

ABECE

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA
DE ENGENHARIA E
CONSULTORIA ESTRUTURAL

**TÍTULO: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PREVISÃO DA
CARBONATAÇÃO DO CONCRETO E
DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL**

AUTORES: Thomas Carmona, Paulo Helene

ANO: 2007

PATROCINADOR:

**PALAVRAS CHAVES: Carbonatação; Modelos de previsão;
Concreto; Sistema computacional.**

e-Artigo: 014 - 2007

1



e-Artigo: 014-2007

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL

Thomaz Carmona, Paulo Helene ¹

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os mais relevantes modelos de previsão da carbonatação do concreto, esclarecendo seus fundamentos teóricos e limitações.

Os resultados obtidos por diversos modelos são comparados e discutidos para um mesmo cenário de exposição ambiental para as classes de concreto C20, C25, C35 e C45.

É descrito o desenvolvimento de um sistema computacional para previsão da carbonatação do concreto por métodos deterministas e probabilistas empregando o modelo matemático de HELENE (1997).

Conclui-se que existe a necessidade de avanço nas pesquisas em aspectos específicos que são comentados no trabalho.

Abstract

This work presents a brief revision about the more significant prediction models of concrete carbonation, clearing his theoretical concepts and limitations.

The results obtained by several models in a same exposition scenario are compared and discussed to standardized concrete types C20, C25, C35 e C45.

It is described the development of a computer system to predict carbonation due to deterministic and probabilistic models using the mathematical model of HELENE (1997).

It is concluded that there is a need of advances in research in specific aspects that are pointed in the article.

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 causados 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 (ANDRADE & GONZALES, 1978; CARMONA & MAREGA, 1988; NINCE, 1996).

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. Nas grandes cidades a corrosão de armaduras induzida pela carbonatação é um problema frequente (LEVY & HELENE, 2000).

Existem muitos trabalhos que buscam explicar os fatores intervenientes na carbonatação e também desenvolver modelos matemáticos para a previsão do fenômeno (HAMADA, 1968; SMOLCZIK, 1968; TUUTTI, 1982; ANDRADE, 1992).

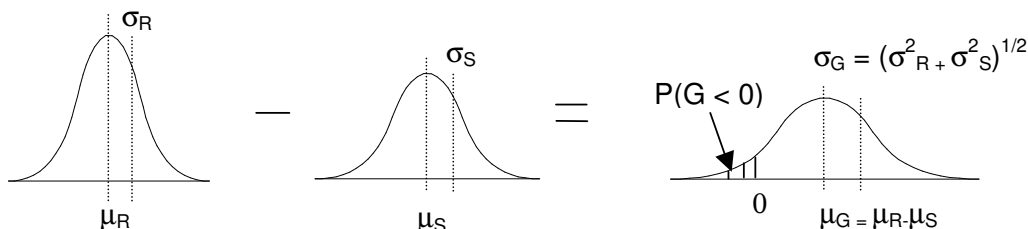
A tendência atual para a previsão do tempo até a desp passivação, ou seja, o tempo necessário até que a carbonatação atinja a armadura no interior da estrutura é combinar os modelos matemáticos decorrentes dos mecanismos de transporte com métodos probabilistas (HELENE, 1997) o que torna necessário o entendimento de conceitos da teoria da confiabilidade.

Estados limites são aqueles estados que uma vez superados supõe o não cumprimento de alguma das condições para as quais foi projetada a estrutura. A comprovação de cada um dos estados limite se realiza avaliando de um lado as solicitações “S” e de outro a resposta estrutural “R”, correspondente ao estado limite considerado. O estado limite é atendido se as solicitações não superam a resposta estrutural, ou seja “ $S \leq R$ ”.

Cada uma das variáveis que intervêm na avaliação das solicitações “S” e da resistência “R” em um tratamento probabilista são variáveis aleatórias que não estão definidas por um único valor fixo, senão mediante uma distribuição de probabilidades. Isso faz com que as solicitações “S” e as resistências “R” também sejam aleatórias com uma determinada distribuição de probabilidades.

Seja a função “G” definida por “ $G = R - S$ ”, denominada função limite, então a probabilidade de falha será: $P_f = P(R < S) = P(R - S < 0) = P(G < 0)$

Caso “R” e “S” sejam definidos por distribuições normais a função limite “G” também será normal e seus parâmetros são dados por:



2. MODELOS DE PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO

2.1. TUUTTI (1982)

TUUTTI modelou a carbonatação do concreto recorrendo a uma particularização do cálculo de difusão com fronteiras móveis:

$$\frac{C_x - C_1}{\sqrt{\pi} \frac{k_{CO_2}}{2\sqrt{D_{CO_2}}} e^{\frac{k_{CO_2}^2}{4D_{CO_2}t}} \operatorname{erf} \frac{k_{CO_2}}{2\sqrt{D_{CO_2}}}} + C_x - C_2 = 0 \quad (\text{Equação 1})$$

$$e = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad (\text{Equação 2})$$

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 por ser de mais fácil determinação em laboratório embora deixe claro que não existe equivalência perfeita entre os dois gases, mesmo em se tratando de difusão na camada já carbonatada.

O coeficiente de difusão do oxigênio no concreto deve ser corrigido em função da umidade relativa do ar para o que o autor apresenta gráficos específicos.

2.2. SENTLER (1984)

O modelo proposto por SENTLER é o seguinte:

$$e = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot D_{CO_2}}{a}\right) \cdot dp \cdot t} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação (m)

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

a = concentração dos constituintes do concreto que podem carbonatar (kg/m^3)

dp = diferença parcial de pressão do CO_2 (kg/m^3)

t = tempo (s)

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

$$f(e, e_0; t) = \left[\frac{1}{\sigma(2\pi t^{0,5})^{0,5}} \right] \frac{(e - e_0 - \mu t^{0,5})^2}{2\sigma^2 t^{0,5}} \quad \text{(Equação 4)}$$

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:

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

$$k = m k_{60} \quad \text{(Equação 6)}$$

$$m = \begin{cases} 1,6 - 0,00115 UR - 0,0001475 UR^2 & UR > 60\% \\ 1 & UR \leq 60\% \end{cases} \quad \text{(Equação 7)}$$

$$n = 0,02536 + 0,01785 UR - 0,0001623 UR^2 \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação (m)

a = fator empírico que toma o valor aproximado de 64

k_{60} = Permeabilidade do concreto para UR = 60% (m^2)

t = tempo (s)

CaO = Conteúdo de CaO no cimento (kg/m^3)

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 se secar para posteriormente se carbonatar. Assim a frente de evaporação limitará a frente de carbonatação.

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

$$e = A\sqrt{t_1} + A\sqrt{t_2 - \left(\frac{e_1}{B}\right)^2} + \dots + A\sqrt{t_N - \left(\frac{e_{n-1}}{B}\right)^2} \quad (\text{Equação 9})$$

$$A = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}}{a} (C_s - C_2)} \quad (\text{Equação 10})$$

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

$$b = w - 0,25 C - GH - 0,15 C GH D_{gel} - w GH D_{cap}$$

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)

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)

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)

2.5. SCHIESSL (1988)

Supondo que D_{CO_2} e o gradiente de concentração são constantes se observa uma relação linear da profundidade de penetração do dióxido de carbono com a raiz quadrada do tempo. Entretanto, normalmente D_{CO_2} não é independente do tempo nem da profundidade.

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.

Deste modo a partir do coeficiente de difusão obtido aos 90 dias, D_{CO_2-90} , se tem:

$$x = \frac{D_{CO_2-90} (c_1 - c_2)}{b + f D_{CO_2-90} (c_1 - c_2)} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

D_{CO_2-90} = Coeficiente de difusão do CO_2 aos 90 dias (m^2 / s)

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

x = Profundidade de penetração (m)

t = tempo (s)

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 , 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:

$$e = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} [CO_2]}{[CH]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}} \sqrt{t} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação

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

$[CO_2]$ = Concentração inicial de CO_2 (mol / m^3)

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

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

$[C_3S]^0$ = Concentração de C_3S ao término da cura (mol / m^3)

$[C_2S]^0$ = 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.

A estimativa do coeficiente de difusão é feita pela seguinte equação:

$$D_{CO_2} = 1,64 \cdot 10^{-6} \varepsilon_p^{1,8} \left[1 - \frac{UR}{100} \right]^{2,2} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

ϵ_p = Porosidade da pasta

UR = Umidade relativa (%)ⁱ

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.

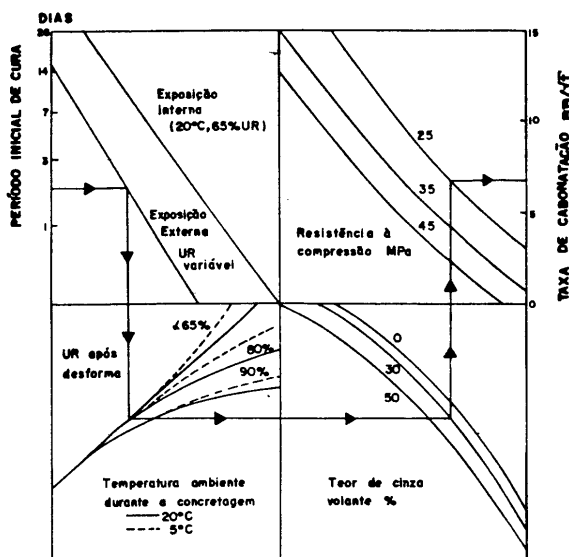


Figura 1: Nomograma para previsão do coeficiente de carbonatação k_{CO_2} (THOMAS & MATHEWS, 1992).

2.8. CEB (1996)

O modelo apresentado pelo CEB é o seguinte:

$$e = k_{CO_2} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \cdot \sqrt{t} \quad \text{(Equação 15)}$$

$$k_{CO_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2} \cdot C_s \cdot K_1 \cdot K_2}{a}} \quad \text{(Equação 16)}$$

$$D_{CO_2} = 10 \cdot \left(7 + 0,025 \frac{f_{ck}}{10}\right) \quad \text{(Equação 17)}$$

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 $1m^3$ 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 C_s/a para concretos normais de cimento portland em ambientes convencionais.

Tabela 1: Valores dos coeficientes de cura e exposição " $K_1 \times K_2$ ".

Tipo de Exposição	Cura	$K_1 \times K_2$
Interior	Boa	1,0
Interior	Má	2,0
Exterior	Boa	0,5

Tabela 2: Valores do fator de idade "n" em função da exposição.

Tipo de Exposição	n
Interior	0,0
Exterior protegida	0,1
Exterior não protegida	0,4

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).

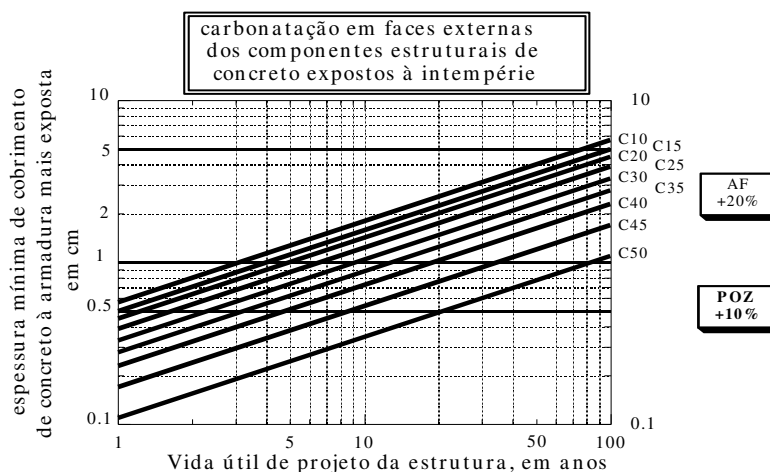


Figura 2: Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento com relação à carbonatação.

Embora o resultado dos ábacos 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.(2).

Em função dos valores obtidos do ábaco se pode concluir que a previsão de K_{CO_2} pode ser feita pela equação (CARMONA, 2005):

$$k_{CO_2} = 6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde :

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

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

Ainda segundo este modelo a utilização de cimentos de alto-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:

$$k_{CO_2 \text{ AF}} = 1,2 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \quad (\text{Equação 19})$$

$$k_{CO_2 \text{ POZ}} = 1,1 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \quad (\text{Equação 20})$$

Onde :

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

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

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

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:

$$k_{CO_2} = (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde :

C_s = Concentração ambiente de CO₂ (% volume)

Da mesma forma as equações eq.19 e eq.20 podem ser reescritas:

$$k_{CO_2 \text{ AF}} = 1,2 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (\text{Equação 22})$$

$$k_{CO_2 \text{ POZ}} = 1,1 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (\text{Equação 23})$$

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 pesquisadores apresenta o seguinte modelo estatístico:

$$e = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2} \cdot C_s \cdot K_t \cdot K_e \cdot K_p}{a}} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \sqrt{t} \quad (\text{Equação 24})$$

$$D_{CO_2} = 10^{\varepsilon + A + B \cdot \log(a/c)} \quad (\text{Equação 25})$$

Onde:

A = Coeficiente de regressão

B = Coeficiente de regressão

ε = Termo de erro

K_t = Coeficiente da raiz do tempo

K_E = Fator de HR

K_P = Fator geral do modelo

n = Fator de idade do concreto

C_s = Concentração superficial de CO₂ (kg/m³)

a/c = Relação água cimento

a = Reserva alcalina do concreto (kg/m³)

t₀ = Tempo de cura (s)

t = Tempo (s)

IZQUIERDO (2003) apresenta propostas de caracterização estatística das variáveis intervenientes na carbonatação, cobrimentos e índices de confiabilidade β recomendados para o projeto referente ao Estado Limite de Durabilidade, calibrados mediante otimização econômica, o que possibilita análises de confiabilidade para previsão de vida útil.

2.11. ANDRADE (2004)

Segundo ANDRADE (2004) o processo de penetração de agentes agressivos não segue uma única lei e é decorrente de diversos fenômenos simultaneamente e que não se podem modelar pelas leis de difusão.

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.

A seguir apresentamos o modelo de resistividade proposto por ANDRADE:

$$t_i = \frac{x^2 \cdot \rho_{es} \cdot r_{Cl,CO_2}}{k_{Cl,CO_2}} \quad (\text{Equação 26})$$

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. ($\Omega \cdot m^3$)

3. COMENTÁRIOS E COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE CARBONATAÇÃO

Embora os modelos matemáticos estudados contribuam muito para o entendimento do fenômeno da carbonatação muitos deles são incompletos pois não apresentam as equações para estimativa de todos os parâmetros. Aqui se incluem os modelos de SENTLER (1984), PARROT (1987), BAKKER (1988) E SCHIESSEL (1988).

Apesar de estar corretamente postulado em termos conceituais o modelo de BAKKER (1988) apresenta um erro em sua formulação matemática (CARMONA, 2005).

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.

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 errôneo conforme apresentado por diversos autores (CARMONA, 2005).

O único modelo que leva em conta diferentes tipos de cimento de maneira satisfatória 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.

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 o único modelo que contempla todas as variáveis exceto o tipo de cimento.

IZQUIERDO (2003) comprovou que os modelos de TUUTTI (1982) e CEB (1996) são equivalentes e levam a resultados praticamente idênticos para um determinado coeficiente de difusão fixo e mesmas condições ambientais.

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 os valores de seus coeficientes. No momento o modelo de ANDRADE (2004) está sendo objeto de calibração no projeto espanhol CALIDUR, no qual uma série de estações de trabalho estão sendo instaladas em todo o país com o objetivo de realizar entre outras aferições a calibração do modelo de resistividade do concreto.

A seguir se fará a comparação entre os modelos de TUUTTI (1982), PAPADAKIS (1989), CEB (1986) e HELENE (1997) para algumas classes de concreto em uma condição ambiental estabelecida.

Foram também incluídos para efeito de comparação os valores obtidos pelo ábaco de THOMAS & MATHEWS (1992), muito embora seja difícil conseguir uniformidade nos parâmetros de entrada.

Composição química do cimento:

$m_{C_3S} = 50\%$	$m_{C_4AF} = 10\%$	$m_{cl} = 95\%$
$m_{C_2S} = 30\%$	$m_{C_3A} = 10\%$	$m_{ge} = 5\%$
		CaO = 65%

Características do concreto e materiais:

Massa unitária do cimento = 1.230 kg/m³

Massa unitária dos agregados = 1.500 kg/m³

Ar aprisionado = 5%

Tempo de cura = 1 dia.

Condições ambientais:

Umidade relativa do ar = 85%

Concentração de CO₂ ambiente = 0,05%

Coeficientes de cura ($K_1 \times K_2$): considerando boa cura e exposição exterior pode-se adotar $K_1 \times K_2 = 0,5$.

Fator de idade (n): para desconsiderar os efeitos de molhagem e secagem se adotou situação exterior protegida com $n = 0,1$.

Tabela 3: Comparação da profundidade de carbonatação em 50 anos a partir dos modelos de TUUTTI, PAPADAKIS, CEB, HELENE e THOMAS.

Profundidade de Carbonatação em 50 anos (mm)								
fck (MPa)	a/c	ag/c	C (kg/m ³)	TUUTTI	CE B	PAPADAKIS	HELENE	THOMAS
20	0,75	7,4	250	34	13	16	23	63
25	0,65	6,5	280	30	13	13	20	47
35	0,50	4,9	350	24	12	9	14	30
45	0,40	3,5	470	10	10	6	8	16

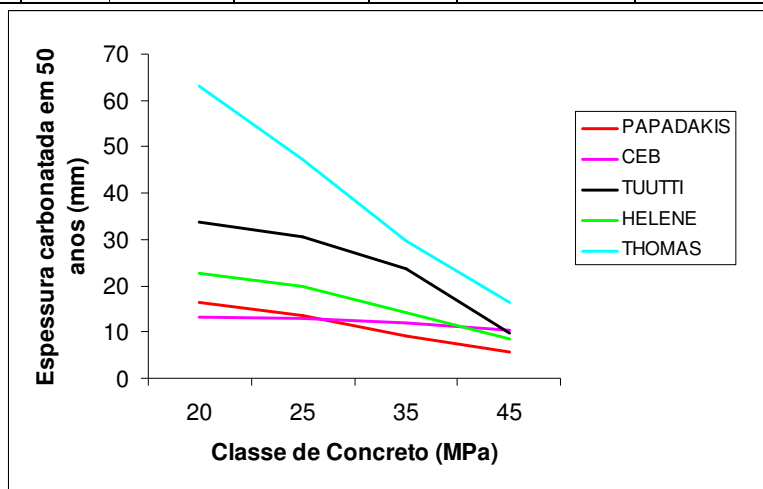


Figura 3: Profundidade de carbonatação em 50 anos, em função do tipo de concreto segundo os modelos de TUUTTI, PAPADAKIS, CEB, HELENE e THOMAS para as condições ambientais definidas.

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.

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

Conforme discutido o modelo de previsão de HELENE (1997) é o mais completo dentre os estudados. Por esse motivo foi o escolhido para implementação em um sistema computacional para previsão do período de iniciação da corrosão por carbonatação.

O desenvolvimento foi realizado na linguagem Visual Basic® no ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Basic 6.0® compatível com o sistema operacional Windows® também da empresa Microsoft®.

Na tela principal do programa são fornecidos os dados do ambiente, as características do concreto e os coeficientes de variação da carbonatação e dos cobrimentos, além da probabilidade de despassivação aceitável, caso se deseje realizar a análise probabilista.

O primeiro passo é selecionar a opção de cálculo determinista ou probabilista e em seguida fornecer os dados necessários.

O cálculo determinista é realizado encontrando-se o valor do período de iniciação “t” necessário para que a profundidade de carbonatação se iguale ao cobrimento de armaduras fornecido.

No caso do cálculo probabilista se supõe distribuições normais para a carbonatação e para os cobrimentos, hipótese que foi válida para o caso estudado por CARMONA (2005).

A segunda suposição é a de que os valores obtidos pelo modelo determinista correspondem à média da profundidade de carbonatação, hipótese que foi válida para o caso estudado por CARMONA (2005).

A terceira suposição é a de que os coeficientes de variação da carbonatação e dos cobrimentos não variam com o tempo. No caso dos cobrimentos isso é seguramente verdadeiro, pois essa é uma variável independente do tempo.

Dada a variabilidade dos parâmetros se determina o valor médio da profundidade de carbonatação que resulta na probabilidade de despassivação desejada:

$$P(G < 0) = P(Z < g) \quad (\text{Equação 27})$$

$$g = \frac{0 - \mu_G}{\sigma_G} \quad (\text{Equação 28})$$

Como:

$$\mu_G = \mu_{\text{carb.}} - \mu_{\text{cob.}} \quad (\text{Equação 29})$$

$$\sigma_{\text{carb.}} = \mu_{\text{carb.}} \cdot CV_{\text{carb.}} \quad (\text{Equação 30})$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_{\text{carb.}}^2 + \sigma_{\text{cob.}}^2} \quad (\text{Equação 31})$$

Então substituindo-se as equações (29), (30) e (31) em (28):

$$g = \frac{0 - (\mu_{\text{carb.}} - \mu_{\text{cob.}})}{\sqrt{(\mu_{\text{carb.}} \cdot CV_{\text{carb.}})^2 + \sigma_{\text{cob.}}^2}} \quad (\text{Equação 32})$$

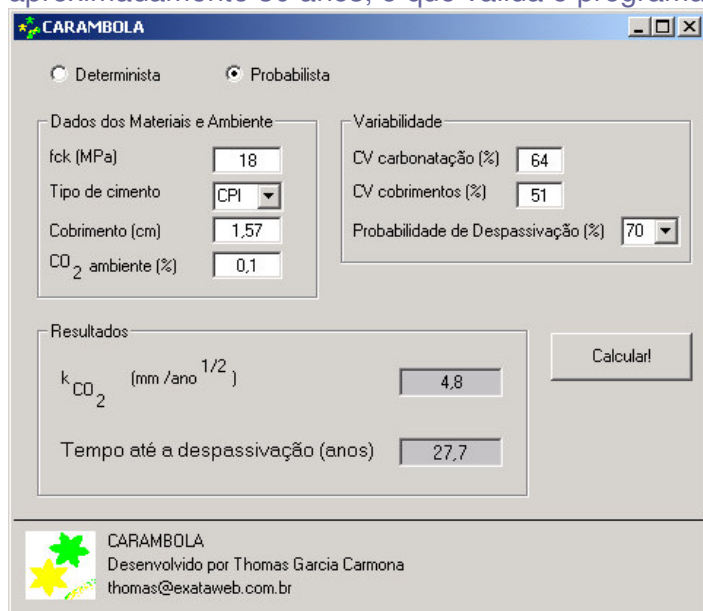
A média dos cobrimentos, e os coeficientes de variação dos cobrimentos e da carbonatação são dados de entrada e o valor de “g” é determinado pelas tabelas de probabilidade da distribuição normal padrão que foram introduzidas no programa em função da probabilidade de despassivação fornecida.

Pela eq.(32) se determina a média da carbonatação. Como se pode observar a eq.(32) resulta uma função do segundo grau e assim existem duas raízes, ou seja, duas médias da carbonatação que solucionam a equação. Apenas uma dessas médias resulta na probabilidade de despassivação fornecida, o que é verificado pelo programa.

Após a verificação da média adequada é feito o cálculo do período de iniciação empregando-se eq.(21), eq.(22) e eq.(23), sendo o resultado o período de tempo necessário para que seja atingida a probabilidade de despassivação fornecida.

A figura 4 mostra os resultados do cálculo para um cenário como o do estudo experimental de CARMONA (2005), tendo-se introduzido a probabilidade de despassivação de aproximadamente 70% que foi a incidência de despassivação obtida entre medidas reais efetuadas em um edifício.

O resultado de 27,7 anos obtido é coerente, pois a idade da estrutura era de aproximadamente 30 anos, o que valida o programa sob o aspecto operacional.



The screenshot shows the CARAMBOLA software interface. It has a title bar with the name 'CARAMBOLA' and standard window controls. Below the title bar, there are two radio buttons: 'Determinista' (unselected) and 'Probabilista' (selected). The interface is divided into several sections:

- Dados dos Materiais e Ambiente:** Contains input fields for 'fck (MPa)' (value: 18), 'Tipo de cimento' (dropdown: CPI), 'Cobrimento (cm)' (value: 1,57), and 'CO₂ ambiente (%)' (value: 0,1).
- Variabilidade:** Contains input fields for 'CV carbonatação (%)' (value: 64), 'CV cobrimentos (%)' (value: 51), and 'Probabilidade de Despassivação (%)' (dropdown: 70).
- Resultados:** Contains two output fields: 'k_{CO₂} (mm /ano^{1/2})' (value: 4,8) and 'Tempo até a despassivação (anos)' (value: 27,7). A 'Calcular!' button is located to the right of these fields.
- Footer:** Includes the CARAMBOLA logo and text: 'Desenvolvido por Thomas Garcia Carmona thomas@exataweb.com.br'.

Figura 4: Tela com os resultados da simulação empregando dados do trabalho experimental de CARMONA (2005).

5. CONCLUSÕES

O modelo que se mostrou mais prático e sem inconsistências teóricas foi o modelo de HELENE (1997). Ainda que maiores desenvolvimentos sejam necessários o modelo parece ser 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.

Existe a necessidade de um maior conhecimento sobre a agressividade ambiental a que estão sujeitas as estruturas em diversas localidades e situações especiais.

A atribuição de distribuições normais à carbonatação e cobrimentos para a análise é bastante prática e se mostrou adequada ao caso estudado por CARMONA (2005).

Existe a necessidade de calibrar o modelo a situações reais para que seja possível estimar as profundidades médias de carbonatação e atribuição de coeficientes de variação obtidos em obras reais. Tais dados possibilitariam a derivação de coeficientes parciais de segurança para o denominado estado limite de durabilidade que poderiam ser incorporados nas normas de projeto estrutural.

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. **Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steel Embed in Concrete Using Polarization Resistance Measurements**. *Werdstoffe und Korrosion*, Vol. 29, 1978. p.515-519.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de Obras Deterioradas por corrosão de Armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 104p.

_____. **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.

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.

CARMONA, Thomas. **Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas à Carbonatação**. São Paulo, 2005. 91p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



e-Artigo: 014-2007

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL

Thomaz Carmona, Paulo Helene ¹

- COMITE EURO-INTERNACIONAL du BETON. **Durable Concrete Structures**. Report of Task Group 1 + 2, 1996.
- HAMADA, M. Neutralization of Concrete and Corrosion of Reinforcing Steel. In: **5th International Symposium on the Chemistry of Cement**. Tokyo, 1968. Proceedings. 1969. v.3, p.346-351.
- HASOFER, A. M.; LIND, N. C. **Exact and Invariant Second Moment Code Format**. Journal of the engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 100, 1974, pp. 111-121.
- HELENE, P. R. L. **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.
- 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.
- 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.
- SCHEISSL, P. **Corrosion of Steel in Concrete**. RILEM. Chapman & Hall, 1988. 102p.



e-Artigo: 014-2007

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL

Thomaz Carmona, Paulo Helene ¹

- SMOLCZYK, H. G. Written Discussion. Synopsis. In: **5th International Symposium on the Chemistry of Cement**. Tokyo, 1968. Proceedings. 1969. v.3, p.369-381.
- 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**, Stockholm, 1982. 469p. Swedish Cement Concrete Research, Fo n^o 504.

¹ Exata Engenharia e Assessoria, thomas@exataweb.com.br, Rua Martins, 739, São Paulo - SP, Brasil
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, paulo.helene@poli.usp.br, Av. Luciano Gualberto Travessa 3 n^o 380, São Paulo - SP, Brasil