



## **Aplicação de Metodologia Objetiva Para Avaliação de Obras de Arte Especiais em Rodovias no Estado do Paraná**

**Gean Marcos Baldessar Warmling<sup>1</sup>, Mauro Lacerda Santos Filho<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná / bwgean@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná / maurolacerda1982@gmail.com

### **Resumo**

As normas vigentes atualmente no Brasil relacionadas à inspeção e avaliação da performance de pontes estão baseadas na avaliação dos elementos estruturais de forma individualizada, esse tipo de avaliação muitas vezes não representa o real estado da ponte. Além disso, as normas deixam à cargo dos inspetores o julgamento em relação à condição da estrutura, impondo muita subjetividade ao processo. Visando diminuir a subjetividade da inspeção e melhorar a forma de avaliação da ponte, um grupo de pesquisadores da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em parceria com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) está propondo uma metodologia de avaliação e classificação das Obras de Arte Especiais (OAEs) no Brasil. Essa metodologia considera a análise de forma global, considerando além dos aspectos estruturais quesitos relacionados com operação, segurança, etc. O modelo apresentado é baseado em metodologias utilizadas em outros países adaptadas às condições brasileiras. Além disso, no modelo da UFPR é acrescentado um coeficiente denominado  $K_5$ , esse é obtido durante a inspeção através de ensaios, tendo como objetivo caracterizar os aspectos de durabilidade da estrutura no tocante aos materiais da mesma. A inclusão deste parâmetro permite uma maior assertividade em relação à performance da estrutura em questão. O propósito principal do modelo de performance é fornecer uma lista com a classificação das pontes. A classificação das OAEs em relação à performance em determinada rodovia permite estabelecer de forma sistemática as ações de manutenção a serem executadas baseadas na posição da ponte nessa lista, auxiliando numa aplicação mais eficiente dos recursos. No presente artigo é apresentado de forma resumida o modelo de avaliação das OAEs e também o coeficiente  $K_5$  aplicado em três pontes, cabe ressaltar que tal coeficiente ainda está sendo aprimorado pela equipe da UFPR. Conjuntamente são exibidos os resultados da aplicação do modelo em 161 pontes no Estado do Paraná desconsiderando a influência dos ensaios.

### **Palavras-chave**

Modelo de Performance; Ranqueamento de Pontes; Ensaios de Campo.

### **Introdução**

Atualmente as diretrizes para inspeção de Obras de Arte Especiais em rodovias federais são dispostas na Norma DNIT 010/2004 – PRO, segundo tal norma, numa inspeção rotineira, os elementos da ponte devem ser avaliados de forma individual e notas de um a cinco devem ser atribuídas, a nota da ponte é mais baixa nota anotada, sendo essa nota que define a necessidade de um reparo a curto, médio ou longo prazo.

Quando se analisa o universo de todas as pontes do Brasil, chega-se à conclusão de que apenas a atribuição de notas de um a cinco gera uma grande dificuldade em estabelecer

quais pontes tem prioridade de reparo, pois dentro de uma mesma categoria existem numerosas OAEs sem distinção de qual é a mais crítica. Como não existem recursos suficientes para reabilitação de todas as pontes, a ausência de um comparativo mais elaborado entre as OAEs pode acarretar na aplicação desses recursos em pontes que muitas vezes não são as mais críticas.

Buscando contornar essa situação, um grupo de engenheiros e pesquisadores da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em conjunto com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estão desenvolvendo uma ferramenta de gestão de pontes baseada num modelo determinístico que permite gerar uma lista com pontes prioritárias, auxiliando o governo a otimizar as ações relacionadas com manutenção de OAEs.

No modelo em desenvolvimento é possível analisar a ponte sob o prisma da estrutura e da operação, sendo que na operação são avaliados os elementos secundários e o conforto do usuário.

Neste artigo são apresentados de forma condensada os modelos absoluto e relativo, no modelo absoluto são avaliados todos os problemas da OAE, já o modelo relativo permite realizar a comparação entre diferentes pontes. Em seguida é apresentado o fator denominado  $K_5$ , esse fator leva em conta as características dos materiais da estrutura através de ensaios de campo, vale lembrar que o  $K_5$  ainda está sendo desenvolvido e embora faça parte do modelo, a avaliação da OAE sem a execução de ensaios de campo também é possível. Devido aos custos envolvidos, foram executados ensaios em três pontes e determinados os valores de  $K_5$ .

Para completar é apresentada uma classificação das pontes obtida através da aplicação do modelo em 161 pontes de rodovias federais no Estado do Paraná.

### **Modelo absoluto**

Elaborado com base em modelos matemáticos utilizados na Áustria e Eslovênia, pode ser obtido no Bulletin nº 243 – Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures (CEB 1998). O modelo original foi adaptado às condições brasileiras e um novo parâmetro denominado  $K_5$  foi criado com o propósito de avaliar os aspectos de durabilidade com base em ensaios de campo.

O objetivo do método é obter parâmetros de performance com base numa avaliação numérica obtida através de inspeções. Tal avaliação numérica deve considerar:

- Tipo do dano e seu efeito na segurança e/ou durabilidade do componente estrutural;
- A máxima intensidade de um tipo de dano em parte da estrutura;
- Efeito global na segurança e/ou durabilidade da estrutura provocado pelo dano em determinado elemento;
- Extensão e propagação do tipo de dano observado.

Os valores para avaliação de cada dano são caracterizados por critérios descritivos inclusos em cinco categorias ( $K$ ). A expressão geral da avaliação numérica da ponte é definida pela Equação (1).

$$R = \sum V_D = \sum B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot K_{4i} \cdot K_{5i} \quad (1)$$

Onde:

- $V_D$ : valor do dano;

- $B_i$ : valor associado ao tipo de dano "i" sobre a segurança e durabilidade (exemplos na Tabela 1);
- $K_{1i}$ : fator do elemento estrutural, função de sua importância no contexto da estrutura como um todo (exemplos na Tabela 2);
- $K_{2i}$ : fator indicativo da intensidade do dano "i" (Tabela 3);
- $K_{3i}$ : fator que considera a propagação do dano "i" em elementos do mesmo tipo (Tabela 4);
- $K_{4i}$ : fator da urgência da intervenção de acordo com o dano "i" (Tabela 5);
- $K_{5i}$ : fator relacionado com a durabilidade da estrutura.

O modelo pode ser aplicado para a totalidade da estrutura, para determinados componentes estruturais ou até mesmo para um único elemento. É importante salientar que o modelo considera aspectos estruturais e funcionais.

**Tabela 1. Exemplos de valores de B**

Dano	B
Fissura superficial	3,00
Manchas de fogo	1,00
Deslocamento do concreto devido a altas tensões de compressão	4,00
Corrosão da armadura (apenas mancha de corrosão)	2,00
Corrosão da armadura com deslocamento e rompimento da barra	5,00
Concreto segregado	2,00
Recapeamento irregular	2,00
Inexistência de drenos	2,00
Sinalização horizontal deficiente	2,00

**Tabela 2. Exemplos de valores para  $K_1$**

Elemento	$K_1$
Laje de concreto armado	0,40
Viga de concreto protendido	0,60
Pilar em colunas de concreto armado	0,40
Aparelho de apoio de neoprene fretado	0,40
Pavimento asfáltico	0,20
Barreira New Jersey	0,10

**Tabela 3. Valores de  $K_2$**

Tipo	Grau	Critério	$K_2$
0	Insignificante	Dano Irrelevante, em menos de 3% da área total do elemento	0,00
I	Pequeno	Dano pequeno, entre 3% e 10% da área total do elemento	0,50
II	Médio	Dano médio, confinado em uma área entre 10% e 25% da área total do elemento	1,00
III	Grande	Dano grande, de 25% a 75% da área total do elemento, ou em muitos lugares de um elemento estrutural	1,50
IV	Imenso	Dano muito grande, presente em mais de 75% da área do elemento	2,00

**Tabela 4. Valores de  $K_3$**

<b>Critério</b>	<b><math>K_3</math></b>
Dano aparece em menos de 10% dos elementos do mesmo tipo	0,5
Dano aparece entre 10% e 25% dos elementos do mesmo tipo	1
Dano aparece entre 25% e 75% dos elementos do mesmo tipo	1,5
Dano aparece em mais de 75% dos elementos de mesmo tipo	2

**Tabela 5. Valores de  $K_4$**

<b>Classificação</b>	<b>Critério</b>	<b><math>K_4</math></b>
Não urgente	Intervenção não é urgente, pois o dano não interfere na utilização e capacidade da OAE, também não altera a sua durabilidade	1,00
Dano a reparar	Dano deve ser reparado em período não maior que 5 anos, para garantir a servicibilidade e não comprometer a durabilidade da OAE	2,50
Reparo imediato	Reparo imediato, pois o dano já está comprometendo a utilização da OAE, com risco às pessoas	4,00
Limitação de carga	Limitação de carga, interrupção de tráfego e escoramento imediato deve ser feito, além do reparo	5,00

Os valores de  $K_5$  são associados com a durabilidade da estrutura que por sua vez relaciona-se com os materiais da mesma. Essas características são de difícil mensuração, portanto se faz necessário a execução de ensaios complementares para, desta forma, complementar as informações coletadas em campo diminuindo ao máximo a subjetividade.

Cada ensaio executado apresenta singularidades, de forma a convergir para um único valor, os mesmos são compostos para formação do fator de durabilidade da estrutura  $K_5$ , cuja obtenção deve seguir os seguintes critérios:

- O valor final de  $K_5$  será a média aritmética simples dos valores encontrados (referentes apenas aos ensaios realizados) em cada uma das análises apresentadas na sequência;
- Quando nenhum dos ensaios e análises forem realizados, então  $K_5=1,00$ ;
- O valor de  $K_5$  calculado deve ser utilizado apenas nos danos que envolvem os materiais da estrutura, para os demais  $K_5=1,00$ ;
- $K_5 \geq 1,00$ .

Carbonatação:

A partir da frente de carbonatação medida em campo calcula-se o coeficiente de difusão (TUUTTI 1982) através da Equação 2:

$$K = \frac{C_c}{\sqrt{Idade}} \quad (2)$$

onde:

$C_c$ : profundidade carbonatada (mm);

$K$ : coeficiente de difusão ( $\text{mm}\sqrt{\text{ano}}$ );

$Idade$ : Idade da obra estudada (anos).

O tempo para início da corrosão é obtido a partir da Equação 3:

$$t_{carb} = \left(\frac{C_n}{K}\right)^2 - Idade \quad (3)$$

onde:

$t_{carb}$ : tempo de iniciação da corrosão (anos) ( $\leq 30$ );

$C_n$ : cobrimento do concreto medido em campo (mm).

Assim, calcula-se o valor de  $K_5$  (parcela de carbonatação) através da Equação 4:

$$K_5 = \left(1 - \frac{t_{carb}}{30}\right) \cdot 0,1 + 1,00 \quad (4)$$

Cloretos:

As amostras coletadas em campo devem ser ensaiadas de acordo com o procedimento da ASTM C1218. O coeficiente de difusão é obtido a partir da Equação 5 (GEIKER et. Al. 1995):

$$c = c_0 \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{C_n}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t_{cloreto}}}\right)\right] \quad (5)$$

Onde:

$c$ : teor máximo de cloretos no concreto (%), NBR 12655:2015 (Tabela 6);

$c_0$ : teor de cloretos na superfície do elemento de concreto, obtido no ensaio (%);

$\operatorname{erf}$ : função erro de Gauss;

$C_n$ : cobrimento mensurado em campo (m);

$D$ : coeficiente de difusão (Tabela 7);

$t_{cloreto}$ : tempo para penetração dos íons cloreto (s) ( $\leq 30$  anos).

**Tabela 6. Teor máximo de cloretos, ABNT NBR 12655:2015**

Tipo de estrutura	Teor máximo de íons cloreto % sobre a massa de cimento
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40
Outros tipos de construção com concreto armado	0,30

**Tabela 7. Coeficiente de difusão**

$F_{ck}$	Coeficiente de difusão ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
15	107,80
20	36,40
25	15,60
30	7,90
35	4,40
40	2,60

$F_{ck}$	Coefficiente de difusão ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
45	1,70
50	1,10
55	0,80
60	0,60

Com os valores de  $c$  e do coeficiente de difusão,  $\text{erf}(z)$  é calculado pela Equação 6:

$$\text{erf}(z) = 1 - \left(\frac{c}{c_0}\right) \quad (6)$$

Se o teor de cloretos obtido no ensaio for menor que o teor máximo então  $K_5=1,00$  e não são necessários cálculos complementares.

Valores de  $z$  são listados na Tabela 8 de acordo com  $\text{erf}(z)$ . Para valores intermediários pode-se utilizar de uma interpolação linear.

**Tabela 8. Tabulação da função erro de Gauss**

$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$
0,025	0,028	0,9	0,797
0,05	0,056	0,95	0,821
0,1	0,113	1	0,843
0,15	0,168	1,1	0,88
0,2	0,223	1,2	0,91
0,25	0,276	1,3	0,934
0,3	0,329	1,4	0,952
0,35	0,379	1,5	0,966
0,4	0,428	1,6	0,976
0,45	0,476	1,7	0,984
0,5	0,521	1,8	0,989
0,55	0,563	1,9	0,993
0,6	0,604	2	0,995
0,65	0,642	2,2	0,998
0,7	0,678	2,4	0,999
0,75	0,711	2,6	1,000
0,8	0,742	2,8	1,000

Com o valor de  $z$  (para  $z > 0$ ), calcula-se o teor de cloretos a partir da Equação 7:

$$t_{\text{cloreto}} = \frac{x^2}{4 \cdot z^2 \cdot D \cdot 31557600} \quad (7)$$

Calcula-se então o valor de  $K_5$  para a parcela de cloretos com a Equação 8:

$$K_5 = \left(1 - \frac{t_{\text{cloretos}}}{30}\right) \cdot 0,15 + 1,00 \quad (8)$$

Esclerometria:

O ensaio deve ser executado de acordo com o preconizado na ABNT NBR 7584:2012. O valor de  $K_5$  é calculado de acordo com o maior desvio individual dos pilares em relação à média do conjunto (Tabela 9).

**Tabela 9. Valores de  $K_5$  (parcela esclerometria)**

Desvio relativo do índice $Q_i$ em relação à média dos pilares (%)	$K_5$
$\leq 15\%$	1,00
$15\% < S \leq 65\%$	$\left(\frac{S}{100}\right) \cdot 0,15 + 1,00$
$> 65\%$	1,10

Onde:

$Q_i$ : índice esclerométrico do pilar  $i$ ;

$S$ : maior desvio individual do valor do índice esclerométrico em relação à média do conjunto de pilares ensaiados.

Ultrassom:

O ensaio deve ser executado de acordo com o preconizado na ABNT NBR 8802:2013. O módulo de elasticidade dinâmico é calculado pela Equação 9 a partir da velocidade ultrassônica.

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{1 - \nu} \right) \quad (9)$$

Onde:

$E_d$ : módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

$V$ : velocidade ultrassônica (km/s);

$\rho$ : densidade do material, quando desconhecido utilizar 2500,00 kg/m<sup>3</sup> (ABNT NBR 6118:2014);

$\nu$ : coeficiente de Poisson, adotar 0,2 (ABNT NBR 6118:2014).

O valor de  $K_5$  é obtido de acordo com o maior desvio individual de um pilar em relação à média do conjunto conforme a Tabela 10.

**Tabela 10. Valores de  $K_5$  (parcela ultrassom)**

Desvio relativo do módulo $E_{di}$ em relação à média dos pilares (%)	$K_5$
$\leq 15\%$	1,00
$15\% < S' \leq 65\%$	$\left(\frac{S'}{100}\right) \cdot 0,15 + 1,00$
$> 65\%$	1,10

Onde:

$E_{di}$ : módulo de elasticidade dinâmico do pilar  $i$  (MPa);

$S'$ : maior desvio individual do valor do módulo de elasticidade dinâmico em relação à média do conjunto de pilares ensaiados.

Reação Álcali-agregado e ataque por sulfatos:

Se verificada a presença de reação álcali-agregado ou ataque por sulfatos,  $K_5=1,25$ , em caso contrário  $K_5=1,00$ .

Potencial de corrosão:

A partir dos dados do ensaio de potencial de corrosão, obtém-se a corrente elétrica para determinado eletrodo e, por consequência, a probabilidade de ocorrência de corrosão. O valor de  $K_5$  é dado pela Tabela 11 a partir do potencial de corrosão.

**Tabela 11. Valores de  $K_5$  (parcela potencial de corrosão)**

Probabilidade de corrosão	$K_5$
< 10%	1,00
Incerto	1,02
> 90%	1,05

Resistividade elétrica:

A partir dos valores da resistividade elétrica coletados em campo, os valores de  $K_5$  são obtidos através da Tabela 12.

**Tabela 12. Valores de  $K_5$  (parcela resistividade elétrica)**

Resistividade elétrica (k $\Omega$ .cm)	$K_5$
< 5	1,15
5 a 10	1,10
10 a 20	1,05
> 20	1,00

Tempo de propagação da corrosão:

O tempo de propagação da corrosão é calculado pela Equação 10.

$$t_p = \frac{x_{lim} \cdot \rho}{1000} \quad (10)$$

$$x_{lim} = 0,0513 \cdot D_0 \quad (11)$$

Onde:

$t_p$ : tempo de propagação da corrosão (anos) ( $\leq 30$ );

$x_{lim}$ : perda de diâmetro limite ( $\mu$ m), quando a área da seção transversal da armadura sofre redução a partir de 10% (Equação 11);

$\rho$ : resistividade elétrica do concreto (k $\Omega$ .cm);

$D_0$ : diâmetro nominal da armadura.

Assim, o valor de  $K_5$  relativo ao tempo de propagação da corrosão é calculado pela Equação 12.

$$K_5 = \left(1 - \frac{t_p}{30}\right) \cdot 0,20 + 1,00 \quad (12)$$

### Modelo Relativo

No decorrer da aplicação do modelo absoluto, observou-se uma dificuldade adicional quando é feita a comparação entre cada OAE, pois a relação da performance com a morfologia da Obra de Arte Especial representa uma situação que poderia mascarar a verdadeira condição comparativa entre todas as OAEs do sistema rodoviário.

A morfologia da OAE possui uma relação direta com a condição do membro estudado. Por exemplo, a importância de uma viga numa ponte com seis vigas é menor do que numa



ponte com duas vigas. O modelo relativo foi desenvolvido com o objetivo de eliminar essa incompatibilidade.

O modelo relativo não considera apenas uma simples soma de valores, mas uma razão entre a soma efetiva dos valores de danos e um índice de referência. O valor de referência é a soma dos valores de danos obtidos considerando todos os possíveis danos que poderiam ocorrer numa estrutura virtual, com a mesma morfologia da OAE estudada. No cálculo do valor dos danos de referência, são utilizados os fatores  $K_2$  e  $K_3$  máximos e os fatores  $K_4$  e  $K_5$  unitários.

Dessa forma o comparativo é feito entre a OAE real e o pior caso de OAE com a mesma morfologia, ou seja, com todos os defeitos que podem ocorrer na morfologia da ponte real.

A forma geral do índice de referência é expressa pela Equação 13.

$$I_r = \frac{\sum V_D}{\sum V_{D,Ref}} \quad (13)$$

Onde:

$V_D$ : valor do dano calculado para a estrutura observada;

$V_{D,Ref}$ : valor de referência dos valores de dano obtidos levando-se em conta todos os danos que podem potencialmente ocorrer na estrutura em questão, multiplicados pelos valores máximos dos fatores de intensidade e extensão e pelos valores unitários dos fatores de urgência e durabilidade.

### Aplicação do Modelo

Para determinação dos valores de  $K_5$  foram executados ensaios em três pontes, os resultados são apresentados na Tabela 13.

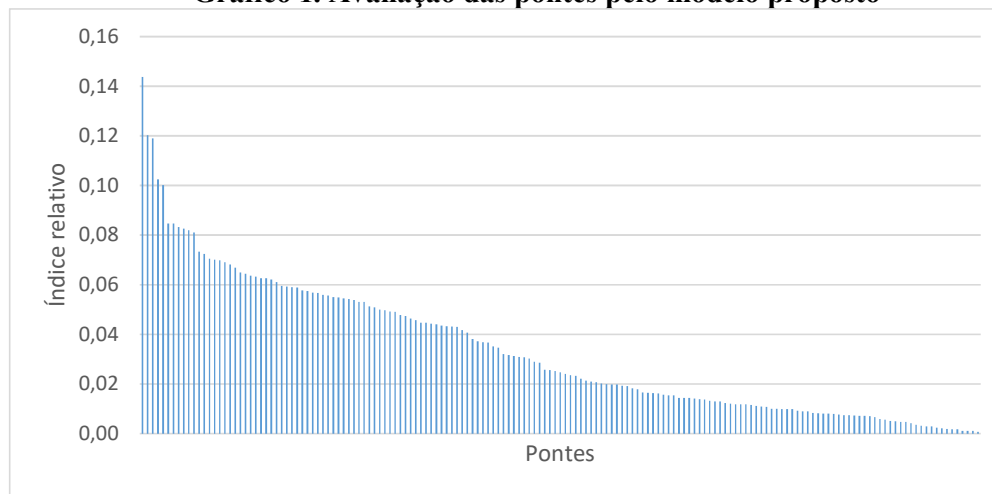
**Tabela 13. Valores de  $K_5$  para as pontes estudadas**

Ensaio	Valores de $K_5$		
	Ponte 01	Ponte 02	Ponte 03
Carbonatação	1,00	1	1
Cloretos	1,00	1	1
Esclerometria	1,04	1	1,03
Ultrassom	1,00	1,01	1,01
RAA e ataque por sulfatos	1,00	1	1
Potencial de corrosão	1,00	1	1,06
<b>Média</b>	<b>1,007</b>	<b>1,002</b>	<b>1,017</b>
<b>Impacto</b>	<b>0,662%</b>	<b>0,166%</b>	<b>1,639%</b>

Devido aos custos para execução dos ensaios o modelo completo foi aplicado somente em três pontes. No restante das OAEs é aplicado o modelo sem a influência do  $K_5$  ( $K_5=1,00$ ).

No Gráfico 1 é possível visualizar as 161 pontes analisadas ordenadas pelo índice relativo, ou seja, é possível fazer a comparação entre diferentes OAEs. No modelo aplicado, quanto mais alto o índice maior a necessidade de intervenção.

**Gráfico 1. Avaliação das pontes pelo modelo proposto**



## Conclusões

A aplicação do modelo mostrou bons resultados, permitindo a obtenção de um ranking das pontes de acordo com a necessidade de intervenção, e não apenas patamares como na metodologia atualmente utilizada.

Sendo assim, o objetivo da ferramenta foi alcançado, pois possibilita uma maior precisão na determinação das piores OAEs, sendo uma ferramenta de grande importância para um gestor na tomada de decisão quanto à aplicação dos recursos disponíveis.

A contemplação de aspectos não considerados na metodologia atual também é uma particularidade importante no modelo proposto, fatores relativos com a durabilidade da estrutura e o conforto do usuário são imprescindíveis hoje em dia e tornam o modelo mais completo.

Os valores de  $K_5$  mostraram pouca influência no índice final, cabe ressaltar que tais valores são iniciais e ainda serão objetivo de mais estudos para o aperfeiçoamento do modelo.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, 2013.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – Bulletin No. 243 – Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures. CEB, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido. IPR, 2004.
- GEIKER, M., GRUBE, H., LUPING, T., NILSON, L., ANDRADE, C. Laboratory test Methods. In, Kroppp, J., Hilsdorf, H. K. Performance Criteria for Concrete Durability. FN Spon, 1995.
- TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.