo para surgimento das fissuras no sentido longitudinal da armadura nos concretos com relação água/cimento 0,90 deve-se ao fato de ser um concreto com maior porosidade do que aquele com relação água/cimento 0,45 e, portanto, possuir maior espaço para preenchimento dos poros por produtos de corrosão. Esta confirmação é constatada pela maior perda de massa do aço dos concretos com relação água/cimento 0,90.

### 5.2 Tipo de Cimento

O tipo de cimento tem influência significativa na proteção da armadura, principalmente em concretos sem fissuras. Em

concretos com fissuras o desempenho do cimento portland de alto-forno é sensivelmente melhor, sendo os cimentos portland comum e pozolânico similares.

De uma maneira geral, o cimento portland de alto-forno apresentou melhor performance, seguido dos pozolânico e comum. O fato de o cimento portland de alto-forno apresentar melhor desempenho deve-se, provavelmente, à absorção de parte dos íons cloreto pela alumina da escória, formando o cloroaluminato de cálcio (sal de Friedel)<sup>(8)</sup>, diminuindo assim a quantidade de cloreto livre passível de migrar até a armadura. Por outro lado, a menor taxa de difusibilidade iônica dos cloretos nas pastas de cimento portland de alto-forno e pozolânico, função da dimensão e distribuição dos poros, constitui outra razão para explicar os resultados obtidos.

### 5.3 Fissuras

Em concretos com fissuras o tempo de surgimento da fissura longitudinal caracterizada pela expansão dos produtos de corrosão é sensivelmente menor, diminuindo dessa maneira a propriedade do cimento em proteger a armadura.

Finalmente, deve-se ressaltar que durante a realização dos ensaios surgiu da abertura da fissura um produto esverdeado que após secagem apresentava-se com cor amarelada. Através de análise de difratometria de raios-X, identificou-se esse produto como sendo lepidocrocita (hidróxido de ferro).

## BIBLIOGRAFIA

- (1) BEEBY, A.W. Corrosion of reinforcement and crack widths. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OFFSHORE STRUCTURES, Rio de Janeiro, Oct. 8-12, 1979.
- (2) BURMAN, I. Fissuração no concreto armado: Natureza do fenômeno e sua interferência no comportamento e durabilidade das estruturas. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1981. Dissertação de Mestrado.
- (3) CARMONA FILHO, A & HELENE P.R.L. Fissuração das peças de concreto armado e corrosão das armaduras. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CORROSÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., Rio de Janeiro, 22-23 Set. 1986.
- (4) COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. Durability of concrete structures. Paris, 1984. (Bulletin d'Information, 152).
- (5) COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. Durable Concrete Structures. Paris, 1985. (Bulletin d'Information, 166).
- (6) DAL MOLIN, D.C.C. Fissuras em estruturas de concreto armado - análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS, 1988. Dissertação de Mestrado.
- (7) DEBATE: crack width, cover, and corrosion. Concrete International, 7(5): 20-44, May 1985.
- (8) ESPER, M.W. & BATTAGIN, A.F. Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento portland de alto-forno. São Paulo, ABCP, 1988. (ET, 90).
- (9) HELENE, P.R.L. Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo, Pini/IPT, 1986.

- (10) HELENE, P.R.L. Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto. São Paulo, PINI/Foseco, 1988.
- (11) NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. São Paulo, PINI, 1982.

Dados  
01/12/23  
ABCP  
BC