

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil

ISSN 0103-9830
BT/PCC/425

**Modelos de previsão da despassivação das
armaduras em estruturas de concreto sujeitas
à carbonatação**

Thomas Garcia Carmona
Paulo Roberto do Lago Helene

São Paulo – 2006

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Construção Civil
Boletim Técnico – Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Vahan Agopyan
Vice-Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Alex Kenya Abiko
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves

Conselho Editorial
Prof. Dr. Alex Abiko
Prof. Dr. Francisco Ferreira Cardoso
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.
Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves
Prof. Dr. Paulo Helene
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

Coordenador Técnico
Prof. Dr. João Petreche

O presente trabalho é parte da dissertação de mestrado apresentada por Thomas Garcia Carmona, sob orientação do Prof. Dr. Paulo R. L. Helene: "Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas a Carbonatação", defendida em 10/06/2005, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia Civil da Escola Politécnica/USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Carmona, Thomas Garcia

Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas a carbonatação / Thomas Garcia Carmona, Paulo R. L. Helene Figueiredo. -- São Paulo : EPUSP, 2006.

12 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil ; BT/PCC/425)

1. Estruturas de concreto armado (Durabilidade) 2. Corrosão (Previsão) I. Helene, Paulo R. L. II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil III. Título IV. Série
ISSN 0103-9830

MODELOS DE PREVISÃO DA DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO SUJEITAS À CARBONATAÇÃO

PREDICTION MODELS OF DESPASSIVATION OF REINFORCEMENT STEEL DUE TO CARBONATION IN CONCRETE STRUCTURES

Thomas Carmona & Paulo Helene

RESUMO

Este trabalho apresenta o conhecimento atual sobre a previsão da despassivação das armaduras devido à carbonatação em estruturas de concreto.

São feitas comparações entre os resultados obtidos por diversos modelos bem como discutidas as suas limitações.

ABSTRACT

This work presents the recent knowledge about the prediction of depassivation of reinforcement steel due to carbonation in concrete structures.

Comparisons are made between the results obtained by several models and their limitations are discussed.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado apesar de ser uma associação inteligente de materiais, ser versátil e durável, está sujeito a vários tipos de deterioração, que podem ser causadas por um grande número de mecanismos.

Dentre eles a corrosão de armaduras tem se mostrado o de maior incidência e que maiores prejuízos econômicos tem trazido aos países.

CARMONA & MAREGA (1988), DAL MOLIN (1988) e NINCE (1996) encontraram para o problema da corrosão de armaduras em edificações uma incidência da ordem de 30%.

As armaduras no interior do concreto estão protegidas da corrosão por estarem em um pH alcalino, em torno de 13. Essa condição denominada de passivação pode ser alterada por ação de agentes agressivos como o CO₂ atmosférico ou a presença de íons cloreto.

Às reações químicas entre os componentes do cimento hidratado e o CO₂ se dá o nome de carbonatação. Essas reações provocam a redução do pH da solução intersticial dos poros do concreto e quando atingem a profundidade da armadura a deixam em condições de desenvolver um processo corrosivo.

2. MODELOS DE PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO

2.1. TUUTTI (1982)

TUUTTI resolveu o problema da carbonatação do concreto recorrendo a uma particularização do cálculo de difusão com fronteiras móveis equacionado por CRANK (1975):

$$\frac{C_x - C_1}{g\left(\frac{k_{CO_2}}{2} \sqrt{D_{CO_2}}\right)} + C_x - C_2 = 0 \quad (1)$$

$$g\left(\frac{k_{CO_2}}{2} \sqrt{D_{CO_2}}\right) = \sqrt{\pi} \frac{k_{CO_2}}{2\sqrt{D_{CO_2}}} e^{\frac{k_{CO_2}^2}{4D_{CO_2}}} \operatorname{erf} \frac{k_{CO_2}}{2\sqrt{D_{CO_2}}} \quad (2)$$

$$e = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad (3)$$

Onde:

C_x = Concentração de CO_2 na descontinuidade (kg/m^3).

C_1 = Concentração de CO_2 no ar (kg/m^3).

C_2 = Concentração de CO_2 no material (kg/m^3).

k_{CO_2} = Coeficiente de carbonatação ($m/s^{1/2}$).

D_{CO_2} = Coeficiente de difusão do CO_2 (m^2/s).

X = Profundidade de carbonatação (m).

t = tempo (s).

Para aplicar esse modelo TUUTTI supõe que o coeficiente de difusão efetivo do CO_2 é igual ao do O_2 , devendo também ser corrigido em função da umidade relativa do ar.

Em seu trabalho TUUTTI conclui que a relação entre as concentrações $\frac{C_x - C_1}{C_2 - C_x}$ que possibilita o cálculo de “ k_{CO_2} ” é finalmente a relação entre a concentração de CO_2 ambiente e a quantidade de substâncias passíveis de sofrerem carbonatação no concreto.

$$\frac{C_x - C_1}{C_2 - C_x} = \frac{C_s}{a} \quad (4)$$

Onde:

C_s = concentração de CO_2 no ar (kg/m^3)

a = teor de CaO em $1 m^3$ de concreto (kg/m^3)

Para o cálculo da reserva alcalina “ a ” é necessário conhecer o consumo de cimento e o grau de hidratação e para tal o autor se reporta a BYFORS (1980).

2.2. SENTLER (1984)

Segundo SENTLER a carbonatação pode ser expressa de maneira estocástica de acordo com a seguinte equação:

$$f(e, e_0; t) = \left[\frac{1}{\sigma(2\pi t^{0,5})^{0,5}} \right] \frac{(e - e_0 - \mu t^{0,5})^2}{2\sigma^2 t^{0,5}} \quad (5)$$

Onde f é uma função de densidade normal com média $e_0 + \mu t^{0,5}$ e variância $\sigma^2 t^{0,5}$. O valor inicial da profundidade de carbonatação e_0 representa a carbonatação mais rápida que ocorre na superfície do concreto.

2.3. PARROT (1987)

O modelo de PARROT é dado pelas seguintes equações:

$$e = \frac{a k^{0,4} t_i^n}{CaO^{0,5}} \quad (6)$$

$$k = m k_{60} \quad (7)$$

$$m = \begin{cases} 1,6 - 0,00115 UR - 0,0001475 UR^2 & UR > 60\% \\ 1 & UR \leq 60\% \end{cases} \quad (8)$$

$$n = 0,02536 + 0,01785 UR - 0,0001623 UR^2 \quad (9)$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação (m)

a = fator empírico que toma o valor aproximado de 64

k_{60} = Permeabilidade do concreto para UR = 60% (m²)

t = tempo (s)

CaO = Conteúdo de CaO no cimento (kg/m³)

UR = Umidade relativa do ar (%)

n = Fator do tempo em função da umidade relativa

2.4. BAKKER (1988)

BAKKER em seu modelo, despreza a carbonatação quando o concreto está úmido e portanto o concreto primeiramente terá que secar-se para posteriormente se carbonatar. Assim a frente de evaporação limitará a frente de carbonatação.

A profundidade da frente de evaporação é calculada de maneira similar a qualquer outro processo de difusão, e a profundidade seca é dada pelas seguintes equações:

$$y = B\sqrt{t} \quad (10)$$

$$B = \sqrt{\frac{2D_v}{b}(C_3 - C_4)} \quad (11)$$

$$b = w - 0,25 C - GH - 0,15 C GH D_{gel} - w GH D_{cap} \quad (12)$$

Onde:

y = profundidade seca (m)

D_v = Coeficiente de difusão do vapor de água (m²/s)

b = Quantidade de água evaporada do concreto (kg)

C_3 = Umidade da frente de evaporação (kg/m³)

- C_4 = Umidade do ar (kg/m^3)
 w = Quantidade total de água do traço (kg/m^3)
 C = Consumo de cimento (kg/m^3)
 GH = Grau de hidratação do cimento
 D_{gel} = Água de gel (kg/m^3)
 D_{cap} = Água dos poros capilares (kg/m^3)

A equação global que reflete a velocidade de carbonatação nos ciclos de umidade e secagem é a seguinte:

$$e = A\sqrt{t_1} + A\sqrt{t_2 - \left(\frac{e_1}{B}\right)^2} + \dots + A\sqrt{t_N - \left(\frac{e_{n-1}}{B}\right)^2} \quad (13)$$

$$A = \sqrt{\frac{2D_{\text{CO}_2}}{a} (C_s - C_2)} \quad (14)$$

$$B = \sqrt{\frac{2D_v}{b} (C_3 - C_4)} \quad (15)$$

Onde:

- e = Profundidade de carbonatação no tempo t (m).
 e_n = Profundidade de carbonatação no tempo t_n (m)
 D_{CO_2} = Coeficiente de difusão do CO_2 (m^2/s)
 D_v = Coeficiente de difusão do vapor de água (m^2/s)
 a = Quantidade de compostos alcalinos do concreto (kg/m^3)
 b = Quantidade de água evaporada do concreto (kg/m^3)
 C_s = Concentração de CO_2 no ar (kg/m^3)
 C_2 = Concentração de CO_2 na frente de carbonatação (kg/m^3)
 C_3 = Umidade da frente de evaporação (kg/m^3)
 C_4 = Umidade do ar (kg/m^3)

Caso não exista período de molhagem o modelo se reduz à seguinte equação:

$$e = A\sqrt{t} \quad (16)$$

2.5. SCHIESSL (1988)

A quantidade de dióxido de carbono que atravessa uma seção de concreto vem dada pela equação:

$$d_q = D_{\text{CO}_2-90} F \frac{c_1 - c_2}{e} dt \quad (17)$$

Onde:

- d_q = Quantidade de CO_2 difundida (kg)
 D_{CO_2-90} = Coeficiente de difusão do CO_2 aos 90 dias (m^2/s)
 F = Seção transversal (m^2)

$c_1 - c_2$ = Diferença de concentração de CO_2 entre o ar e a frente de carbonatação (kg/m^3)
 e = Profundidade de penetração (m)
 t = tempo (s)

SCHIESSL introduziu um fator “f” que descreve a diminuição do valor de D_{CO_2} com a profundidade e um fator de retardamento da carbonatação “b”, determinado pela quantidade de compostos alcalinos que se difundem do interior do concreto até a frente de carbonatação.

$$x = \frac{D_{\text{CO}_2-90} (c_1 - c_2)}{b + f D_{\text{CO}_2-90} (c_1 - c_2)} \quad (18)$$

2.6. PAPADAKIS et al. (1989, 1991a, 1991b, 1992)

PAPADAKIS et al. partindo de considerações físico químicas modela a reação do CO_2 com CH, CSH, C_3S e C_2S .

Para geometria unidirecional a evolução da posição da frente de carbonatação no tempo é dada por uma simples expressão analítica em função da difusividade do CO_2 no concreto carbonatado, da concentração ambiente de CO_2 e da concentração total de CaO no concreto na forma de materiais carbonatáveis:

$$e = \sqrt{\frac{2D_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]}{[\text{CH}]^0 + 3[\text{CSH}]^0 + 3[\text{C}_3\text{S}]^0 + 2[\text{C}_2\text{S}]^0}} \sqrt{t} \quad (19)$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação

D_{CO_2} = Coeficiente de difusão do CO_2 no concreto carbonatado (m^2 / s)

$[\text{CO}_2]$ = Concentração inicial de CO_2 (mol / m^3)

$[\text{CH}]^0$ = Concentração de CH ao término da cura (mol / m^3)

$[\text{CSH}]^0$ = Concentração de CSH ao término da cura (mol / m^3)

$[\text{C}_3\text{S}]^0$ = Concentração de C_3S ao término da cura (mol / m^3)

$[\text{C}_2\text{S}]^0$ = Concentração de C_2S ao término da cura (mol / m^3)

t = Tempo (s)

Para determinação dos compostos carbonatáveis da pasta de cimento hidratado em função do tempo os autores recorrem a cálculos baseados nas reações químicas de hidratação.

2.7. THOMAS & MATHEWS (1992)

Esses pesquisadores propõem a adoção de nomogramas ao invés de equações, para representar as variáveis envolvidas no processo de carbonatação e que atuam simultaneamente.

O nomograma apresentado na Figura 1 é utilizado para a predição do coeficiente de carbonatação k_{CO_2} da eq.(3) no qual se relacionam o período inicial de cura, a umidade relativa do ar após a desforma, o teor de cinza volante e a resistência à compressão.

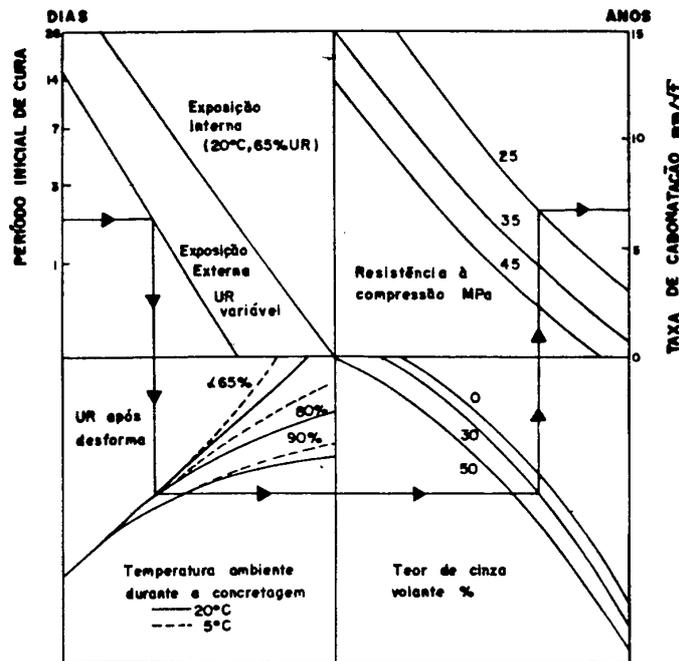


Figura 1: Nomograma para previsão do coeficiente de carbonatação k_{CO_2} (THOMAS & MATTHEWS, 1992).

2.8. CEB (1996)

O modelo apresentado pelo CEB é o seguinte:

$$e = k_{CO_2} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \cdot \sqrt{t} \quad (20)$$

$$k_{CO_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2} \cdot C_s \cdot K_1 \cdot K_2}{a}} \quad (21)$$

$$D_{CO_2} = 10^{-\left(7 + 0,025 \frac{f_{ck}}{10}\right)} \quad (22)$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação (m)

D_{CO_2} = Coeficiente de difusão do CO_2 no concreto carbonatado (m^2/s)

C_s = Concentração de CO_2 no ar (kg/m^3)

a = Teor de CaO em $1 m^3$ de concreto (kg/m^3)

t = Tempo (s)

t_0 = Tempo de cura

n = Fator de idade

$K_1 \cdot K_2$ = Coeficientes de cura e exposição

k_{CO_2} = Coeficiente de carbonatação ($m/s^{1/2}$)

f_{ck} = Resistência característica do concreto (MPa)

Segundo consta nessa referência o valor 7×10^{-6} pode ser adotado para a relação $\frac{C_s}{a}$ para concretos normais de cimento portland em ambientes convencionais.

2.9. HELENE (1997)

HELENE também propõe a adoção de ábacos para a determinação de cobrimentos de armaduras de estruturas expostas à carbonatação em função da vida útil de projeto desejada (período de iniciação).

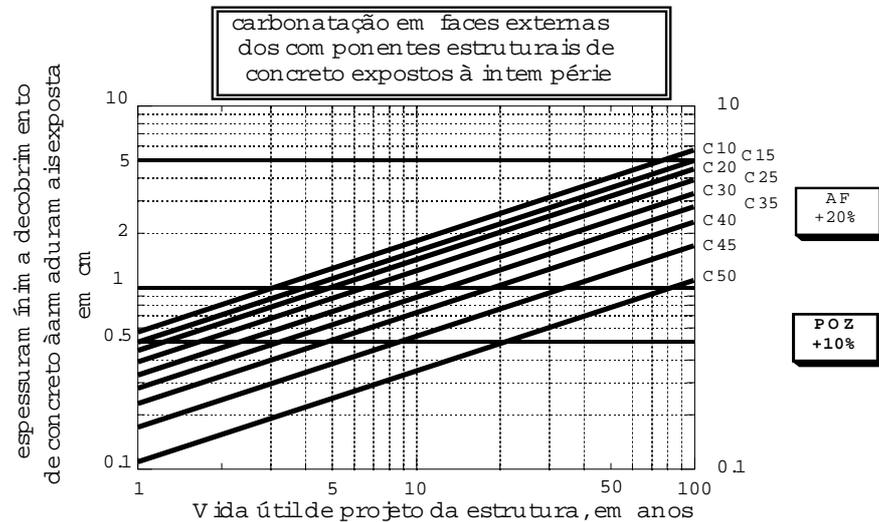


Figura 2: Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento com relação à carbonatação em função do tipo de concreto (C10 a C50) e da vida útil de projeto desejada (1 a 100 anos).

Embora o resultado desse ábaco seja a espessura de cobrimento, os valores de k_{CO_2} podem ser deduzidos para cada tipo de concreto, em função da vida útil de projeto e do cobrimento indicado utilizando-se a eq.(3).

O ajuste dos valores de K_{CO_2} em função do tipo de concreto revela uma relação linear e a previsão pode ser feita pela equação:

$$k_{CO_2} = 6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck} \quad (23)$$

Onde :

k_{CO_2} = Coeficiente de carbonatação ($mm/ano^{1/2}$)

f_{ck} = Resistência característica do concreto (MPa)

Ainda segundo este modelo a utilização de cimentos de auto-forno e pozolânicos leva a profundidades carbonatadas 20 e 10% maiores respectivamente em relação ao cimento portland e assim as equações para estimativa de K_{CO_2} podem ser escritas da seguinte maneira:

$$k_{CO_2 AF} = 1,2 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \quad (24)$$

$$k_{CO_2 POZ} = 1,1 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \quad (25)$$

Onde :

$k_{CO_2 AF}$ = Coeficiente de carbonatação para cimentos de auto forno ($mm/ano^{1/2}$)

$k_{CO_2 POZ}$ = Coeficiente de carbonatação para cimentos pozolânicos ($mm/ano^{1/2}$)

f_{ck} = Resistência característica do concreto (MPa)

O ábaco da figura 2 foi desenvolvido para uma concentração de CO₂ ambiente de 0,1% e assim a generalização para outras concentrações é dada pela seguinte equação:

$$k_{CO_2} = (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (26)$$

Onde :

C_s = Concentração ambiente de CO₂ (% volume)

Da mesma forma as equações eq.24 e eq.25 podem ser reescritas:

$$k_{CO_2 AF} = 1,2 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (27)$$

$$k_{CO_2 POZ} = 1,1 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (28)$$

2.10. IZQUIERDO (2003)

IZQUIERDO baseado no modelo do CEB e em função de um estudo amplo de resultados de laboratório e campo de diversos investigadores apresenta o seguinte modelo estatístico:

$$e = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2} \cdot C_s \cdot K_t \cdot K_e \cdot K_p}{a}} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \sqrt{t} \quad (29)$$

$$D_{CO_2} = 10^{\varepsilon + A + B \cdot \log(a/c)} \quad (30)$$

Tabela 1: Proposta de IZQUIERDO (2003) para caracterização estatística do modelo de carbonatação.

Variável		Unidade	Distribuição	Média	CV* (%)
A	Coef. de regressão	-	Normal	-15,156	5
B	Coef. de regressão	-	Normal	4,7213	24
ε	Termo de erro	-	Normal	1	70,10
K_t	Coef. da raiz do tempo	-	Normal	1	15
K_E	Fator de HR (70%)	-	Beta	0,85	14
	Fator de HR (80%)	-	Beta	0,52	40
K_p	Fator geral do modelo	-	Normal	1	30
n	Fator de idade do concreto	-	Log normal truncada	0,13	80
C_s	Concentração de CO ₂ no ar	kg CO ₂ /m ³	Normal	0,00066	15
a/c	Relação água cimento	-	Normal	Nominal	5
C	Consumo de cimento	kg/m ³	Normal	Nominal	5

* CV = Coeficiente de Variação

2.11. ANDRADE (2004)

Segundo a autora com os conhecimentos atuais é mais conveniente estabelecer modelos de vida útil baseados em parâmetros de medição mais fácil e propõe um modelo baseado na resistividade do concreto, aplicável tanto à penetração de cloretos como à carbonatação.

Abaixo apresentamos o modelo de resistividade proposto por ANDRADE:

$$t_i = \frac{x^2 \cdot \rho_{es} \cdot r_{Cl,CO_2}}{k_{Cl,CO_2}} \quad (31)$$

Onde:

t_i = período de iniciação (s)

x = cobrimento (m)

ρ_{es} = resistividade esperada ($\Omega \cdot m$)

r_{Cl,CO_2} = coeficiente de combinação (s)

k_{Cl,CO_2} = constante de agressividade ambiental. ($\Omega \cdot m^3$)

2.13. Comentários Sobre os Modelos de Carbonatação

Embora os modelos matemáticos estudados contribuam muito para o entendimento do fenômeno da carbonatação muitos deles são incompletos com relação à previsão, ou seja, não apresentam as equações para estimativa de todos os parâmetros em função das características do concreto e do ambiente. Aqui se incluem os modelos de SENTLER (1984), PARROT (1987), BAKKER (1988) E SCHIESSSEL (1988).

Apesar de estar corretamente postulado em termos conceituais o modelo de BAKKER (1988) apresenta um erro em sua formulação matemática. A idéia do pesquisador é calcular o tempo total no qual o concreto não se encontra saturado, possibilitando a carbonatação e em seguida aplicar o modelo da raiz do tempo. Assim sendo é necessário realizar o cálculo da profundidade de carbonatação multiplicando-se um fator pela raiz da somatória dos tempos “não saturados”. A formulação apresentada é a somatória das raízes dos tempos o que produz resultados totalmente diferentes.

O modelo de TUUTTI (1982) é bastante completo porém a inexistência de equações para obtenção dos coeficientes de difusão torna difícil a sua aplicação prática. Além disso, seus estudos indiretos de carbonatação através das medidas de penetração de oxigênio levaram a conclusões errôneas nos concretos com adições.

Os modelos de TUUTTI, PAPADAKIS, CEB e IZQUIERDO levam em conta o consumo de cimento para o cálculo da reserva alcalina do concreto, o que é um erro conforme comprovado na bibliografia (HELENE, 1993; NUNES, 1998; SIERRA et. al., 1998, MITRE et. al., 2002).

O único modelo que leva em conta diferentes tipos de cimento é o modelo de HELENE (1997).

O modelo de PAPADAKIS (1989) é bastante completo e contempla a influência de praticamente todos os parâmetros, com exceção dos ciclos de molhagem e secagem explorado por BAKKER (1988). O método de cálculo da reserva alcalina por esse modelo também é limitado ao cimento portland comum (CPI).

O ábaco de THOMAS & MATHEWS (1992) embora conceitualmente adequado não é genérico, por que foi elaborado para uma condição específica de exposição.

Nota-se que os modelos de SENTLER (1984), PAPADAKIS (1989) e CEB (1996) seguem a mesma formulação geral, variando apenas a maneira de cálculo das variáveis.

Embora o modelo do CEB (1996) tenha a desvantagem de não considerar de maneira explícita os valores de umidade relativa do ar e ciclos de molhagem e secagem. É um único modelo que contempla todas as variáveis exceto o tipo de cimento, sendo que as condições de cura e exposição são levadas em conta com o uso das tabelas de coeficientes.

A importante contribuição do modelo de IZQUIERDO (2003) é a caracterização estatística das variáveis. Esse modelo é extremamente complexo e só pode ser utilizado empregando sistemas computacionais específicos para análises de confiabilidade.

O modelo de ANDRADE (2004) é bastante interessante pela simplicidade do ensaio de resistividade do concreto, entretanto esse modelo ainda está muito incipiente e não estão disponíveis no momento os valores de seus coeficientes.

A seguir se fará a comparação entre os modelos de TUUTTI (1982), PAPADAKIS (1989), CEB (1986), THOMAS & MATHEWS (1992) e HELENE (1997) para algumas classes de concreto em condições ambientais de elevado risco de corrosão.

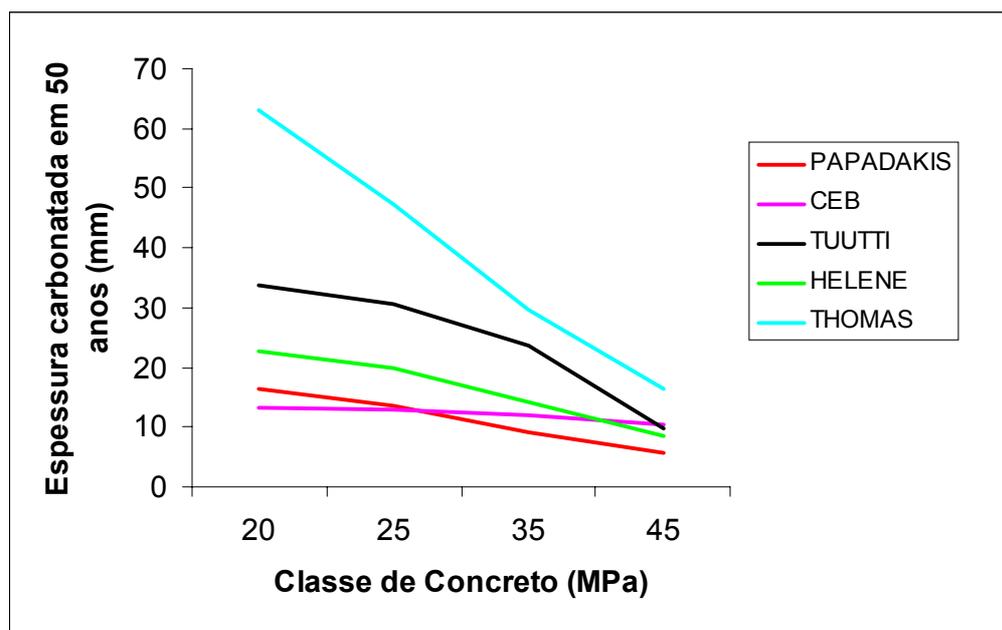


Figura 3: Profundidade de carbonatação em 50 anos, em função do tipo de concreto segundo os principais modelos.

Nota-se que para os dados de entrada utilizados os valores mais próximos são os obtidos pelos modelos do CEB e PAPADAKIS.

Os modelos coincidem que concretos de maior resistência apresentam profundidades carbonatadas muito inferiores a concretos de menor resistência.

As máximas profundidades foram obtidas pelo modelo de THOMAS & MATHEWS.

Pode-se observar que o modelo do CEB apresenta uma variação muito pequena na profundidade carbonatada em função da classe de concreto, revelando que o modelo considera uma influência maior das condições ambientais.

3. CONCLUSÕES

O modelo que se mostrou mais genérico e ainda assim prático foi o modelo de HELENE (1997). Ainda que maiores desenvolvimentos sejam necessários o modelo é muito adequado para o emprego no projeto de novas estruturas e incorporação nas normas de projeto, seja na forma de ábaco ou de equações.

Modelos como os de TUUTTI (1982), PAPADAKIS (1989) e CEB (1996), ainda carecem de maior desenvolvimento pois apresentam inconsistências teóricas.

Uma limitação existente em todos os modelos é a pequena informação disponível no que se refere à influência de revestimentos e pinturas aplicados sobre o concreto.

Não existe conhecimento considerável sobre a agressividade ambiental a que estão sujeitas as estruturas em ambientes normais e também em situações especiais como por exemplo atmosferas viciadas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. **Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity**. Proceedings of the International Symposium on advances in concrete through science and engineering, march 22-24, 2004, RILEM. Evanston, Northwestern University, USA.
- BAKKER, R.F.M. Chapter Three. In: SCHIESSL, P. ed. **Corrosion of Steel in Concrete**. Report of the Technical Committee 60 – CSC. RILEM. London, Chapman & Hall, 1988. p. 36-42.
- BYFORS, J. **Plain Concrete at Early Ages**. Stockholm, 1980. Research report Fo 3:80 - Cement – och Betonginstitutet.
- CARMONA, A. F.; MAREGA, A. **Retrospectiva da Patologia no Brasil; Estudo Estatístico**. In: Jornadas en Español y Português sobre Estructuras y Materiales, Madrid, 1988. Colloquia 88. Madrid, CEDEX, IETcc, mayo 1988. p. 325-48.
- COMITE EURO-INTERNACIONAL du BETON. **Durable Concrete Structures**. Report of Task Group 1 + 2, 1996.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. New York, Oxford University Press, 1975.
- 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, 1988. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do rio Grande do Sul.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- _____. **Vida útil das Estruturas de Concreto**. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. Anais... Porto Alegre, RS, 1997.
- IZQUIERDO, L. D. **Bases de diseño para un tratamiento probabilista de los procesos de corrosión de la armadura en el hormigón**, 2003. Tese (Doutorado) - Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- LEVY, S.; HELENE, P. R. L. **Reabilitação de Escolas de Concreto Armado no Estado de São Paulo, Brasil**. Relatório Técnico. PINI, 2000.
- MITRE, M.; BARBOSA, P.; HELENE, P. **Influência do Traço na Carbonatação de Concretos, Argamassas e Pastas**. São Paulo, Revista IBRACON. out-dez, 2002.
- NINCE, A. A. **Levantamento de Dados sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste**. Brasília, 1996. 176p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia civil, Universidade de Brasília.
- NUNES, F. **Influência da Dosagem na Carbonatação dos Concretos**. São Paulo, 1998. 214p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G; FARDIS, M.N. **A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation**. Journal of the American institute of Chemical Engineers, v.35, n.10, 1989. p.1639-1650.
- PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. **Physical and Chemical Characteristics Affecting the durability of Concrete**. ACI Materials Journal, v.8, n.2, March-April, 1991a. p.186-196.
- PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. **Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation**. ACI Journal, v.88, n.4, July-Auguste, 1991b.
- PAPADAKIS, V.G.; FARDIS, M.N; VAYENAS, C.G. **Effect of Composition Environmental Factors and Cement-lime Mortar Coating on Concrete Carbonation**. Materials and Structures, n.25, 1992. p.293-304.
- PARROT. **Review of carbonation in reinforced concrete**. Cement and Concrete Association Report C/1, 1987. 126p.
- SENTLER, L., 1984, **Stochastic Characterization of Carbonation of Concrete**. In: Third International Conference on Durability of Building Materials and Components, Technical Research Centre of Finland, Espoo, p. 569-580.
- SIERRA, A.; de SOUZA, VICENTE. **Um estudo sobre a carbonatação do concreto utilizando cimentos brasileiros com adições**. In: Damstruc 1998.
- SCHEISSL, P. **Corrosion of Steel in Concrete**. RILEM. Chapman & Hall, 1988. 102p.
- THOMAS, M. A.; MATTHEWS, J. D. **Carbonation of Fly Ash Concrete**. Magazine of Concrete Research, v. 44, n. 160, p. 217-28, Sept. 1992.
- TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**, Stokholm, 1982. 469p. Swedish Cement and Concrete Research, Fo n° 504.