

GESTÃO DE PONTES RODOVIÁRIAS EM FUNCIONAMENTO APLICAÇÃO A PONTES PORTUGUESAS

JOANA OLIVEIRA ALMEIDA

Assistente e Doutoranda em Engenharia Civil
Instituto Politécnico de Viana do Castelo - Portugal
joliveira@estg.ipvc.pt

FRANCISCO ALONSO FARRERA

Doutor em Engenharia Civil
Universidad Autónoma de Chiapas – México
alfa@unach.mx

RAIMUNDO DELGADO

Professor Catedrático em Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Portugal
rdelgado@fe.up.pt

RESUMO

A comunicação apresenta uma ferramenta de apoio à Gestão de Pontes Rodoviárias que permite listar as pontes de acordo com os respectivos graus de urgência de implementação de acções de reparação/beneficiação, auxiliando dessa forma a realçar os casos críticos e a melhor programar os trabalhos a realizar ao longo do tempo. Esse ranking de pontes é obtido com recurso ao método de optimização Electre I combinando critérios associados a estados de condição da obra de arte, a previsões da sua evolução futura efectuadas com base em Matrizes de Markov e ainda a patamares de custo associados às intervenções necessárias em cada uma das obras.

Para testar a utilidade dessa ferramenta é feita uma análise dos resultados da sua aplicação, bem como de duas metodologias de classificação diferentes, a um conjunto de pontes rodoviárias Portuguesas. Nessa aplicação, foram considerados dados recolhidos em inspecções realizadas no ano de 2003 e, para algumas das pontes, também no ano de 2008, de forma a possibilitar uma análise comparativa entre duas inspecções principais consecutivas cuja periodicidade é em geral de 5 anos.

PALAVRAS CHAVE: Pontes rodoviárias; Sistemas de Gestão Pontes; Classificação de pontes em funcionamento; Método Electre I; Ranking de prioridade de intervenção.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da vida útil das pontes a capacidade resistente da estrutura vai em geral diminuindo e as solicitações e exigências funcionais podem aumentar. Assim, para garantir o nível de segurança desejado nas pontes e ir respondendo de forma satisfatória às exigências inerentes aos seus períodos de funcionamento é importante implementar um Sistema de Gestão de Obras de Arte.

No âmbito de um Sistema de Gestão de Obras de Arte, as pontes são periodicamente inspeccionadas e a informação recolhida é analisada e processada com

vista à elaboração de relatórios de apoio à tomada de decisões.

2. PRIORIDADES DE INTERVENÇÃO NUM PARQUE DE PONTES RODOVIÁRIAS

A prioridade de intervenção em cada uma das obras de um determinado parque de obras de arte deve ser estabelecida tendo em conta a segurança estrutural e um conjunto de diversos outros factores com importância na política de gestão das entidades que por elas são responsáveis. Assim, importa classificar

periodicamente cada uma das obras e a partir dos resultados obtidos e da sua conjugação com uma série de outros parâmetros relevantes para o decisor (com escalas classificativas diversificadas) identificar as pontes com maior urgência de intervenção. Para o efeito foi desenvolvida uma ferramenta informática que permite elaborar rankings de apoio à programação dos trabalhos de reparação/beneficiação necessários.

Dada a tipologia da problemática apresentada, essa ferramenta aplica um método de optimização multicritério designado por ELECTRE (sendo um método de origem francesa o seu nome tem origem na expressão “ELimination Et Choix Traduisant la REalité” [1]), inicialmente proposto numa publicação de 1966 por Benayoun, Roy, and Sussman e agora designado por ELECTRE I [2] para o distinguir de outras variantes entretanto desenvolvidas.

Os critérios que se entendeu considerar nessa optimização, bem como os pesos relativos atribuídos a cada um deles, são os apresentados na Tabela 1 e adiante descritos nos pontos 2.1 a 2.3.

Tabela 1. Critérios considerados na optimização e respectivos pesos relativos

Critérios	Peso
Classificação EP - Estado de Conservação EP	20%
Classificação FHWA - Rácio de Eficiência Global (REG)	10%
Classificação FHWA - Rácio de Segurança Estrutural (R1)	5%
Indicação de ponte Estruturalmente Deficiente (ESD)	5%
Tempo (anos) até o Estado da Superestrutura estar no estado "Mau"	15%
Tempo (anos) até o Estado da Infraestrutura estar no estado "Mau"	15%
Patamar de custo associado à intervenção necessária na Superestrutura	15%
Patamar de custo associado à intervenção necessária na Infraestrutura	15%

Como se pode verificar, aos parâmetros resultantes da metodologia de classificação foi atribuído um peso relativo de 40%, neste caso distribuído equitativamente pelas duas metodologias diferentes que foram consideradas (20% para EC da classificação EP e 20% para a soma dos pesos relativos dos critérios da classificação FHWA seleccionados: REG, R1 e ESD) mas que poderia corresponder apenas a uma única metodologia de classificação. Os critérios associados à durabilidade prevista da obra somam depois um peso relativo de 30% e os critérios relativos à estimativa de custos a parcela restante de 30%.

Os parâmetros P e Q, respectivamente limite mínimo de concordância e limite máximo de discordância, usados na aplicação do método ELECTRE I foram os apresentados na Tabela 2. As 5 iterações indicadas nessa tabela foram as necessárias para evitar situações

de empate entre as diferentes pontes do conjunto considerado na aplicação que se apresenta nesta comunicação, mas poderão ter que ser ajustadas quando se considerar outro parque de obras de arte.

Tabela 2. Limite mínimo de concordância (P) e limite máximo de discordância (Q) considerados nas várias iterações de aplicação do método ELECTRE I

	iteração 1	iteração 2	iteração 3	iteração 4	iteração 5
P	0,9	0,9	0,7	0,8	0,6
Q	0,15	0,3	0,5	0,4	0,1

2.1 Classificação FHWA e EP

Foram consideradas duas metodologias de classificação de pontes rodoviárias, uma usada nos Estados Unidos da América na “National Bridge Inventory (NBI)” [3] pelo departamento de Transportes da “Federal Highway Administration (FHWA)”, e implementada no programa REGPONTES [4], e outra usada em Portugal pelas Estradas de Portugal [5].

A metodologia usada pela FHWA atribui a cada ponte rodoviária uma Rácio de Eficiência Global (REG), resultante da ponderação, de acordo com a importância relativa indicada na Figura 1, de alguns rácios parciais que classificam a obra de arte em termos de Segurança Estrutural (R1), Funcionalidade (R2) e Utilidade Pública (R3), para além de outras Reduções Extraordinárias (R4). Cada um desses rácios é determinado em função de um determinado conjunto de itens que inclui por exemplo o Estado de Condição da Superestrutura, da Infraestrutura e do Tabuleiro (classificados segundo a escala FHWA apresentada na Tabela 3), para além de outros itens como o Índice Capacidade Carga, o Tráfego médio diário, o Gabarit, o Desvio implicado em caso de fecho e a Importância estratégica. O REG a atribuir a cada ponte pode assumir valores entre os 0 e os 100% e o seu valor será tanto mais baixo quanto maior a urgência de implementação de acções de reparação ou beneficiação, ou seja quanto maior a importância da obra e quanto mais baixos os seus níveis de desempenho e segurança.

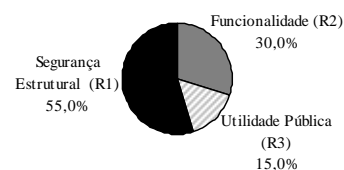


Figura 1. Peso dos Rácios Parciais (R1 a R3) no Rácio de Eficiência Global (REG) segundo a classificação FHWA [3].

A partir desses itens, que devem ser definidos/classificados na sequência de uma inspeção de acordo com o estipulado em tabelas e fórmulas específicas, a metodologia de classificação usada pela FHWA permite ainda destacar as situações mais críticas, prevendo critérios para assinalar pontes “Estruturalmente Deficientes” e “Funcionalmente Obsoletas”.

Na metodologia usada pela Estradas de Portugal (EP) é atribuído um Estado de Conservação (EC) a um conjunto de componentes da ponte (Muros de Ala; Taludes; Encontros; Aparelhos de Apoio; *etc.*) [2] e no final é estabelecido um EC relativo à obra de arte, segundo a escala EP apresentada na Tabela 3.

Assim sendo, como principal diferença entre as duas metodologias importa destacar que enquanto a EP se baseia sobretudo no estado da estrutura, a classificação FHWA considera para além da segurança estrutural, alguns outros dados relativos à funcionalidade e utilidade pública da ponte.

2.2. Previsão da evolução do estado da ponte ao longo do tempo

Um determinado parque de obras de arte pode englobar pontes de várias idades, com geometrias diversificadas, de diferentes materiais e com múltiplos tipos de funcionamento estrutural. Ora, como a degradação das pontes ao longo do tempo não se processa de igual forma nos vários tipos de pontes, nem sequer nos vários elementos que a constituem, para prever a evolução temporal do estado da ponte importa seleccionar as características que mais poderão influenciar a sua degradação.

No trabalho que se apresenta foi considerada uma deterioração distinta para pontes metálicas, de betão e de alvenaria de pedra, para além de uma diferenciação entre a evolução do estado de condição dos elementos que constituem a superestrutura da ponte (tabuleiro e vigas) e a sua infraestrutura (pilares, encontros e fundações). A definição das curvas de evolução temporal dos estados de condição da superestrutura e da infraestrutura, em função do estado actual e do principal material estrutural da ponte, num cenário sem intervenções, foi efectuada com base em Matrizes de Markov que agrupam as probabilidades de transição entre 5 diferentes estados de condição (ver escala na Tabela 3), pelo que ficam neste caso com uma dimensão de 5x5. Sendo P essa matriz de Markov e W(0) o vector correspondente ao estado inicial, podem considerar-se as equações 1 e 2 e, generalizando, a expressão 3 ou a expressão 4 [6, 7],

tornando possível estimar o estado de um instante futuro a partir do actual.

$$W(1) = W(0) \times P \quad (1)$$

$$W(2) = W(1) \times P \quad (2)$$

$$W(t) = W(t-1) \times P \quad (3)$$

$$W(t) = W(0) \times P^t \quad (4)$$

Algumas dessas matrizes, as relativas a pontes metálicas e de betão, foram adoptadas de bibliografia existente [8], com as necessárias conversões de escala (Tabela 3).

Tabela 3. Escalas de classificação usadas e respectivas correspondências (conversão entre escala FHWA e EP segundo [9])

Matrizes de Markov		Estado de condição FHWA		Estado de conservação EP	
1	Ruína	0	Fora de serviço	5	Perigoso
		1	Rotura iminente		
2	Mau	2	Crítico	4	Mau a muito mau
		3	Grave	3	Mau
3	Médio	4	Insuficiente		
		5	Suficiente		
4	Bom	6	Satisfatório	1	Bom
		7	Bom		
5	Excelente	8	Muito Bom	0	Óptimo
		9	Excelente		

As matrizes de Markov consideradas para o estado das superestruturas e das infraestruturas de alvenaria foram definidas considerando:

- Frequências de danos registadas pela UIC [10].
- Probabilidades de ocorrência de sismos estabelecidas a partir de um período de retorno de 475 anos [8].
- Probabilidades de ocorrência de cheias estabelecidas para um período de retorno de 100 anos [11].
- Após a ocorrência de um sismo ou de uma cheia a ponte nunca fica nem no estado “bom” nem no estado “excelente”.
- Valores “pessimistas” e “optimistas” para as variáveis desconhecidas.

A partir dessas matrizes foram então determinadas as curvas de evolução ao longo do tempo do estado da superestrutura e do estado da infraestrutura de pontes de alvenaria, que se apresentam respectivamente na Figura 2 e na Figura 3. Para cada um dos estados iniciais são apresentadas duas curvas - uma correspondente a um limite superior e outro inferior - geradas com os diferentes valores considerados para as variáveis desconhecidas.

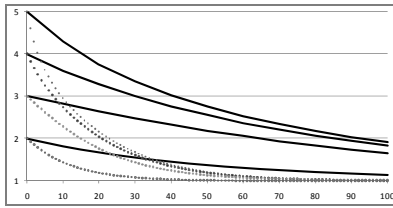


Figura 2. Curvas de evolução do estado da superestrutura ao longo do tempo (em anos) - limite superior (---) e limite inferior (....)

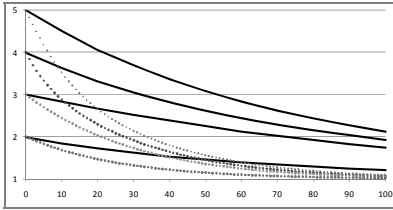


Figura 3. Curvas de evolução do estado da infraestrutura ao longo do tempo (em anos) - limite superior (---) e limite inferior (....)

Finalmente, com base nas várias matrizes de Markov adoptadas e nas respectivas curvas de evolução ao longo do tempo, fez-se uma estimativa do número de anos que demorará até que a superestrutura e a infraestrutura da ponte atinjam um estado “mau”, que depois foi tida em consideração no processo de optimização.

2.3. Escala de custos

Para ter em conta uma ordem de grandeza do investimento inerente às intervenções necessárias em cada uma das pontes, foram definidos patamares de custo em função das características dimensionais da obra e do estado da sua superestrutura e do estado da sua infraestrutura, de acordo com o que se apresenta na Tabela 4. Os patamares definidos nessa tabela pretendem exprimir uma sensibilidade de custo associada às características das pontes que poderão vir a ser ajustados no futuro caso essa necessidade se venha a revelar a partir do estudo de valores reais relativos a obras realizadas.

Tabela 4. Níveis de custo de intervenção

Estado	Patamares de custo de intervenção na Superestrutura			Patamares de custo de intervenção na Infraestrutura		
	Comprimento da estrutura			Nº de vãos		
	> 1000m	100 a 1000m	< 100m	>10	2 a 10	1
Ruína	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€
Mau	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€
Médio	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€
Bom	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€
Excelente	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€	€€€€€€€€€€

3. APLICAÇÃO A UM CONJUNTO DE PONTES RODOVIÁRIAS PORTUGUESAS

Para aplicação da ferramenta anteriormente descrita foi escolhido um conjunto de pontes rodoviárias actualmente em funcionamento no Distrito de Viana do Castelo e com características diversificadas, nomeadamente em termos de tipologia estrutural, idade, dimensões, tipos de materiais, volume de tráfego e importância funcional. Essas pontes foram classificadas primeiro no ano de 2003 [12] e depois, algumas delas, também no ano de 2008 [13], de forma a permitir ter uma certa sensibilidade relativa à evolução das mesmas durante 5 anos, o período de tempo que usualmente se considera para a periodicidade das inspeções principais.

3.1. Comparação dos resultados de 2003 e de 2008

Na Figura 4 e na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos em pontes que foram classificadas quer no ano de 2003 quer no ano de 2008, em gráficos que possibilitam uma leitura relativa à evolução do estado dessas obras de arte nesse período de tempo, para os seguintes subconjuntos: o das pontes que não sofreram intervenções significativas durante esse intervalo de 5 anos e o das pontes que nesse mesmo período foram alvo de obras de reparação ou reforço estrutural.

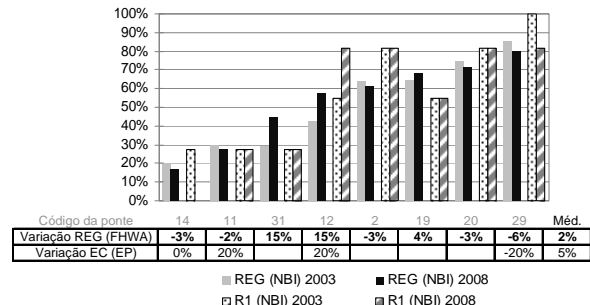


Figura 4. Resultados obtidos em nos anos de 2003 e 2008 em pontes que não sofreram intervenções nesse período de tempo [14]

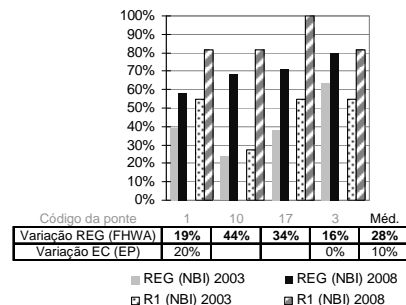


Figura 5. Resultados obtidos em nos anos de 2003 e 2008 em pontes que foram intervencionadas nesse período de tempo [14]

Na classificação FHWA, em termos de valores de REG, a variação média nos 5 anos nas pontes não intervencionadas não é expressiva, sendo mesmo praticamente nula (2%), e nas pontes reforçadas é de 28% reflectindo uma melhoria espectacular. Em termos máximos essa variação é de 15% para as pontes não intervencionadas e de 44% para uma das pontes que foi sujeita a obras de reparação no período de tempo em análise.

Na classificação EP, as diferenças registadas nos valores do EC da obra de arte entre os anos de 2003 e 2008 são no máximo de um ponto na sua escala, correspondente a 20% na escala dos gráficos da Figura 4 e da Figura 5. Mesmo nas pontes não intervencionadas essa variação é em geral de melhoria, o que indicia uma certa subjectividade deste tipo de avaliações, feita com base em inspecções visuais e tabelas classificativas com base em descrições qualitativas, já referida por exemplo em [15-18]. Essa melhoria foi mais significativa na ponte com código 29, onde essa subjectividade pode ser agravada pelo facto da obra em questão ter um tabuleiro misto apoiado em encontros de alvenaria exigindo uma classificação de diversos tipos de materiais estruturais [14]. Relativamente à ponte com piores resultados de classificação (a ponte com o código 14), importa referir que a mesma já estava a começar a ser alvo de obras de reabilitação e reforço estrutural aquando da inspecção de 2008.

3.2 Análise comparativa de vários tipos de ranking relativos a prioridade de intervenção

A partir dos dados da inspecção de 18 pontes em 2003 e de 6 dessas novamente no ano de 2008, foram elaborados rankings relativos à prioridade de intervenção de cada uma das obras desse grupo. Na Figura 6 e na Figura 7 são apresentadas as posições de cada uma dessas pontes nos seguintes rankings:

- “EC”: ranking elaborado ordenando as pontes em função do respectivo EC que classifica sobretudo a sua segurança estrutural.
- “REG”: ranking elaborado ordenando as pontes em função do respectivo REG que pondera a sua segurança estrutural, funcionalidade e utilidade pública.
- “ELECTRE”: obtido com a aplicação do método de optimização multicritério com esse nome, tendo em consideração os resultados da classificação associados aos rankings anteriores e ainda questões relativas à durabilidade estimada para a estrutura e aos custos associados às intervenções necessárias em cada uma das obras.

Dada a dúvida anteriormente apresentada relativamente à degradação das pontes de alvenaria, o método ELECTRE foi aplicado duas vezes: uma considerando os limites superiores da curvas de degradação e outra considerando os seus limites inferiores. No entanto, os resultados obtidos nessas diferentes aplicações foram coincidentes para todas as pontes da amostra considerada, pelo que as dúvidas existentes não afectam neste caso o resultado final.

Através da análise da Figura 6 e da Figura 7 pode constatar-se o seguinte:

- Os rankings EC e REG são parecidos mas não coincidentes o que resulta sobretudo do facto do primeiro reflectir quase exclusivamente aspectos relativos à segurança estrutural das obras.
- O ranking do EC afasta-se mais do ranking ELECTRE do que o ranking do REG.
- Nas pontes com menor urgência de intervenção em que o estado da obra é mais satisfatório e a necessidade de intervenção acaba por ser mais condicionada por factores de natureza não estrutural é onde mais se acentua a disparidade entre o ranking EC (que não os considera) e o ranking ELECTRE.

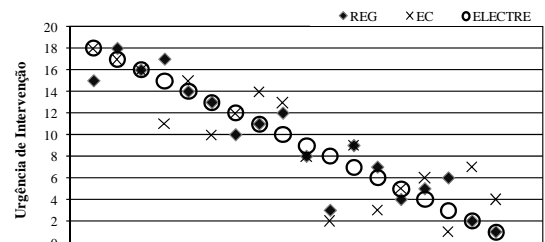


Figura 6. Inspeções de 2003 - Ranking final das pontes e comparação com a ordenação por REG e EC

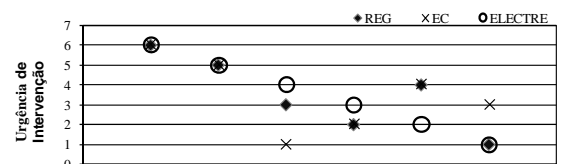


Figura 7. Inspeções de 2008 - Ranking final das pontes e comparação com a ordenação por REG e EC

4. CONCLUSÕES

A concluir destaca-se a vantagem da fácil utilização da ferramenta apresentada para elaboração de rankings relativos à prioridade de intervenção de um conjunto de pontes distintas que, por aplicação do método ELECTRE I, permite ter em consideração múltiplos e variados critérios com importância na

tomada de decisão e obter resultados mais otimizados que os associados apenas a resultados de metodologias de classificação.

Para que a ferramenta de apoio à decisão apresentada possa vir a ser amplamente utilizada na programação dos trabalhos de parques de obras de arte ao longo do tempo, os patamares de custo e as curvas de degradação associadas a estruturas de alvenaria serão alvo de calibração em desenvolvimentos futuros.

5. BIBLIOGRAFIA

1. José Figueira, V.M., Bernard Roy, *ELECTRE Methods*.
2. Olson, D.L., *Decision Aids for Selection Problems*. USA ed. 1996: Springer
3. FHWA, *Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nations Bridges*. 1995.
4. Almeida, J.O., *Gestão de pontes rodoviárias: um modelo aplicável em Portugal* [Tese de Mestrado]. 2003, Universidade do Porto - Portugal.
5. *Sistema de Gestão de Conservação de Obras de Arte da EP, EPE – Inspeções Principais*, in *Especificações Técnicas*, Estradas de Portugal
6. Morcous, G., *Performance Prediction of Bridge Deck Systems Using Markov Chains*. Journal of Performance of Constructed Facilities - ASCE, 2006.
7. Mark A. Cesare, C.S., Carl Turkstra and Erik H. Vanmarcke, *Modeling Bridge Deterioration with Markov Chains*. Journal of Transportation Engineering - ASCE - Vol118, 1992.
8. Farrera, F.A.A., *Optimización conjunta de las políticas de mantenimiento y rehabilitación en Puentes mediante Algoritmos Genéticos. Aplicación al Sistema de Gestión de Puentes del Estado de Chiapas (México)* [Tesis Doctoral], in *Departament d'Enginyeria de la Construcció - Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona*. 2006, Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona.
9. Sousa, C.M.V.d., *Aplicação de um sistema de gestão de pontes a um conjunto de pontes portuguesas* [Tese de Mestrado]. 2008, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
10. UIC, *Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges*. 2003.
11. V.T. Chow, D.R.M.L.W.M., *Hidrología aplicada*: Mc Graw Hill.
12. Almeida, J.O., *Gestão de pontes rodoviárias: um modelo aplicável em Portugal*. 2003, Universidade do Porto - Portugal.
13. Sousa, C., *Aplicação de um Sistema de Gestão de pontes a um conjunto de pontes portuguesas*. 2008, Universidade do Porto - Portugal.
14. Carlos Sousa, J.O.A., Raimundo Delgado, *A avaliação das Pontes no contexto dos Sistemas de Gestão de Obras de Arte*, in *ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP*. 2009: Lisboa, Portugal.
15. Phares, B.M.e.a., *Routine highway bridge inspection condition documentation accuracy and reliability*. Journal of Bridge Engineering. American Society of Civil Engineers, 2004(ISSN 1084-0702).
16. Graybel, B.A.e.a., *Visual Inspection of Highway Bridges*. Journal of Nondestructive Evaluation. Springer Netherlands, 2002(ISSN 1573-4862).
17. Moore, M.E.e.a., *Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges*. 2001, Federal Highway Administration.
18. Agrawal, A.K.a.K., A., *Bridge Element Deterioration Rates*. 2009, Transportation Infrastructure Research Consortium - New York State Department of Transportation (TIRC/NYS DOT).

6. ABREVIATURAS

EP – Estradas de Portugal, SA (Portugal)
FHWA – Federal Highway administration (USA)
NBI - National Bridge Inventory (USA)
REG – Rácio Eficiência Global (metodologia FHWA)
EC- Estado de conservação (metodologia EP)

7. AGRADECIMENTOS

Agradece-se a colaboração da Estradas de Portugal no estudo efectuado, ressaltando no entanto o facto de as conclusões e opiniões apresentadas na comunicação não reflectirem necessariamente o ponto de vista dessa entidade.