

## Comparative Analysis of Different Concentrations of CO<sub>2</sub> in Accelerated Carbonation Tests

## Análise Comparativa de Diferentes Percentuais de CO<sub>2</sub> em Ensaio Acelerados de Carbonatação

C. PAULETTI <sup>a</sup> \*

cristianepauletti@yahoo.com.br

D. C. C. DAL MOLIN <sup>b</sup>

dmolin@ufrgs.br

C. S. KAZMIERCZAK <sup>c</sup>

claudiok@unisinis.br

### Abstract

Carbonation tests with carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations in excess of those found in nature have become common practice because they reduce test times. However, the lack of standards to guide the procedures and factors involved in these tests allow researchers to use different procedures, which makes comparisons between studies difficult or sometimes impossible. The present study aims to investigate the influence of the concentration of carbon dioxide on the carbonation depth of mortar samples subjected to accelerated tests. The tests were performed on concrete blocks measuring 40 x 40 x 160 mm that were cast with conventional Portland cement and pozzolanic Portland cement using water/cement ratios (w/c) of 0.40, 0.55 and 0.70. The samples were wet cured for 7 and 28 days in accordance with the procedures recommended in RILEM TC 116-PCD [1]. The tests were carried out at 20±1°C and RH 70±5%. Two carbonation chambers were used, one with 6% CO<sub>2</sub> and the other with saturated CO<sub>2</sub><sup>1</sup>. Additional tests included compressive strength at 7, 28 and 63 days to check the quality of the mortars. The test results indicated that the samples tested with CO<sub>2</sub> 6% have greater carbonation depths than those tested in the saturated carbonation chamber. The analysis of variance at 28 days shows that the concentration of CO<sub>2</sub> is a statistically significant factor in the carbonation depth of the mortars tested.

**Keywords:** accelerated carbonation, CO<sub>2</sub> concentrations, mortars.

### Resumo

Os ensaios de carbonatação com concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) acima daquelas encontradas na natureza se tornaram uma prática comum. Isto é devido à redução do tempo necessário para o ensaio. No entanto, a falta de padronização dos procedimentos e fatores que envolvem estes ensaios permite que cada pesquisador adote procedimentos distintos para a sua realização, o que dificulta e, às vezes, até impossibilita a comparação entre as diversas pesquisas. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo a verificação da influência do percentual de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação de argamassas submetidas a ensaios acelerados. Foram utilizados corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 40 x 40 x 160 mm, moldados com cimento Portland comum (CPI) e cimento Portland pozzolânico (CPIV), nas relações água/cimento (a/c) de 0,40, 0,55 e 0,70. As amostras permaneceram em cura submersa por 7 e 28 dias e então foram sazoadas conforme os procedimentos da RILEM TC 116-PCD [1]. Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 20±1°C e umidade relativa de 70±5%. Foram utilizadas duas câmaras de carbonatação, com concentrações de CO<sub>2</sub> de 6% e saturada<sup>1</sup>. Foram ainda realizados ensaios de resistência à compressão axial aos 7, 28 e 63 dias, a fim de controlar a qualidade de execução das argamassas. Os resultados indicam que as amostras ensaiadas a 6% de CO<sub>2</sub> apresentam profundidades de carbonatação superiores às ensaiadas em câmara saturada. A análise de variância aos 28 dias de ensaio acelerado aponta que o percentual de CO<sub>2</sub> é estatisticamente significativo na profundidade de carbonatação das argamassas ensaiadas.

**Palavras-chave:** carbonatação acelerada, concentrações de CO<sub>2</sub>, argamassas.

<sup>a</sup> PhD researcher at the Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), Program of Postgraduation in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, e-mail: cristianepauletti@yahoo.com.br. Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar - PPGEC/NORIE - ZIP 90035-190 - Porto Alegre - RS - Brazil. Phone: 55 51 3308-3518 - Fax: 55 51 3308-4054;

<sup>b</sup> Lecturer, Ph.D. NORIE/PPGEC/UFRGS, e-mail: dmolin@ufrgs.br. Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar - PPGEC/NORIE - ZIP 90035-190 - Porto Alegre - RS - Brazil;

<sup>c</sup> Lecturer, PhD, Program of Postgraduation in Civil Engineering, University of Vale do Rio dos Sinos, e-mail: claudiok@unisinis.br. Av. Unisinis, 950 - Bairro Cristo Rei - ZIP 93022-000 - São Leopoldo - RS - Brazil.

\* Corresponding author.

<sup>1</sup> Definiu-se chamar câmara saturada aquela em que a substituição do ar existente por CO<sub>2</sub>, no interior da mesma, foi sempre igual ou superior a 60%.

## 1 Introdução

A carbonatação é um complexo processo físico-químico onde os compostos do cimento, hidratados ou não, são

gradualmente substituídos por carbonatos, através de reações, principalmente, com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), diminuindo o pH do meio.

O fenômeno da carbonatação vem sendo estudado há cer-

**Tabela 1 – Falta de padronização de fatores envolvidos nos ensaios de carbonatação acelerada**

Pesquisador	Ano	Tipo de material	UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (%)
Tuutti (5)	1982	concreto	80	-	1
Ying-Yu e Qui-Dong (6)	1987	argamassa	52	20	20
Ho e Lewis (7)	1987	concreto	50	23	4
Andrade (8)	1988	argamassa	50 a 70	20	100
Fattuhi (9)	1988	concreto	50 a 70	20 to 26	100
Dhir et al. (10)	1989	concreto	50	20	4
Ohga e Nagataki (11)	1989	concreto	50	40	7
Kobayashi e Uno (12)	1989	argamassa	60	20	10
Papadakis et al. (13)	1991	concreto	-	-	50
Branca et al. (14)	1992	concreto	75	20	30
Nepomuceno (15)	1992	concreto	50 a 70	20	100
Isaia (16)	1995	concreto	-	-	10
Kazmierczak (17)	1995	argamassa	-	-	100
John (18)	1995	argamassa	-	21,5	5
Bauer (19)	1995	argamassa	65 a 70	-	50
Monteiro (20)	1996	argamassa	50 a 70	24	100
Seidler (21)	1999	argamassa	68	21	5
Roy et al. (2)	1999	concreto	52, 64, 75, 84 e 92	-	6
Vaggetti (22)	1999	concreto	50 a 80	23	10
Lopes (23)	1999	concreto	55	27	100
Papadakis (24)	2000	argamassa	61	25	3
Alves (25)	2000	concreto	80	24	5
Jiang et al. (26)	2000	concreto	70	20	20
Cunha e Helene (27)	2001	concreto	65	23,5	100
Johannesson e Utgenannt (28)	2001	argamassa	65	20	1
Sanjuán e Olmo (3)	2001	concreto	70	-	5, 20 e 100
Venquiaruto (29)	2002	concreto	75	23	5
Kulakowski (30)	2002	concreto argamassa	70	25	5
Lo e Lee (31)	2002	concreto	-	21	2
Coelho et al. (32)	2002	concreto	60 a 70	26	100
Kirchheim (33)	2003	concreto	70	25	100
Van Gerven et al. (34)	2004	argamassa	>90	37	5 e 20
Gervais et al. (35)	2004	argamassa	23, 48 e 98	-	100
Abreu (36)	2004	concreto	70	25	5 e >50

ca de 50 anos e pode-se dizer que ainda não é totalmente compreendido. Existe a necessidade de comparações entre os resultados de diferentes pesquisas, mas salienta-se que na maioria das vezes as condições de investigação são distintas, o que dificulta uma confrontação fidedigna das respostas obtidas.

Não existem normas que regulamentem os ensaios de carbonatação, e por isso, cada pesquisador adota um método específico para seus experimentos. Os fatores que envolvem estes ensaios sabidamente influenciam os seus resultados. A falta de padronização dos ensaios diz respeito a diversas variáveis relacionadas aos ensaios de carbonatação, como o tipo e tempo de cura, tipo e tempo de recondicionamento<sup>2</sup>, concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), temperatura e umidade relativa do ar, entre outros. No presente trabalho serão abordados aspectos referentes à carbonatação acelerada de argamassas, submetidas a diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>, com o intuito de colaborar para uma padronização dos ensaios.

## 2 Percentual de CO<sub>2</sub>

Concentrações de CO<sub>2</sub> acima daquelas encontradas no meio ambiente (que variam normalmente de 0,03 a 1%) vêm sendo bastante empregadas nos ensaios que estudam o fenômeno da carbonatação. Estes ensaios realizados em laboratório, conhecidos como acelerados, além de possibilitar maior controle dos procedimentos e condições de exposição envolvidos no processo, permitem obter respostas num intervalo de tempo consideravelmente inferior (dias ou semanas) àquele necessário quando o processo é desenvolvido naturalmente (em geral, anos). Entretanto, segundo diversos autores ([2]; [3]; entre outros), deve-se tomar cuidado quando da realização de ensaios acelerados, pois o aumento no percentual de CO<sub>2</sub> pode distorcer os fenômenos, ou seja, pode haver alteração das reações químicas envolvidas no processo e nos compostos formados, cuja porosidade pode ser diferente. Parrot [4] explica que todos os compostos hidratados do cimento podem reagir com o CO<sub>2</sub> a concentrações atmosféricas normais (cerca de 0,03% em volume). No entanto,

em altas concentrações de CO<sub>2</sub> os compostos não hidratados também podem reagir, o que torna os ensaios naturais e acelerados distintos entre si.

Apesar das diferenças entre ensaios naturais e acelerados, acredita-se que estes últimos possibilitem prever a carbonatação satisfatoriamente. Porém, para que os resultados de uma série de pesquisas possam ser comparados de forma fidedigna, faz-se necessária a uniformização dos fatores envolvidos no processo, os quais afetam os resultados. A falta de padronização dos ensaios pode ser verificada na tabela [1], que lista uma série de estudos de carbonatação acelerada em concretos e argamassas, mostrando que os percentuais de CO<sub>2</sub>, entre outras variáveis, são os mais diversos.

Os dados da coluna que representa os percentuais de CO<sub>2</sub> da tabela [1] mostram que as concentrações utilizadas nos ensaios de carbonatação acelerada vão de 1 a 100% de CO<sub>2</sub>. Em função desta dispersão, a comparação de resultados de diferentes estudos fica prejudicada, pois a carbonatação pode assumir comportamentos distintos para cada percentual de CO<sub>2</sub>.

Neste trabalho são comparadas as profundidades de carbonatação obtidas em ensaios acelerados com concentrações de 6% de CO<sub>2</sub> e em câmara saturada.

## 3 Programa experimental

No presente estudo, definiu-se trabalhar com argamassas, visando minimizar a influência do agregado graúdo na determinação da frente de carbonatação. Além disso, este tipo de material permite que as dimensões dos corpos-de-prova sejam menores. As argamassas foram moldadas fixando a quantidade de água (H) em 13,5% e variando a proporção entre aglomerante e agregado miúdo.

### 3.1 Materiais

Os cimentos empregados foram o Portland comum (CPI-S-32) e o Portland pozolânico (CPIV), cujas características físicas e químicas são apresentadas nas tabelas [2] e [3], respectivamente.

Tabela 2 – Caracterização física e mecânica dos cimentos CPI-S e CP IV

Característica	CPI-S	CPIV
Granulometria laser – diâmetro médio (µm)	19,77	14,04
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	2,75
Área específica Blaine (m <sup>3</sup> /kg)	388	450
Água de consistência da pasta normal (g)	136	160
Tempo de pega (min)	Inicial	200
	Final	300
	3 dias	17,4
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	23,8
	28 dias	36,7
		34,7

<sup>2</sup> Etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação propriamente dito, antes dos corpos-de-prova serem submetidos à ação do CO<sub>2</sub>.

Tabela 3 – Caracterização química dos cimentos utilizados

Característica química	CPI-S (%)	CPIV (%)
SiO <sub>2</sub>	18,74	29,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,31	11,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,79	3,21
MgO	4,03	3,87
CaO	61,15	41,42
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,08
K <sub>2</sub> O	0,78	0,85
SO <sub>3</sub>	3,11	2,69
Cal livre	1,94	1,17
Perda ao fogo	4,37	3,91
Resíduo insolúvel	0,55	27,33
Equivalente alcalino	0,58	0,64

Os resultados das tabelas [2] e [3] atendem aos requisitos das normas de cimento CPI e CPIV, a ABNT – NBR 5732 [37] e NBR 5736 [38]. Estes cimentos são similares aos cimentos tipo I e IP especificados pelas ASTM – C 150 [39] e C 595 [40], respectivamente.

O agregado miúdo empregado foi uma areia de quartzo, com módulo de finura igual a 2,72 e dimensão máxima característica de 2,40 mm. A sua massa unitária é de 1,61 g/cm<sup>3</sup> e sua massa específica de 2,63 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2 Métodos

Foram adotadas três relações água/cimento (a/c) 0,40, 0,55 e 0,70 e moldados corpos-de-prova prismáticos de 40 x 40 x 160mm para carbonatação acelerada e cilíndricos de 100 x 200mm para resistência à compressão axial.

Após a moldagem os corpos-de-prova foram mantidos em cura úmida, a uma temperatura de 23±1°C e umidade relativa de 100% por 24 horas, quando foram desmoldados e colocados em cura submersa em água saturada de cal, dentro da sala de cura.

A cura submersa teve duração de 7 e 28 dias para as amostras de carbonatação acelerada e 7, 28 e 63 dias para a resistência à compressão axial.

A preparação das amostras para o ensaio acelerado de carbonatação seguiu as recomendações para ensaios de permeabilidade do concreto como critério da sua durabilidade da RILEM TC 116-PCD [1]. Nestas recomendações a parte "A" especifica o condicionamento de corpos-de-prova de concreto para medição da permeabilidade a gases e absorção de água. Seguindo tais recomendações, fez-se necessária uma moldagem preliminar das argamassas, para determinação da quantidade de água a ser perdida pelas mesmas após a cura e antes do ensaio de carbonatação acelerada, alcançando, assim, a umidade ótima para o requerido ensaio. Esta etapa fez-se necessária para assegurar o mesmo grau de hidratação do material utili-

zado para este cálculo e aquele das amostras que foram propriamente ensaiadas à carbonatação.

Conforme descrito na recomendação, após a cura, os corpos-de-prova foram colocados em estufa a 50±1°C até alcançarem a perda de massa preestabelecida. Em seguida, as amostras foram seladas em embalagens compostas por poliéster + adesivo + alumínio + adesivo + filme de polietileno, fechadas a quente. Já embaladas, as amostras retornaram à estufa a 50±1°C por mais 14 dias, para a fase de redistribuição da umidade interna.

Após o período de redistribuição de umidade, os corpos-de-prova foram levados para a sala climatizada a 20±1°C e umidade relativa de 70±5%, onde permaneceram embalados por mais 24 horas para que sua temperatura se igualasse à da sala e então foram colocados nas câmaras de carbonatação, localizadas no mesmo ambiente.

Uma das câmaras de carbonatação utilizadas opera com alimentação contínua de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), e sua concentração de CO<sub>2</sub> é de 6%. A outra câmara possui circuito fechado e a saída permanece aberta somente durante a entrada de gás. Após a alimentação com o CO<sub>2</sub> em concentração de 100%, entrada e saída são fechadas. A concentração existente no interior da câmara não pode ser medida em função da falta de um equipamento adequado para essa finalidade. Convencionou-se chamar então de câmara saturada, uma vez que a quantidade de ar substituído por CO<sub>2</sub> sempre foi superior ou igual a 60% do volume da câmara vazia.

As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas após 7, 14, 21 e 28 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>. Os corpos-de-prova prismáticos foram rompidos transversalmente com o auxílio de uma prensa, e sobre a superfície recém fraturada foi aspergida uma solução de indicador químico (fenolftaleína à 1%), conforme recomendado pela RILEM CPC-18 [41].

A resistência à compressão axial foi determinada aos 7, 28 e 63 dias.

Tabela 4 – Profundidades de carbonatação médias (mm)

Identificação Cimento – a/c – %CO <sub>2</sub>	Tempo de carbonatação (dias) cura 7d				Tempo de carbonatação (dias) cura 28d			
	7	14	21	28	7	14	21	28
CPI – 0,40 – 6	2,0	3,5	4,9	5,3	2,1	3,0	3,6	4,5
CPI – 0,40 – saturada	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CPIV – 0,40 – 6	2,5	4,6	5,9	6,4	3,2	3,8	5,5	5,8
CPIV – 0,40 – saturada	0,0	0,0	0,0	2,1	0,9	3,0	3,3	4,1
CPI – 0,55 – 6	2,9	4,9	6,9	7,6	3,7	5,7	7,8	7,2
CPI – 0,55 – saturada	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	2,8	4,4
CPIV – 0,55 – 6	4,1	7,5	10,2	11,1	4,4	6,0	7,9	8,9
CPIV – 0,55 – saturada	0,0	3,4	4,8	5,1	1,1	4,6	6,1	7,0
CPI – 0,70 – 6	4,4	8,4	12,7	13,3	5,3	8,1	10,9	13,1
CPI – 0,70 – saturada	1,4	2,6	3,7	4,8	0,2	5,6	6,6	8,2
CPIV – 0,70 – 6	6,1	11,6	18,5	24,4	7,1	10,1	13,3	15,0
CPIV – 0,70 – saturada	6,5	7,2	8,5	8,8	2,4	6,4	8,3	9,3

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Profundidade de carbonatação

A tabela [4] apresenta as profundidades de carbonatação médias obtidas a partir de 6 resultados, pois foram considerados 3 corpos-de-prova e as duas laterais de cada um deles, como ilustra a figura [1].

Os cantos das amostras, por onde o CO<sub>2</sub> penetra em duas direções, foram desprezados. Para cada lateral foi medida a área carbonatada que dividida pela dimensão lateral considerada, resultou na profundidade de carbonatação média. As faces superiores e inferiores de moldagem foram desconsideradas em função da dispersão de resultados nas mesmas. As medidas foram realizadas com auxílio do software Carl Zeiss Vision (*Realise 3.0*) através de imagens digitais das amostras recém fraturadas e aspergidas com a fenolftaleína. O efeito do percentual de CO<sub>2</sub> sobre a profundidade de carbonatação foi verificado através da análise de variância (ANOVA), dos dados obtidos aos 28 dias de ensaio acelerado. O nível de confiança adotado foi de 95% e os resultados são apresentados na tabela [5].

Como mostra a tabela [5], os efeitos principais de cada fator foram significativos na profundidade de carbonatação. Com exceção da interação entre o tempo de cura e relação a/c as demais interações se mostraram estatisticamente significativas. A figura [2] ilustra o efeito isolado do percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação.

A figura [2] mostra que a carbonatação média dos corpos-de-prova ensaiados em câmara saturada é de 4,56 mm,

enquanto que daqueles ensaiados com 6% de CO<sub>2</sub> é de 9,53 mm, ou seja, cerca de 2,1 vezes maior, ou em torno de 48% da carbonatação aos 6% de CO<sub>2</sub>.

Abreu [36] verificou a carbonatação de diversos concretos, após 62 dias de exposição, a percentuais de CO<sub>2</sub> de 5% e próximo da saturação e constatou que as amostras carbonataram mais na concentração de 5%.

Saetta e Vitaliani [42] colocam que um dos parâmetros que mais afeta a taxa de carbonatação é a concentração de CO<sub>2</sub>. Saetta e Vitaliani [42] e Abreu [36] supõem que, se a reação é rápida, a produção de CaCO<sub>3</sub>, em um dado intervalo de tempo, coincide com a liberação de uma quantidade de água maior que aquela que a porosidade da matriz é capaz de expelir, no mesmo intervalo de tempo,

Figura 1 – Corpo-de-prova após análise da profundidade de carbonatação

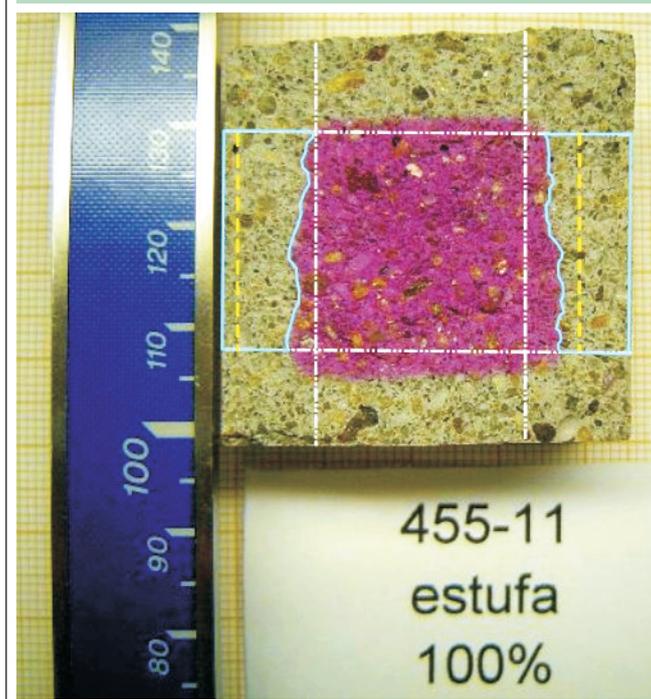


Tabela 5 – Análise de variância dos resultados de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor-p	Significância
Tempo de cura	19,83	1	19,83	16,75	0,0001	S
Tipo de cimento	248,96	1	248,96	210,23	0,0000	S
Relação a/c	1287,51	2	643,76	543,62	0,0000	S
% de CO <sub>2</sub>	899,53	1	889,53	751,16	0,0000	S
Interação cura x cimento	23,31	1	23,31	19,69	0,0000	S
Interação cura x a/c	0,11	2	0,056	0,05	0,9537	NS
Interação cura x % de CO <sub>2</sub>	121,92	1	121,92	102,95	0,0000	S
Interação cimento x a/c	19,89	2	9,94	8,40	0,0004	S
Interação cimento x % de CO <sub>2</sub>	5,14	1	5,14	4,34	0,0392	S
Interação a/c x % de CO <sub>2</sub>	88,54	2	44,27	37,39	0,0000	S
<b>Erro</b>	<b>152,76</b>	<b>129</b>	<b>1,18</b>			
<b>Total</b>	<b>2857,51</b>	<b>143</b>				

SQ = soma de quadrados; GDL = graus de liberdade; MQ = médias quadradas; Teste F = MQG/MQR (média quadrada do grupo/média quadrada do erro); valor-p = probabilidade, distribuição t de Student; significância: S = significativo e NS = não-significativo.

e alcançando condições de equilíbrio, baixa a velocidade de propagação da frente de carbonatação. Saetta e Vitaliani [42] ainda colocam que, semelhantemente, a quantidade de CO<sub>2</sub> consumida durante a reação pode ser maior que o gás que pode difundir através do concreto no mesmo intervalo de tempo, o que novamente retardaria o fenômeno. Em resumo, Saetta e Vitaliani [42] e Abreu [36] consideram que ao aumentar excessivamente a concentração de CO<sub>2</sub> (valores próximos à saturação), a velocidade de carbonatação é reduzida.

A ocorrência das condições anteriormente citadas poderia explicar o fato da profundidade de carbonatação em câmara saturada de CO<sub>2</sub> ser menor que em 6%. No entanto, essas afirmações ainda necessitam de comprovação realizando análises de microestrutura antes de serem tomadas como verdadeiras.

Sanjuán e Olmo [3] realizaram ensaios em atmosferas com 5, 20 e 100% de CO<sub>2</sub>, sendo que a profundidade de carbonatação foi maior nos corpos-de-prova carbonatados com percentual de 100%. Os pesquisadores calcularam os coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub>, e encontraram valores incomuns, para 100% de CO<sub>2</sub>.

Em outro trabalho, comparando a perda de massa de pastas totalmente carbonatadas a 100% de CO<sub>2</sub> e ao natural, por termogravimetria (TG), Kazmierczak e Lindenmeyer [43] constataram que a mesma é maior nos exemplares submetidos

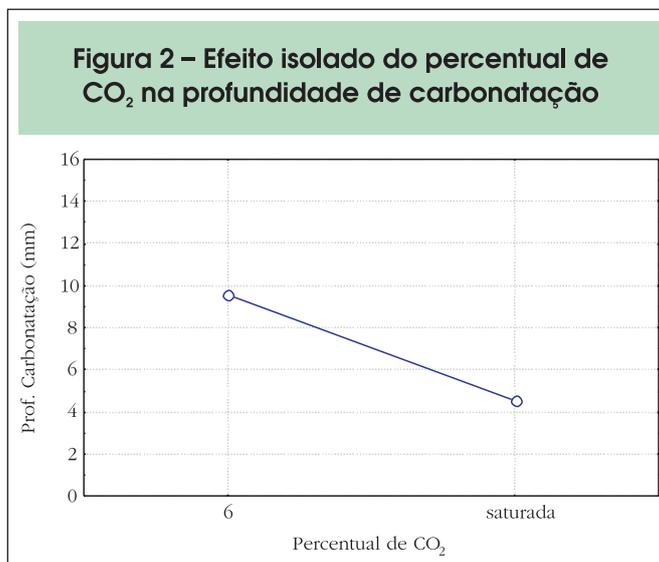
à carbonatação acelerada. Esse dado pode sugerir que em concentrações de CO<sub>2</sub> mais elevadas, há maior quantidade de produtos da carbonatação ou que os cristais obtidos nesta condição são mais densos.

No presente trabalho, a frente de carbonatação das amostras submetidas a 6% de CO<sub>2</sub>, em geral, se mostrou mais definida, ou seja, apresentou maior facilidade de determinação da mesma, quando comparada com as amostras ensaiadas em câmara saturada de CO<sub>2</sub>. Esta observação também foi feita por Sanjuán e Olmo [3] e Abreu [36], que ressaltam que a carbonatação em ensaios acelerados, mas com percentuais de CO<sub>2</sub> menores (20 e 5%), apresentaram uma frente mais homogênea que em altos teores (100 e próximo à saturação de CO<sub>2</sub>).

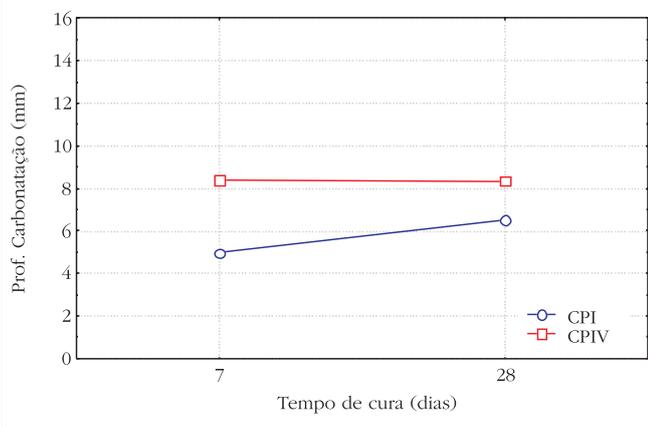
Na figura [3] é apresentada a interação entre o tempo de cura e o tipo de cimento na profundidade de carbonatação.

A figura [3] indica que a carbonatação foi afetada pelo tempo de cura inicial, sendo que esta influência é maior quando os corpos-de-prova são curados por 7 dias.

Ohga e Nagataki [11] constataram que o coeficiente de carbonatação de cimentos com cinza volante é mais afetado pela cura inicial que aqueles sem a pozolana. Balayssac et al. [44] estudaram tempos de cura de 1, 3 e 28 dias. A cura de 1 para 28 dias reduziu a profundidade de carbonatação pela metade após 18 meses de exposição, no entanto o efeito da cura dependeu do tipo de cimento.

Figura 2 – Efeito isolado do percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação

**Figura 3 – Interação entre o tempo de cura e o tipo de cimento na profundidade de carbonatação**



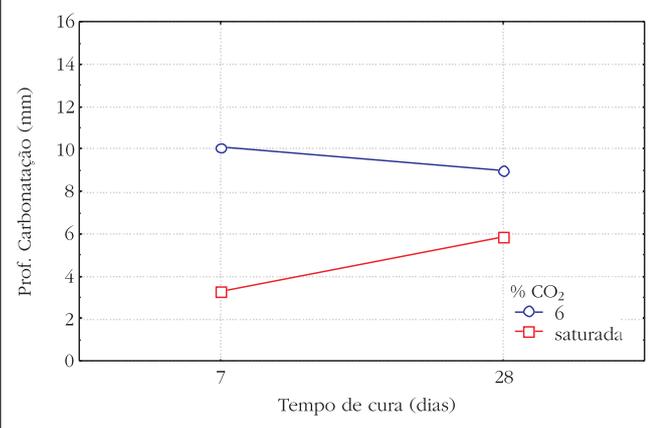
Em uma primeira análise, o comportamento do cimento CPI-S parece ilógico. Observa-se, entretanto, uma forte influência dos corpos-de-prova submetidos à carbonatação em câmara saturada de CO<sub>2</sub> neste comportamento, conforme visualizado na figura [4], que ilustra a relação entre o tempo de cura e o percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação.

A figura [4] indica a interação significativa entre o percentual de CO<sub>2</sub> e o tempo de cura submersa, sendo que ao passar a cura de 7 para 28 dias, tem-se, em média, um decréscimo de 11% na profundidade de carbonatação, com 6% de CO<sub>2</sub>, ao passo que em câmara saturada de CO<sub>2</sub>, tem-se um acréscimo desse valor, em torno de 79%.

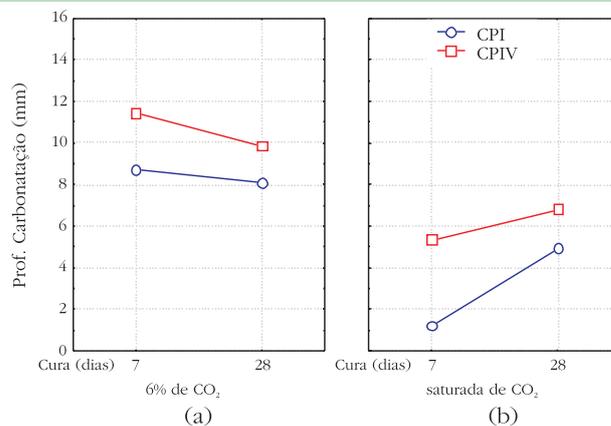
A influência do percentual de CO<sub>2</sub> é mais evidente na cura de 7 dias, onde a variação entre os dois percentuais é de cerca de 6,81 mm, enquanto na cura de 28 dias essa diferença fica em torno de 3,13 mm.

Conforme a tabela [5], o valor do "teste F" da interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento é de

**Figura 4 – Interação entre o tempo de cura e o percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação**



**Figura 5 – Interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento para: (a) 6% de CO<sub>2</sub> e (b) câmara saturada de CO<sub>2</sub>, na profundidade de carbonatação**



19,69, e da interação entre o tempo de cura submersa e o percentual de CO<sub>2</sub>, é de 102,95. Comparando esses valores, verifica-se que a interação com o percentual de CO<sub>2</sub> é 5,2 vezes mais forte, indicando que o comportamento dos cimentos, especialmente do CPI-S, da figura [3] foi mascarado pelo percentual de CO<sub>2</sub>, como mostra a figura [5], que ilustra a interação de segunda ordem entre o tempo de cura submersa, tipo de cimento e percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação.

A figura [5] confirma que o comportamento do CPI-S, com relação ao tempo de cura submersa, foi contrário ao esperado em função dos resultados de carbonatação ensaiadas em câmara saturada de CO<sub>2</sub>. Analisando os resultados da câmara saturada de CO<sub>2</sub> (figura [5] (b)), percebe-se que para os dois tipos de cimento a carbonatação foi maior quando a cura foi de 28 dias. Ainda, pode-se ressaltar que quando uti-

**Figura 6 – Interação entre a relação a/c e o percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação**

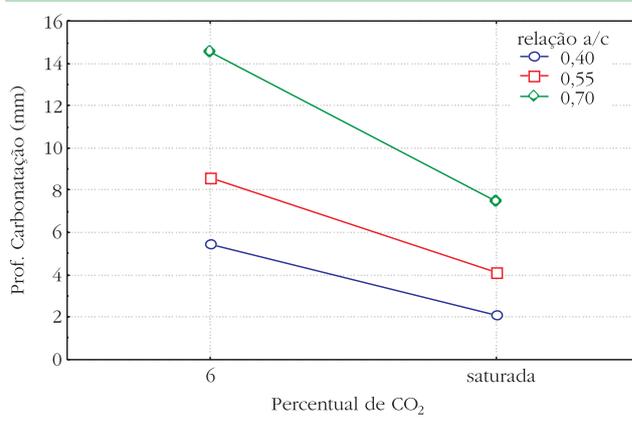


Tabela 6 – Resistência à compressão axial (f<sub>c</sub>) média

Relação a/c	7 dias		28 dias		63 dias	
	f <sub>c</sub> (MPa)	CV (%)	f <sub>c</sub> (MPa)	CV (%)	f <sub>c</sub> (MPa)	CV (%)
CPI – 0,40	32,5	5,7	37,9	8,3	43,5	4,9
CPIV – 0,40	29,8	3,9	39,9	13,4	50,6	3,5
CPI – 0,55	23,6	5,8	28,9	2,7	31,2	5,1
CPIV – 0,55	19,1	3,0	28,8	5,8	34,9	7,2
CPI – 0,70	15,6	4,5	19,0	3,5	20,0	3,5
CPIV – 0,70	12,5	6,2	20,5	5,1	27,2	1,9

lizado o percentual de CO<sub>2</sub> mais baixo (6%), a profundidade de carbonatação decresce, para ambos os tipos de cimento, quando a cura passa de 7 para 28 dias, sendo o CPIV mais influenciado pelo tempo de cura submersa.

A interação entre a relação a/c e o percentual de CO<sub>2</sub>, na profundidade de carbonatação, é ilustrada na figura [6].

A figura [6] indica que para todas as relações a/c, a profundidade de carbonatação em 6% de CO<sub>2</sub> é maior que aquela em câmara saturada de CO<sub>2</sub>. As distâncias entre as diferentes relações a/c são maiores para o percentual de 6% de CO<sub>2</sub>, especialmente quando se passa da relação a/c 0,55, para a relação a/c 0,70.

A bibliografia que contempla ensaios de carbonatação acelerada, com diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>, é bastante escassa. De uma forma geral, não há consenso a respeito do comportamento da carbonatação, em ensaios acelerados, o que indica que mais ensaios devem ser feitos para conhecer melhor o efeito de diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>.

#### 4.2 Resistência à compressão axial

A tabela [6] apresenta os resultados médios da resistência à compressão axial para cada idade de ruptura, bem como o coeficiente de variação (CV) dos mesmos. A média foi obtida a partir de 6 corpos-de-prova.

Os resultados de resistência à compressão axial foram utilizados apenas como parâmetro de controle da execução das misturas. Analisando os resultados obtidos pode-se perceber que os coeficientes de variação foram relativamente pequenos comprovando a qualidade de moldagem.

### 5 Conclusões

Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que a utilização de percentuais muito elevados de CO<sub>2</sub> (câmara saturada) promovem profundidades de carbonatação menores que os obtidos em ensaios com baixos teores de CO<sub>2</sub> (no caso, com 6% de CO<sub>2</sub>), nas condições aqui investigadas.

A frente de carbonatação na menor concentração de CO<sub>2</sub> se mostrou mais definida, ou seja, a sua determinação foi mais fácil que a das amostras carbonatadas em câmara saturada.

Cabe salientar que outros percentuais de CO<sub>2</sub> devem ser estudados, a fim de estabelecer o mais adequado para os ensaios acelerados de carbonatação. Ensaios de microestrutura devem ser realizados, a fim de apurar as causas pelas quais a carbonatação foi menor em maiores concentrações de CO<sub>2</sub>, nos ensaios acelerados.

Além disso, os resultados de ensaios de carbonatação acelerada devem ser correlacionados com dados originados em ensaios de carbonatação natural, para que se possam estabelecer as condições (inclusive o percentual de CO<sub>2</sub>) nas quais o comportamento do fenômeno mais se assemelha ao que ocorre na prática. Ensaios que permitirão estabelecer comparações, a partir de dados de carbonatação acelerada e natural, estão sendo realizados pelos presentes autores.

### 6 Referências bibliográficas

- [01] REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX – RILEM. Concrete Durability - An approach towards performance testing. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). Materials and Structures, p. 163-173, 1999.
- [02] ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies. Building and Environment, v/n. 34, p. 597-606, 1999.
- [03] SANJUÁN, M. A.; OLMO, C. del. Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. Building and Environment, v. 36, n. 8, p. 949-953, Oct 2001.
- [04] PARROT, L. J. A review of carbonation in reinforced concrete. Wexham Springs, Cement and Concrete Association. 1986, 69p.
- [05] TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. 1982. 469f. Tese (Doutorado). Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- [06] YING-YU, L.; QUI-DONG, W. The mechanism of carbonation of mortars and the independence of carbonation on pore structure. In: CONCRETE DURABILITY, Detroit, 1987. Proceedings... Detroit, ACI, 1987. p. 1915-43. (SP-100).

- [07] HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 3, p. 489-504, May 1987.
- [08] ANDRADE, C.; ALONSO, C.; BACLE, B. Accelerated testing methodology for evaluating carbonation and chloride resistance of concrete coatings. In: *FIP SYMPOSIUM*, [s. ed.], 1988, Israel. *Proceedings...* Jerusalem, Sep 1988. p. 61-67.
- [09] FATTUHI, N. I. Concrete carbonation as influenced by curing regime. *Cement and Concrete Research*, v. 18, n. 3, p. 426-430, May 1988.
- [10] DHIR, R. K.; HEWLETT, P. C.; CHAN, Y. N. Near-surface characteristics of concrete: prediction of carbonation resistance. *Magazine of Concrete Research*, Dundee, UK, v. 41, n. 148, p. 137-143, 1989.
- [11] OHGA, H.; NAGATAKI, S. Prediction of carbonation depth of concrete with fly ash. In: *FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE*, [s.ed.], 1989, Detroit. *Proceedings...* Detroit, ACI, 1989, v. 1, p. 275-294: (SP-114).
- [12] KOBAYASHI, K.; UNO, Y. Influence of alkali on carbonation of concrete, part I - Preliminary tests with mortar specimens. *Cement and Concrete Research*, v. 19, n. 5, p. 821-826, Sep 1989.
- [13] PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*. n. 88, p. 363-373, Jul-Aug 1991.
- [14] BRANCA et al. Combined effect of carbonation and chloride on corrosion of reinforcement in fly ash concrete. In: *MALHOTRA, V. M. (ed) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 4th, 1992, Istanbul. *Proceedings...* Detroit, ACI, 1993. v. 1, p. 245-256 (SP-132).
- [15] NEPOMUCENO, A. A. Comportamiento de los morteros de reparacion frente la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion. 1992. 394f. PhD Thesis - Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad politecnica de Madrid, Madrid-España, 1992.
- [16] ISAIA, G. C. Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. 1995. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [17] KAZMIERCZAK, C. S. Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação. 1995. 168f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [18] JOHN, V.M. Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. São Paulo, 1995. 112p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [19] BAUER, E. Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas. 1995. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [20] MONTEIRO, E. C. B. Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos. 1996. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- [21] SEIDLER, N. Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios. 1999. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [22] VAGHETTI, M. A. O. Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto com cimento Portland. 1999. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.
- [23] LOPES, A. N. M. Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa. 1999. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- [24] PAPADAKIS, V.G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, v.30, p.291-299, 2000.
- [25] ALVES, A. S. Efeitos físicos e químicos de misturas pozolânicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concretos de alto desempenho. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- [26] JIANG, L.; LIN, B.; CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 5, p. 699-702, May 2000.

- [27] CUNHA, A. M. Q.; HELENE, P. R. L. Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação. São Paulo: EPUSP, 2001. 13 p. + anexos. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/283).
- [28] JOHANNESSON, B.; UTGENANNT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 6, p. 925-931, May 2001.
- [29] VENQUIARUTO, S. D. A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto. 2002. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.
- [30] KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [31] LO, Y.; LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. *Building and Environment*, v. 37, n. 5, p. 507-514, May 2002.
- [32] COELHO, M. A. M. et al. Estudo da carbonatação e retração em concretos de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno. In CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44<sup>o</sup>, 2002, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 2002, 14p.
- [33] KIRCHHEIM, A. P. Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar. 2003. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [34] VAN GERVEN, T. et al. Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, p. 149-156, Jan 2004.
- [35] GERVAIS et al. The effects of carbonation and drying during intermittent leaching on the release of inorganic constituents from a cement-based matrix. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, p. 119-131, Jan 2004.
- [36] ABREU, A. G. Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante. 2004. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.
- [38] \_\_\_\_\_. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- [39] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book of ASTM Standards. Designation: C 150 –97a: Standard specification for Portland cement. 1998, v. 14.02.
- [40] \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Designation: E 632 –82 (reapproved 1996): Standard specification for Portland cement. 1998, v. 14.02.
- [41] REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX – RILEM. Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM Recommendation CPC-18). *Materials and Structures*, p. 453-5, 1988.
- [42] SAETTA A. V.; VITALIANI, R. V. Investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 4, p. 571-579, Apr 2004.
- [43] KAZMIERCZAK, C. S.; LINDENMEYER, Z. Comparação entre metodologias para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, [s. ed.], 1996, Florianópolis. Proceedings... Florianópolis, 1996. p. 402-413.
- [44] BALAYSSAC, J. P.; DÉTRICHÉ, Ch. H.; GRANDET, J. Effects of curing upon carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*, British, v. 9, n. 2, p. 91-95, 1995.