

## Carbonation Behavior in Reinforced Concrete Beams Under Stress Regime

### O Comportamento da Carbonatação em Viga de Concreto Armado sob Regime de Tensão

V. M. SILVA <sup>a</sup>

vms@sc.usp.br

J. B. L. LIBERIO <sup>b</sup>

liborioj@sc.usp.br

M. de CASTRO <sup>c</sup>

mcastro@icmc.usp.br

#### Abstract

This work reports results obtained by studying the behavior of reinforced concrete beams under a tension-testing regime, in which the beams were exposed to an environment with high CO<sub>2</sub> concentration. Beam molding followed by humid cure required 7 days and the subsequent application of a two-point load with the lowest possible frame dimensions in a controlled atmosphere 80% of which was concentrated CO<sub>2</sub>; relative humidity was 60±5%. Carbonation depth results, cracks, as well as the cover's effectiveness in reinforcement protection, were analyzed with respect to beam serviceability.

**Keywords:** beam; carbonation; concrete; crack; durability.

#### Resumo

Este trabalho refere-se à simulação do comportamento de elementos de estruturas (vigas) de concreto armado sob regime de tensão, na condição fissurada e exposta a um ambiente com elevada concentração de dióxido de carbono. Realiza-se a moldagem do elemento estrutural seguindo-se sua cura úmida, por 7 dias, e posterior solicitação nos terços, na máxima condição de sub-armação, e em seguida a viga é submetida a atmosfera controlada com concentração de 80% de CO<sub>2</sub> e U.R. = 60 ± 5%. São discutidos os resultados da profundidade de carbonatação, fissuras e a efetividade do cobrimento na proteção da armadura, na condição de serviço.

**Palavras-chave:** viga, fissura, carbonatação, durabilidade, concreto, cobrimento.

<sup>a</sup> Ph.D. Candidate in Department of Structural Engineering and Researcher of the Cement Based Advanced Materials Laboratory at the Engineering School of São Carlos, São Paulo University

<sup>b</sup> Professor, Coordinator of the Cement Based Advanced Materials Laboratory - Department of Structural Engineering at the Engineering School of São Carlos, São Paulo University - Av. Trabalhador São-carlense, 400, centro, São Carlos/SP - CEP: 13566-590

<sup>c</sup> Assistant Professor, Computer Science and Statistics Department, São Paulo University at São Carlos

## 1 Introduction

Atualmente o problema mais relevante sobre durabilidade de estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras. O cimento Portland quando hidratado produz a portlandita,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a qual proporciona ao concreto uma alcalinidade com o pH em torno de 12,5. Essa alcalinidade proporciona uma proteção química as barras de aço devido a formação de uma camada de óxido sub microscópica passivante (1).

A carbonatação do concreto proporciona a redução no valor do pH para aproximadamente 8,3 (1, 2). Essa redução da alcalinidade destrói o filme de óxido, deixando a armadura despassivada. O simples fato de ter despassivado a armadura não significa que a mesma vai corroer, o início da corrosão vai iniciar se a umidade relativa do meio for superior a 80%.

Vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para relacionar a profundidade de carbonatação com o tempo (3, 4). Um dos modelos mais utilizado no meio técnico pode ser expressa por  $x = k \cdot \sqrt{t}$ , sendo  $x$  a profundidade de carbonatação em mm,  $t$  o tempo de exposição em ano e  $k$  o coeficiente de carbonatação.

Nesse trabalho verifica-se o efeito da carbonatação em vigas de concreto armado sob condição máxima de sub-armação (5). Para garantir a proteção das armaduras e conseqüentemente a durabilidade das estruturas, é necessário controlar a abertura das fissuras (5, 6). A NBR 6118/2003 (7) considera que os limites de abertura de fissura do concreto armado dependem da classe de agressividade ambiental, podendo variar de 0,2 mm a 0,4 mm. Também se especifica o cobrimento nominal e a relação água/cimento a ser adotado para o concreto em função da classe de agressividade ambiental em que a estrutura será exposta.

### 1.1 Detalhes experimentais

Para realizar o estudo experimental foi construída uma câmara de carbonatação acelerada com placas de aço, reforçadas com perfil metálico e com dimensões de 90 cm x 60 cm x 488 cm.

A câmara de carbonatação acelerada foi calibrada para ficar com umidade relativa de  $65\% \pm 5\%$ , concentração de 80% de dióxido de carbono, pressão interna de 50 mmH<sub>2</sub>O e temperatura ambiente.

A determinação da profundidade de carbonatação foi realizada com uma solução de fenolftaleína indicadora de pH. Essa solução fica vermelha quando o concreto é alcalino e não altera a cor do concreto quando este está carbonatado. Essa solução foi preparada com 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada.

Foram ensaiadas vigas de concreto armado de seções retangulares 15 cm x 30 cm, comprimento de 300 cm e submetida à flexão. Também foram ensaiados corpos-de-prova com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, ensaiados à compressão axial, tração na compressão diametral, carbonatação acelerada e módulo de elasticidade.

Na composição dos traços de concreto realizou-se uma análise de composição ideal entre os agregados, seguindo as recomendações de (8). Os dados dos concretos utilizados na moldagem das vigas 1 e 2 estão na Tabela 1.

As vigas foram ensaiadas aplicando um carregamento nos terços por meio de um cabo de aço e um macaco hidráulico. A solicitação consistiu de um carregamento por duas forças concentradas de mesma intensidade. A condição estática do ensaio foi do tipo biapoado (Fig.1).



Figura 1 - Forma de aplicação do carregamento e instrumentação realizada.

A viga de concreto armado após ser moldada foi submetida à cura úmida durante 7 dias. Foi realizada a instrumentação externa da viga e em seguida foi aplicado o carregamento por meio de protensão externa. Realizaram-se as leituras de aberturas de fissuras com lupa graduada com precisão de 0,01 mm e, posteriormente, foi colocada em uma câmara para a estabilização de umidade que foi atingida em 21 dias, em seguida aplicou-se o dióxido de carbono durante 28 dias. Durante o período em que a viga permaneceu na câmara, foi mantido o carregamento.

Para medir o carregamento que a viga estava sendo solicitada durante todo o período do ensaio utilizou-se uma célula de carga posicionada em uma das extremidades do cabo de protensão. Através dessa célula foi possível determinar a perda de protensão durante o encunhamento e ao longo do ensaio.

Os extensômetros foram posicionados nas armaduras longitudinais, nas transversais e no concreto para a determinação das deformações. Na armadura longitudinal utilizou-se extensômetros resistivos uniaxiais, sendo um em cada barra de aço. Nas armaduras transversais foram utilizados dois extensômetros posicionados a meia altura da alma de um dos estribos. No concreto foram utilizados três extensômetros posicionados no meio do vão da viga, na região comprimida.

Tabela 1 - Traços de concretos utilizados na moldagem das vigas 1 e 2.

Cimento	Traço 1:m	Traço 1:a:p	a/agl	SP (%)	Consistência (mm)	C (kg/m <sup>3</sup> )
CP II E-32	1:5,0	1:2,06:2,94	0,47	0	100	379,3
	1:4,64*	1:1,88:2,76	0,40	0,4	100	414

\* Adição de 10% de sílica ativa em substituição volumétrica ao cimento

Sendo: C = consumo de cimento; SP = superplastificante; a/agl = relação água/aglomerante.

Foram realizadas leituras periódicas do valor do carregamento atuante na peça por meio de caixa seletora e indicador. Com esse equipamento também foram realizadas as leituras dos extensômetros colados no concreto e nas armaduras longitudinais e transversais durante todo o período do ensaio.

Durante a aplicação da protensão os relógios comparadores foram posicionados nos apoios e no meio do vão (Fig. 1). No período em que a viga permaneceu na câmara de carbonatação foi monitorado o deslocamento apenas do meio do vão por meio de relógios comparadores.

Foram realizadas as leituras das aberturas de fissuras depois que a viga foi retirada da câmara de carbonatação e somente depois se retirou a protensão. A viga foi dessecada, extraindo corpos-de-prova com o auxílio de uma serra-copo diamantada de 7,0 cm de diâmetro interno, para verificar a profundidade de carbonatação ao longo do elemento estrutural. Também foi verificada a ação da carbonatação, em corpos-de-prova de concreto, que foram curados em câmara úmida durante 7 dias e depositados juntamente com a viga na câmara de carbonatação.

As medidas de profundidades carbonatadas foram realizadas ao longo da viga, tanto na região fissurada quanto na região não fissurada. A profundidade carbonatada foi obtida através da média entre seis leituras realizadas em cada corpo-de-prova. As leituras de profundidades carbonatadas foram realizadas com um paquímetro de precisão 0,05 mm.

## 2 Resultados e discussões

Nas Figs. 2, 3, 4 e 5 são apresentados respectivamente os resultados de resistência à compressão simples, tração na compressão diametral e módulo de elasticidade de corpos-de-prova dos concretos utilizados na moldagem das vigas 1 e 2.

Os resultados do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova que ficaram na cura úmida não são comparativos com os que ficaram na câmara de carbonatação, porque estavam submetidos a condições atmosféricas distintas e, conseqüentemente, apresentavam umidade interna diferente.

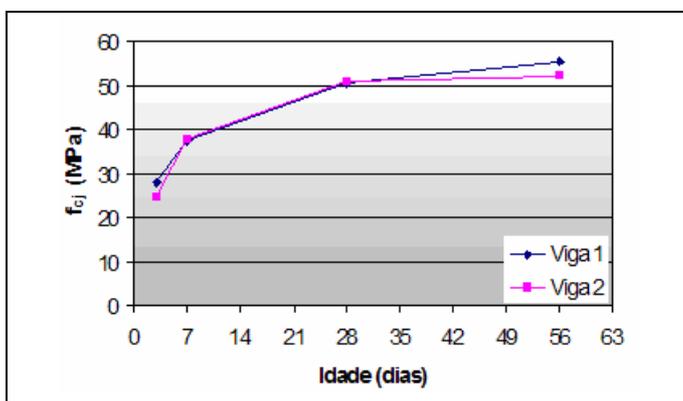


Figura 2 - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova dos concretos utilizados na confecção das vigas 1 e 2.

Nos ensaios de caracterização também foram ensaiadas barras de aço com diâmetro  $\phi$  5,0 mm,  $\phi$  6,3 mm e com  $\phi$  12,5 mm e os valores dos módulos de elasticidade e tensão de escoamento estão na tabela 2.

Tabela 2 - Valores do Módulo de Elasticidade e Tensão de Escoamento das barras de aço CA-50.

Diâmetro das barras	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Tensão de Escoamento $f_{vd}$ (MPa)
12,5	202,0	566
6,3	209,5	551
5,0	207,3	555

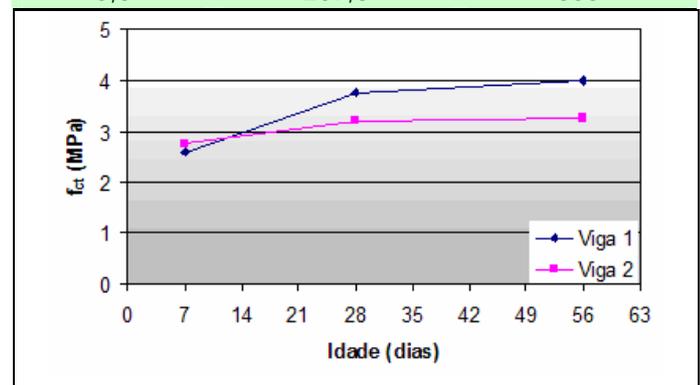


Figura 3 - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova dos concretos utilizados na confecção das vigas 1 e 2.

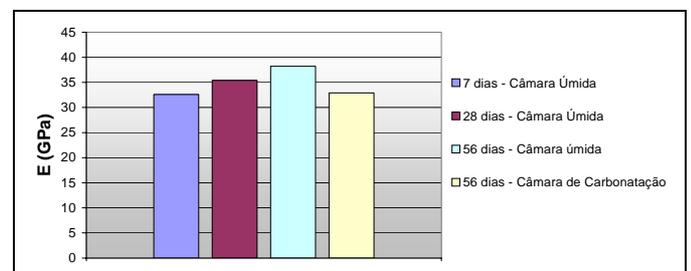


Figura 4 - Módulo de elasticidade de corpos-de-prova do concreto utilizado na confecção da vigas 1.

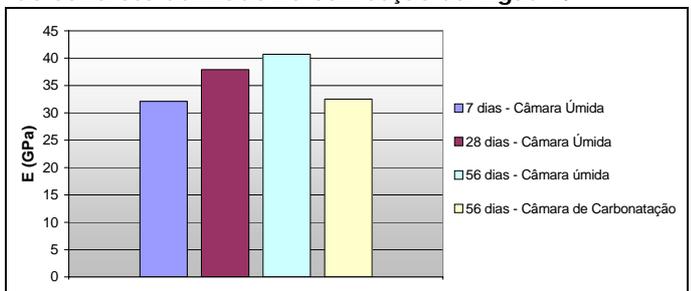


Figura 5 - Módulo de elasticidade de corpos-de-prova do concreto utilizado na confecção da vigas 2.

### 2.1 Carbonatação das vigas 1 e 2

Os gráficos das Figs. 6 e 8 apresentam as profundidades de carbonatação de corpos-de-prova de concretos, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, depositados na câmara de carbonatação. Os gráficos das Figs. 8 e 11 apresentam as profundidades de

carbonatação de corpos-de-prova, com dimensões de 70 mm de diâmetro e 150 mm de altura, extraídos das vigas carbonatadas 1 e 2, respectivamente. As profundidades de carbonatação dos corpos-de-prova não são iguais às obtidas nos corpos-de-prova extraídos das vigas, mas ao comparar os valores médios tem-se que os valores não se diferem significativamente. As Figs. 7 e 10 são apenas para ilustrar o posicionamento em que os corpos-de-prova foram extraídos das vigas 1 e 2.

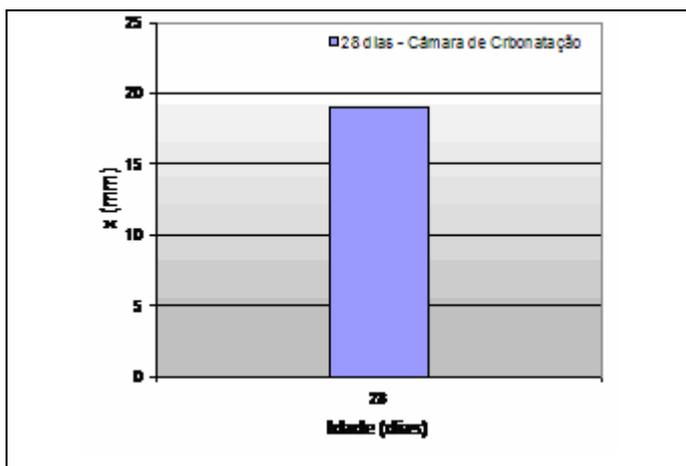


Figura 6 - Profundidade de carbonatação de corpos-de-prova de concreto que foram curados durante 7 dias em câmara úmida, ficaram 20 dias em pré-condicionamento e 28 dias na câmara de carbonatação acelerada.

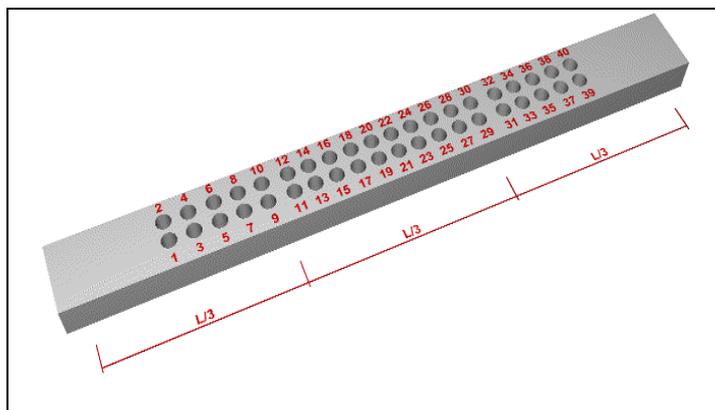


Figura 7 - Desenho esquemático da viga de concreto armado indicando o posicionamento da extração dos corpos-de-prova com suas respectivas numerações.

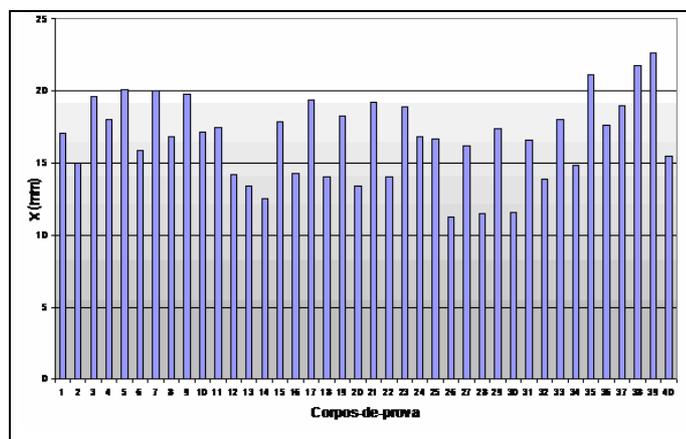


Figura 8 - Profundidade de carbonatação de corpos-de-prova extraídos da viga 1.

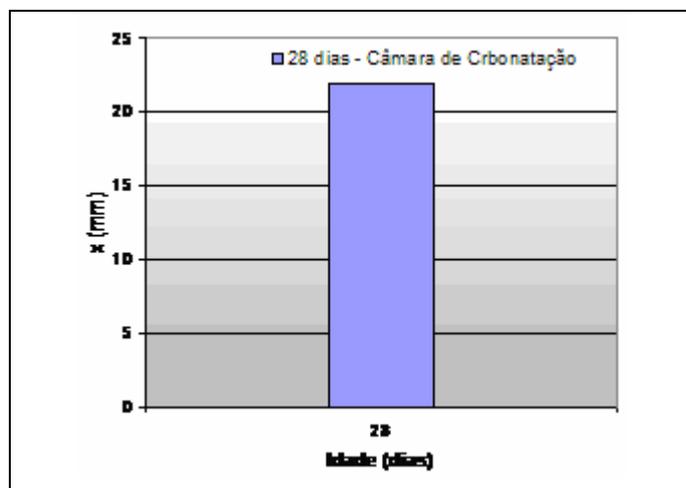


Figura 9 - Profundidade de carbonatação de corpos-de-prova de concreto que foram curados durante 7 dias em câmara úmida, ficaram 20 dias em pré-condicionamento e 28 dias na câmara de carbonatação acelerada.

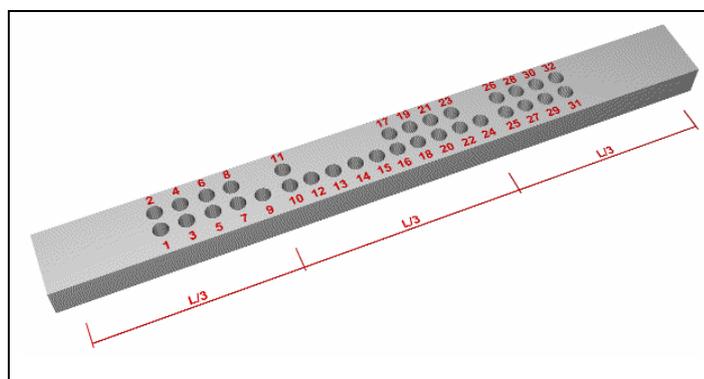


Figura 10 - Desenho esquemático da viga de concreto armado indicando o posicionamento da extração dos corpos-de-prova com suas respectivas numerações.

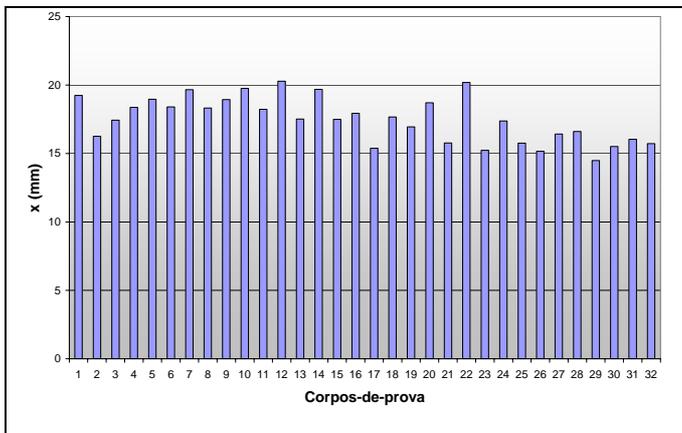


Figura 11 - Profundidade de carbonatação de corpos-de-prova extraídos da viga 2.

As Figs. 8 e 11 apresenta resultado em que as profundidades de carbonatação não são uniformes ao longo do elemento estrutural, podendo ser observado uma diferença na tendência do comportamento quando se compara a posição do corpo-de-prova na região superior ou inferior e também com relação aos terços das vigas. Nos terços tem-se uma região em que o momento fletor é constante e duas regiões em que o momento fletor é variável.

## 2.2 Carregamento das vigas

Para efeito de comparação e discussão foram realizados dois procedimentos de cálculo de deslocamentos e deformações denominados Teórico 1 e Teórico 2. No caso do Teórico 1 considerou-se para o Estádio I a inércia da seção bruta de concreto ( $I_0$ ), enquanto que no caso Teórico 2 considerou-se a inércia da seção homogeneizada ( $I_1$ ).

### 2.2.1 Viga 1

O valor da inércia da seção bruta ( $I_0$ ) é menor que a inércia da seção homogeneizada ( $I_1$ ), portanto o momento de fissuração do Teórico 1 é menor que o obtido para o Teórico 2.

O gráfico da Fig. 12 mostra os resultados de força vertical x deslocamento no meio do vão da viga. Observa-se que no instante em que a força vertical atingiu o valor de aproximadamente 20,0 kN ocorreu uma mudança de tendência no gráfico, esse comportamento deve-se ao surgimento da primeira fissura quando se tem a mudança do Estádio I para o Estádio II. Após aplicar o carregamento realizou-se o encunhamento e a viga foi submetida ao ensaio de carbonatação. Observa-se pelo gráfico apresentado na Fig. 12, uma redução da força vertical, a qual se deve à perda de protensão durante o encunhamento. Em seguida tem-se uma estabilização nas leituras de força vertical. Essas leituras equivalem aos 21 dias de pré-condicionamento e 28 dias de carbonatação acelerada. Observa-se que os deslocamentos Teórico 1 e 2 são maiores que o experimental, e que o Teórico 2 é o que mais se aproxima do experimental.

O valor experimental corresponde a média dos dois relógios comparadores posicionados no meio do vão da viga. Enquanto que a flecha final é o valor da média dos dois relógios posicionados no centro da viga menos a média das leituras dos relógios comparadores colocados nas extremidades da mesma.

Os resultados do carregamento vertical x deformação do concreto são apresentados no gráfico da Fig. 13. Esses resultados referem-se aos três extensômetros colados no meio do vão da viga, na região comprimida. Observam-se novamente os mesmos comportamentos: mudança de Estádio, perda de protensão devido ao encunhamento, deformações teóricas maiores que as experimentais e estabilização das leituras de força vertical ao longo dos dias.

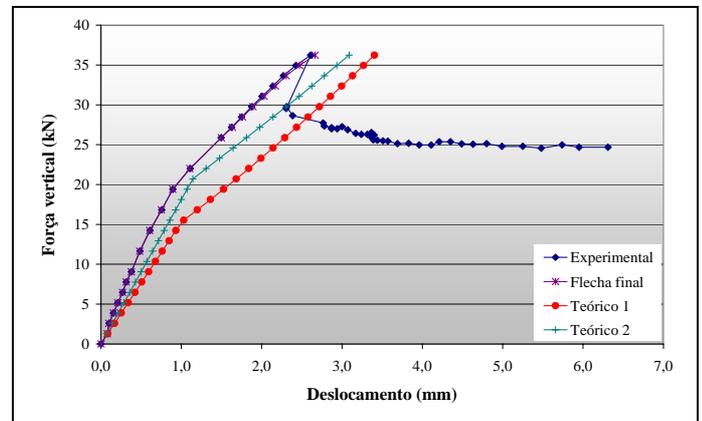


Figura 12 - Força vertical x deslocamento do meio do vão da viga.

Nos Gráficos das Figs. 14 e 15 apresentam-se, respectivamente, os resultados do carregamento vertical x deformação da camada inferior e superior da armadura positiva. Após o encunhamento observa-se uma queda da força vertical e posteriormente tem-se uma perda de deformação da armadura. Observa-se que no Estádio I a deformação teórica é maior que a experimental, enquanto que no Estádio II os valores se aproximam, vale ressaltar que o teórico denominado Teórico 1 é a favor da segurança.

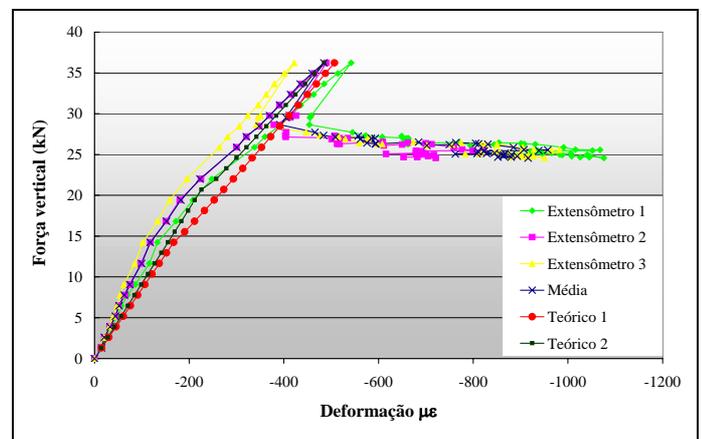


Figura 13 - Força vertical x deformação do concreto no meio do vão da viga.

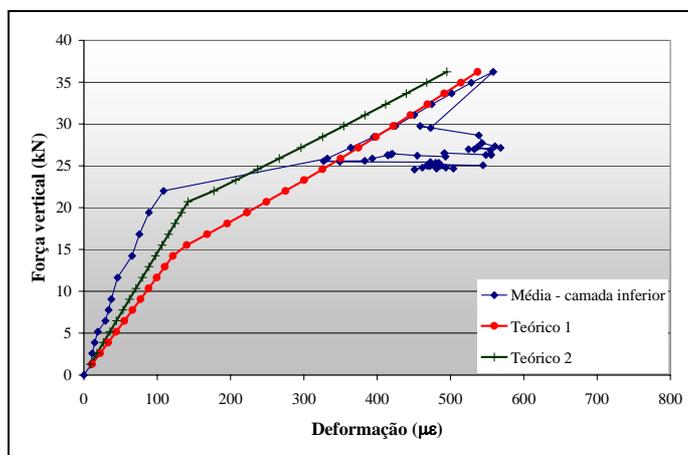


Figura 14 - Força vertical x deformação média de três armaduras positivas posicionadas na camada inferior.

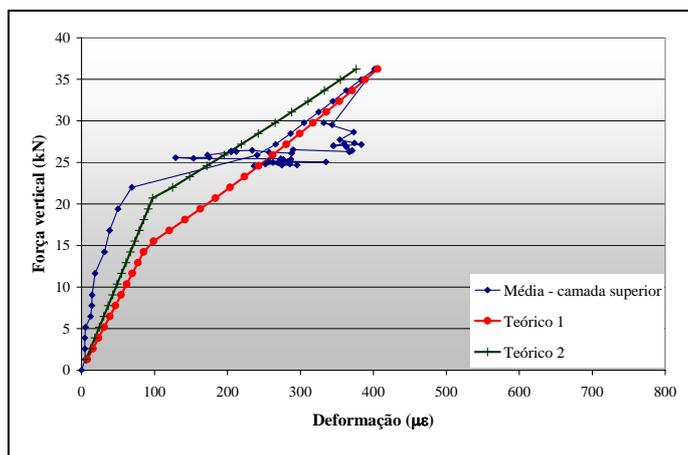


Figura 15 - Força vertical x deformação média de duas armaduras positivas posicionadas na camada superior.

### 2.2.2 Viga 2

Para a viga 2 utilizou-se a mesma metodologia adotada para a análise da viga 1. Observa-se nos gráficos das Figs. 16 e 17 que o comportamento do deslocamento e da deformação do concreto é semelhante ao observado na viga 1, gráficos apresentados nas Fig. 12 e 13.

No Gráfico das Figs. 18 e 19 apresentam-se os resultados do carregamento vertical x deformação da camada inferior e superior da armadura positiva. Os resultados teóricos apresentaram deformações próximas às experimentais, sendo o teórico denominado Teórico 1 o que é a favor da segurança.

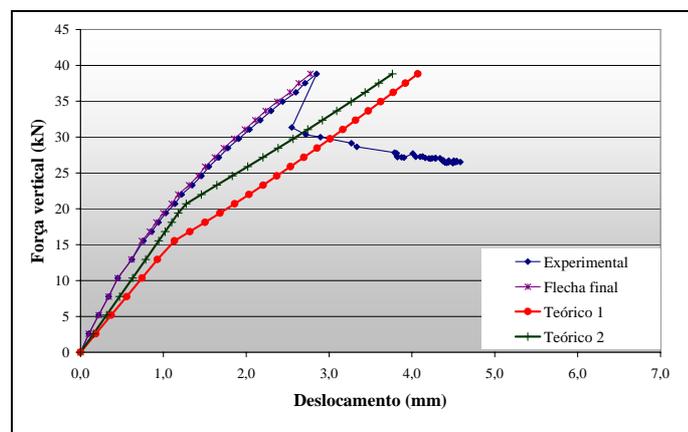


Figura 16 - Força vertical x deslocamento do meio do vão da viga.

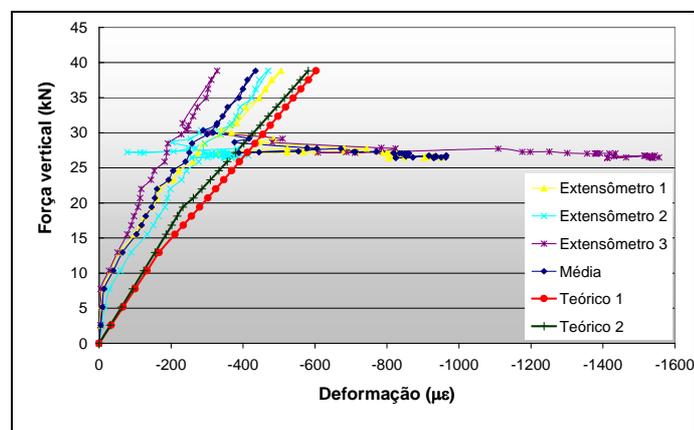


Figura 17 - Força vertical x deformação do concreto no meio do vão da viga.

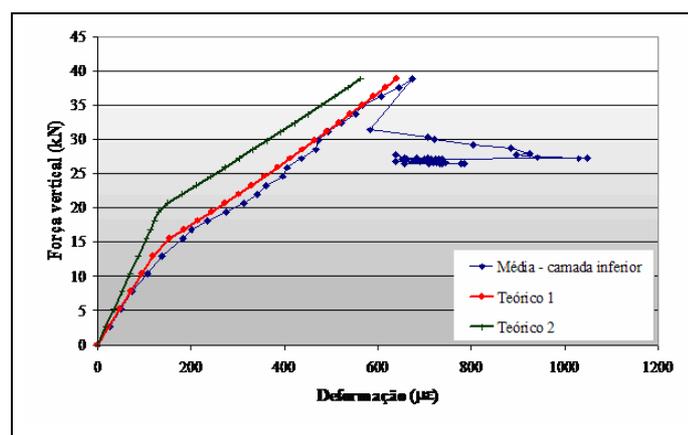
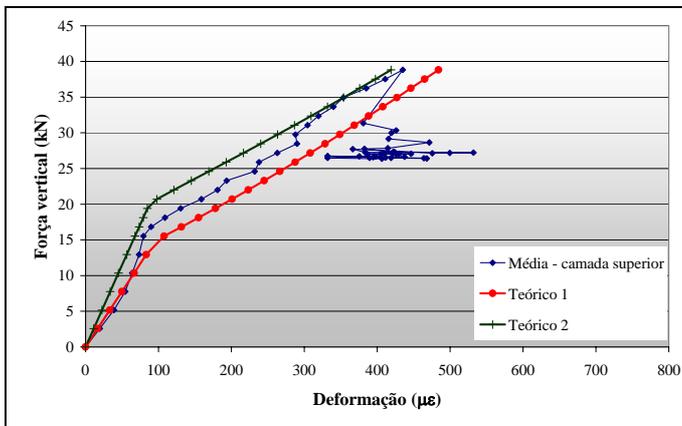


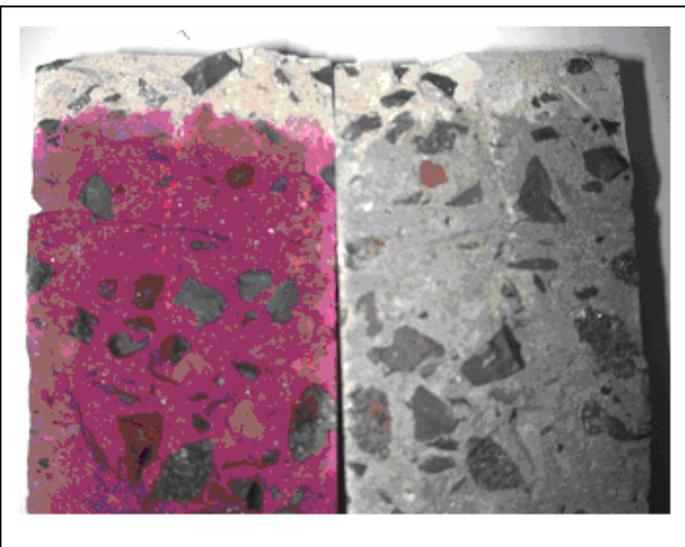
Figura 18 - Força vertical x deformação média de três armaduras positivas posicionadas na camada inferior.



**Figura 19 - Força vertical x deformação média de duas armaduras positivas posicionadas na camada superior.**

### 2.3 Fissuras

Foram realizadas as leituras das aberturas de fissuras das vigas 1 e 2, sendo o valor mínimo de 0,02 mm e o máximo de 0,16 mm para a viga 1 e 0,02 mm e o máximo de 0,14 mm para a viga 2. Foram realizados os ensaios de carbonatação acelerada nos corpos-de-prova extraídos das vigas e verificou-se que na altura em que eles foram extraídos a frente de carbonatação difundiu ao longo da fissura como pode ser verificado na Fig. 20. Vale ressaltar que esses corpos-de-prova foram extraídos acima da armadura, portanto existe carbonatação na posição da armadura e esse é um fato muito importante a considerar. Nessa condição a armadura ficará desprotegida, ainda que o concreto seja de alto desempenho. Será, portanto, necessário uma proteção adicional, a ser executada na situação de uso.



**Figura 20 - Corpo-de-prova extraído da viga de concreto armado ilustrando o comportamento da frente de carbonatação ao longo da fissura.**

### 2.4 Análise estatística

Ao realizar a análise estatística foram utilizados o teste não-paramétrico de Mann-Whitney e a técnica de análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 5%.

De acordo com o teste de Mann-Whitney, não há diferença significativa entre as vigas 1 e 2 no que diz respeito: aos corpos-de-prova que foram ensaiados à compressão simples nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias ( $p = 0,25$ ;  $p = 1,0$ ;  $p = 0,70$ ;  $p = 0,40$ ; respectivamente), aos corpos-de-prova ensaiados à tração na compressão diametral nas idades de 7, 28 e 56 dias ( $p = 0,0765$ ;  $p = 0,20$ ;  $p = 0,20$ ; respectivamente) e aos corpos-de-prova que foram ensaiados para determinar o módulo de elasticidade nas idades de 7, 28 e 56 dias ( $p = 0,40$ ;  $p = 0,70$ ;  $p = 0,0765$ ; respectivamente). Vale ressaltar que todos esses valores referem aos corpos-de-prova submetidos a cura úmida.

De acordo com o teste de Mann-Whitney, não há diferença significativa na profundidade de carbonatação para a idade de 56 dias ( $p = 0,70$ ) dos corpos-de-prova referentes às vigas 1 e 2.

A análise estatística demonstra que a diferença devido aos dois tipos de vigas não é significativa ( $p = 0,274$ ), a diferença entre os terços é significativa ( $p = 0,00185$ ) e a diferença em relação à posição em que os corpos-de-prova foram extraídos da viga é significativo ( $p < 0,0005$ ).

## 3 Conclusões

Foi verificado que as vigas na condição de serviço apresentam fissuras com abertura que proporciona a difusão da frente de carbonatação para regiões acima do cobrimento da viga, prejudicando a proteção da armadura. Portanto, o cobrimento de concreto não é parâmetro único para impedir a ação do dióxido de carbono.

A profundidade da frente de carbonatação não é uniforme ao longo do elemento estrutural sob tensão. A análise estatística comprovou que o comportamento da difusão da frente de carbonatação muda nos terços. Esse comportamento depende da distribuição do carregamento.

O presente trabalho mostra que existe diferença na profundidade de carbonatação em relação a posição em que os corpos-de-prova foram extraídos das vigas. A tendência é que a profundidade de carbonatação seja maior na região tracionada e menos na região comprimida. Esse comportamento deve-se a mudança do comportamento do elemento estrutural no que diz respeito à difusão, sendo facilitada na região tracionada e dificultada na região comprimida.

Foi verificado através da análise estatística que as vigas 1 e 2 não apresentaram diferenças significativas, mostrando uma boa eficiência da utilização da sílica ativa.

## 4 Agradecimento

Os autores são gratos à FAPESP por financiar esse trabalho.

## 5 Bibliografia

- [1] COMITE EURO INTERNATIONAL du BETON/CEB, **Durability of concrete structure. state of art report**, Bulletin D'information, n. 148, Munich, 1982.
- [2] COMITE EURO INTERNATIONAL du BETON/CEB, **Durability of concrete structure: Final report of CEB-RILEM International**. Bulletin D'information, n. 152, Copenhagen, 1983.
- [3] SILVA, V.M., **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. Interunidade EESC-IFSC-IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, Dissertação, 2002.
- [4] RICHARDSON, M.G., **Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management**. New York: CITIS Ltd, Publishers, 1988.
- [5] SILVA, V.M., **Análise experimental de vigas de concreto armado, submetidas à ação da carbonatação, sob regime de tensão**. Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, (Doutorado em andamento). Processo FPESP nº 02/06888-9.
- [6] CASTEL, A.; FRANCOIS, R.; ARLIGUIE, G., **Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements**. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 561-565, 1999.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT - NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento**, Rio de Janeiro, 2003.
- [8] HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P., **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília - DF: Pini, 1992.