

# Optimização das intervenções de conservação num conjunto de Pontes Ferroviárias usando um Algoritmo Genético

Joana Oliveira Almeida

*Instituto Politécnico de Viana do Castelo, ESTG, DCET, Viana do Castelo*

Raimundo Moreno Delgado

*Universidade do Porto, FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Porto*

Paulo Teixeira Fonseca

*Instituto Superior Técnico, Lisboa*

**RESUMO:** A comunicação apresenta uma aplicação informática desenvolvida para otimizar o tipo de actuação e determinar a altura mais conveniente para a sua implementação, num determinado conjunto de pontes ao longo de um certo período temporal. A aplicação estima de forma probabilística a degradação do Estado de Condição de cada uma das obras ao longo do tempo e permite depois determinar a actuação de menor custo em cada uma delas ao longo de 5 diferentes ciclos temporais. Para além disso, permite também, com recurso a algoritmos genéticos, efectuar o ajuste dessas actuações óptimas tendo em conta algumas restrições globais relativas ao parque de obras de arte, resultantes de condicionantes associadas aos recursos disponíveis e a eventuais limitações orçamentais.

## 1 INTRODUÇÃO

Para assegurar a segurança e funcionalidade de um parque de pontes ao longo do tempo, é necessário implementar diversas acções correctivas cuja realização pode envolver elevadas quantias. Assim sendo, a optimização do planeamento desse tipo de actuações ao longo das suas vidas úteis pode, para além de diminuir o risco associado a esse tipo de obras, ajudar a fundamentar as decisões de investimento e permitir poupar quantias consideráveis. Na metodologia que se apresenta a identificação de uma intervenção optimizada foi feita com recurso a Algoritmos Genéticos (AG), metodologia inicialmente desenvolvida por John Holland (Holland 1975) com base na forma como a vida evolui no mundo natural e posteriormente utilizada com sucesso por outros autores em problemas semelhantes (Elbehairy, Hegazy et al. 2009),(Elbehairy 2007) (Farrera 2006) (Lounis 2006).

## 2 METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE UMA INTERVENÇÃO OPTIMIZADA

Para determinação do tipo de intervenção óptimo de um parque de obras de arte ao longo do tempo foi desenvolvida uma ferramenta informática em ambiente Excel, recorrendo ao VBA, e na formulação do problema de optimização foram consideradas como variáveis a optimizar o tipo de actuação, para cada uma das obras, em cinco diferentes ciclos temporais. Para o tipo de actuação admitem-se 3 hipóteses (0-não actuar, 1-actuação ligeira, 2-actuação profunda) e para o número de anos de cada um

dos cinco ciclos temporais podem ser fixados intervalos inteiros iguais entre 1 e 20 anos (possibilitando assim análises de horizontes temporais entre 5 e 100 anos).

Para que a ferramenta possa encontrar a solução de actuação óptima, os dados necessários são: [1] dados das obras de arte - comprimento, largura, nº de vãos, índice de complexidade, estado de condição inicial e classificação relativa à eficiência global (REG); [2] dados para a análise no tempo - nº de anos por ciclo e taxa de inflação anual prevista; [3] restrições - limite de pior estado de condição, máximo índice de custo de intervenção e número máximo de actuações para cada um dos cinco ciclos temporais; [4] outras informações e opções, nomeadamente as associadas à funcionalidade e utilidade pública das pontes.

O processamento dessa informação é feito com a aplicação de um algoritmo genético que procura a solução de menor custo que cumpra todas as restrições indicadas pelo utilizador. Esse algoritmo necessita no entanto de um módulo de previsão da degradação do Estado de Condição (EC) das obras ao longo do tempo e ainda de outro que estime os custos associados a diferentes níveis e instantes de intervenção. Em seguida passa-se a descrever o esquema de funcionamento do próprio algoritmo, bem como desses dois módulos associados. O significado das abreviaturas que serão apresentadas pode ser consultado na Tabela 1.

Tabela 1 – Significados de abreviaturas

AG	Algoritmo Genético	REG	Rácio de Eficiência Global	IOA	Índice de Obra de Arte
OA	Obra de Arte	EC	Estado de Condição	ICX	Índice de Complexidade
MM	Matriz de Markov	ICI	Índice de Custo de Intervenção	FC	Factor multiplicativo de Correção

## 2.1 Algoritmos genéticos

Os AG ajustam-se bem a este tipo de problema em que estão envolvidos parâmetros não contínuos, o espaço de combinações possíveis é muito alargado (três elevado a cinco vezes o nº de obras) e se pode aceitar uma solução não óptima desde que próxima dessa. Na aplicação de cálculo desenvolvida cada indivíduo é constituído por 5 genes relativos a cada uma das obra de arte associados em série, sendo o valor de cada um desses genes corresponde ao tipo de actuação a implementar em cada um dos 5 ciclos temporais nessas obras. A função objectivo corresponde ao custo global mas a minimização é feita com a função adaptação (corresponde a esse custo com penalizações nos casos em que as restrições não sejam cumpridas, de forma a evitar que essas soluções sejam dadas como óptimas) segundo o seguinte esquema de processamento: [1] geração aleatória de população inicial com n indivíduos que cumpram as restrições por obra do problema; [2] avaliação do resultado da função objectivo e da função adaptação para medir a qualidade do indivíduo face a toda a restante população; [3] verificação do cumprimento das restrições impostas e penalização da função adaptação nos casos em que as mesmas não sejam cumpridas; [4] ordenação dos indivíduos da população de acordo com os resultados obtidos para a função adaptação e selecção das soluções mais aptas para procriação, dentro de uma elite (os melhores x% da população anterior, com x definido pelo utilizador) e pela técnica de torneio; [5] aplicação de operadores de reprodução - permutação, cruzamento e mutação - nas soluções seleccionadas; [6] substituição da população anterior pela nova população; [7] retorno ao ponto 2 caso nenhum dos critérios de paragem tenha sido atingido. Os critérios de paragem podem ser definidos pelo utilizador de acordo com três diferentes tipos: [1] número máximo de gerações; [2] número máximo de elementos com iguais resultados; [3] limite de tempo de processamento.

Os operadores de reprodução supramencionados são aplicados nas taxas que o utilizador indicar, podendo o cruzamento ser efectuado de duas formas distintas, também segundo a proporção que o utilizador escolher. Um dos tipos de cruzamento

que a aplicação prevê é designado por mono-ponto e prevê que o descendente herde os genes de um dos progenitores, a “mãe”, à esquerda de um ponto de corte aleatoriamente escolhido e os genes do outro progenitor, o “pai”, à direita do mesmo. O outro tipo de cruzamento que pode ser realizado pela aplicação é designado por uniforme e tem um poder de destruição maior que o anterior, devendo ser usado sobretudo em ambientes mais estacionários (com maior taxa de sobrevivência e mais elitistas), uma vez que prevê que o descendente receba em cada gene o valor do gene correspondente do “pai” ou da “mãe”, em função de uma decisão tomada de forma aleatória. A permutação considerada consiste na troca dos valores de dois genes de um dos reprodutores antes do cruzamento e a mutação opera após cruzamento, trocando o valor de um gene escolhido de forma aleatória por um valor gerado aleatoriamente (dentro da gama dos valores admissíveis: 0, 1 ou 2), de forma a aumentar a diversidade das soluções e evitar a progressão no sentido de um valor ótimo local.

## 2.2 Previsão da degradação do estado das pontes ao longo do tempo

A previsão da degradação do EC de cada obra ao longo de cada um dos ciclos temporais é feita com matrizes de Markov. Essas matrizes agrupam as probabilidades de transição entre n diferentes estados de condição, função da escala de classificação adoptada, pelo que ficam neste caso com uma dimensão de n x n. Sendo MM a matriz de Markov, cada elemento MM<sub>ij</sub> da matriz MM representa a probabilidade de um processo iniciado no estado i estar no estado j depois de um determinado intervalo de tempo. Por inerência ao conceito de probabilidade, nas Matrizes de Markov, em cada linha i a soma dos vários valores que constituem a matriz é unitária. Note-se ainda que nos intervalos de tempo em que as pontes não são alvo de qualquer tipo de intervenção de reparação ou reforço, não é espectável qualquer melhoria do respectivo estado de condição, pelo que, nas situações em que j corresponde a um estado melhor que i, M<sub>ij</sub> é nulo. Considerando ainda EC(0) como o vector correspondente ao estado de condição inicial e t o número de intervalos de tempo em análise, pode considerar-se para previsão de estados futuros a Equação (1) (Cesare, Santamarina et al. 1992; Morcoux 2006).

$$EC(t) = EC(0) \times MM^t \quad (1)$$

Assim, a partir das Matrizes de Markov e do estado de condição corrente podem ser analisadas cadeias com as probabilidades de transição entre os diferentes estados e podem ainda ser traçadas curvas da evolução do estado de condição ao longo do tempo.

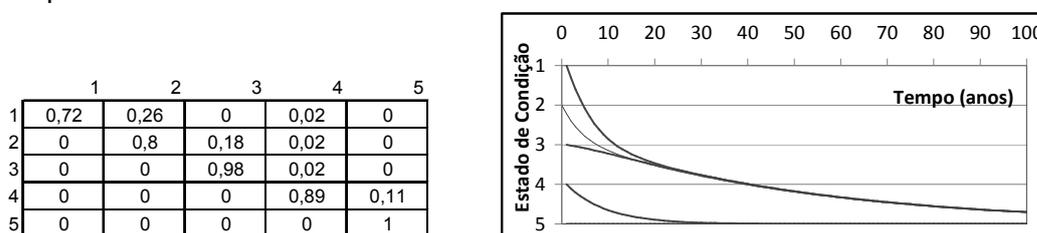


Figura 1 - Matriz de Markov (Orcesi and Cremona 2009) e respectivas curvas de evolução temporal

No presente trabalho, onde se pretende efectuar uma previsão do estado de condição de um parque de pontes ao longo do tempo, foi adoptada a Matriz de Markov proposta por Orcesi e Cremona (Orcesi and Cremona 2009) e apresentada na Figura 1, relativa à previsão do estado de pontes rodoviárias de betão ao longo do tempo. Essa matriz foi obtida pelos autores a partir do estudo de dados relativos a obras de arte desse tipo

construídas em França entre 1973 e 1993, de entre um universo inicial de 9000 pontes classificadas segundo o método Francês IQOA (*Image Qualité Ouvrages d'Art*), com a escala de classificação IQOA indicada na Tabela 2. Na mesma tabela é ainda apresentada a classificação atribuída às Obras de Arte pela REFER (REFER 2009) nas suas campanhas de inspecção, estabelecida segundo as recomendações da UIC (UIC 1989), que no presente trabalho se admitiu como podendo ser directamente equivalente à do método IQOA. No entanto, de ora em diante essa escala será referida na outra escala de 1 a 5 apresentada na Tabela 2, obtida a partir da adoptada pela REFER por soma de um valor, por ter sido essa a considerada na ferramenta de cálculo desenvolvida.

Tabela 2 - Escalas de Classificação de 5 níveis para o Estado de Condição das Pontes

Estado de condição IQOA		EC adoptado pela REFER		Outras Escalas 1 a 5	
1	Bom	0	Sem defeitos	1	Muito Bom
2	Danos estruturais menores. Precisa de manutenção não urgente.	1	Defeitos menores, cuja correcção pode ser adiada para um altura conveniente	2	Bom
2e	Danos estruturais menores. Precisa de manutenção urgente.	2	Defeitos sérios sem efeitos a curto prazo sobre a estabilidade da estrutura, mas que podem aumentar os custos de manutenção se não forem corrigidos rapidamente	3	Médio
3	Danos estruturais. Precisa de manutenção não urgente.	3	Defeitos sérios com impacto a curto prazo na capacidade resistente da estrutura, podendo causar restrições à exploração	4	Mau
3u	Danos estruturais graves. Precisa de manutenção urgente.	4	Defeitos que requerem acções imediatas, podendo levar ao corte imediato da exploração	5	Muito Mau

### 2.3 Índices de custo

Para cada obra de arte, em cada um dos ciclos temporais são considerados três valores possíveis, correspondentes a diferentes tipos de actuação: 0 – sem intervenção; 1 – intervenção ligeira e 2 – intervenção profunda. Nas intervenções do tipo 1 e 2 é considerada a subida de, respectivamente, 1 e 2 níveis do EC arredondado à unidade, podendo por esse facto significar até melhorias ligeiramente melhores ou piores (com diferenças até cerca de 0,5 de EC).

Para cada uma dessas intervenções é então definido um Índice de Custo de Intervenção (ICI) que por multiplicação pelo preço unitário é directamente relacionável com o custo. Esse ICI é calculado segundo uma função linear de custos relativos que tem em consideração o estado inicial da obra e essa variação do estado de condição, para além de um Índice de Obra de Arte (IOA) calculado a partir de dados relativos à ponte, como o seu comprimento, a sua altura, o número de vãos e ainda um Índice de Complexidade (ICX) que permite ter em consideração factores como o grau de dificuldade de realização dos trabalhos e a acessibilidade à obra de arte. Essa função usada para escalonamento de custos, sendo dependente de uma grande multiplicidade de factores, alguns deles associados a particularidades do sistema em análise, é ajustável pelo decisor de acordo com as particularidades do parque de obras de arte a gerir. Nesta fase essa função foi definida essencialmente com a preocupação de diferenciar vários níveis de custo, no entanto, no âmbito de desenvolvimentos futuros será feita uma proposta com um maior grau de detalhe que permita obter valores mais próximos dos reais.

Para que os custos das intervenções a realizar em diferentes ciclos temporais da análise se tornem comparáveis, o ICI é ainda alvo de uma actualização ao ano corrente, de acordo com o apresentado na Equação (2), tendo em conta o ano  $t$  a que se refere o ICI e uma taxa de actualização anual de 5% (INNTRACK 2007).

$$ICI \text{ actual} = (ICI \text{ ano } t) / (1 + Tx. \text{ actualização anual})^t \quad (2)$$

Se para além disso se quiser também ter em conta na análise alguns critérios associados à funcionalidade e utilidade pública das obras bem como alguns dos

benefícios resultantes de ter em melhor estado pontes de maior importância para os utilizadores, a metodologia permite ainda ao utilizador a consideração de um Factor multiplicativo de Correção (FC) da função adaptação. Esse factor permite contemplar alguns descontos do valor da mesma, associados aos benefícios de melhorar o estado de obras importantes do ponto de vista da sua utilização. O FC pode por exemplo ser considerado igual a um REG estabelecido segundo critérios do género dos estabelecidos pela FHWA (1995) para pontes rodoviárias, com uma gama de valores entre 0 e 100% em que os valores menores correspondem às obras de maior urgência de implementação de acções de reparação ou beneficiação, ou seja de maior importância e mais baixos níveis de desempenho e segurança. Importa referir ainda que, se pretendido, esse factor FC pode ser usado só quando REG é inferior a um determinado valor e que o utilizador tem também a opção de, em alternativa ou em conjunto, definir um limite de EC mais exigente para gamas mais baixas de REG.

### 3 RESULTADOS

Os resultados da validação e calibração da ferramenta de cálculo desenvolvida, bem como alguns exemplos da sua aplicação, que se passam a apresentar, foram obtidos considerando ciclos temporais de 4 anos, uma taxa de inflação anual de 2% e um preço de reparação unitário, pelo que bastará multiplicar os Índices de Custo apresentados por esse valor para estimar custos reais. Os ciclos temporais de 4 anos foram escolhidos para permitir, por um lado, uma actualização a cada ciclo com os resultados das inspecções principais, e também para permitir analisar uma janela temporal de 20 anos, período de tempo considerado razoável para análise num horizonte a médio prazo.

#### 3.1 Validação e calibração da ferramenta

Nos casos em que não há restrições globais, como só há três tipos de actuação possíveis para cada um dos 5 ciclos, a busca da solução para o problema fica bastante simplificada e pode ser feita de forma muito expedita com o cálculo dos custos de todas as combinações possíveis. Para o efeito foi então criada uma outra aplicação informática que possibilita a determinação do custo mínimo absoluto para esses casos e que foi também usada para verificação dos resultados obtidos com a optimização via AG, bem como para determinação dos parâmetros mais ajustados para a sua utilização. Na Tabela 3 e na Figura 2 são apresentados alguns resultados do estudo de sensibilidade dos parâmetros do AG efectuado, onde o erro indicado corresponde à diferença percentual do custo da solução relativamente ao valor mínimo determinado pelo cálculo de todas as combinações.

Tabela 3 – Variação do erro com a variação dos parâmetros do AG

Tx Sobreviventes	10%										5%	5%	10%	10%	25%	25%	0%	80%	
Tx Elite	75%										50%	75%	50%	75%	50%	75%	10%	75%	
Permutação	0%					5%	10%	5%	10%	5%					50%				
Cruz. mono-ponto	90%	60%	45%	30%	0%	45%					32%		30%		25%		10%		
Cruz. uniforme	0%	30%	45%	60%	90%	45%					63%		60%		50%		90%		
Mutações	0%					5%	10%	0%	5%	10%	5%					80%			
Erro máximo	11%	6%	9%	11%	12%	6%	10%	5%	10%	6%	8%	7%	9%	9%	7%	12%	10%	14%	13%
Erro médio	8%	4%	4%	5%	7%	4%	5%	3%	6%	3%	3%	6%	7%	6%	5%	8%	7%	8%	6%
Desvio Padrão	3%	3%	4%	3%	4%	2%	5%	2%	2%	3%	3%	2%	3%	2%	2%	4%	3%	5%	5%

8 Obras de Arte (distribuição equitativas de EC entre 1 e 4); 200 indivíduos; EC máximo = 3; S/ restrições globais; 4 anos/ciclo (5 iterações)

A partir da apreciação dos resultados da Tabela 3 pode concluir-se que a variação experimentada nas taxas de sobrevivência, elite e aplicação dos operadores de reprodução não mostrou ter uma interferência muito significativa nos resultados, recomendando-se no entanto a adopção de valores dentro da gama onde se obteve melhores resultados e que aliás se aproxima também da já referida por outros autores (Castro 2001; Haupt and Haupt 2004; Farrera 2006; Elbehairy 2007; Poli, Langdon et al. 2008): taxa de sobrevivência entre 5% e 25%, taxa de cruzamento entre 75 e 90%, taxa de permutação até 10% e uma taxa de mutação entre 0,1% e 10%.

De facto, o parâmetro do AG identificado com sendo o mais importante para uma melhor aproximação à solução óptima foi o número de indivíduos da população que deve ser convenientemente ajustado ao número de obras de arte em análise. Na Figura 2 pode verificar-se que, como esperado, um maior parque de obras de arte obriga ao aumento do tamanho da população considerado no AG, com o conseqüente aumento do tempo de processamento. Assim, o número de indivíduos deve ser escolhido tendo em conta os resultados apresentados na Figura 2 com a ressalva relativa ao facto de os mesmos serem relativos a cenários sem restrições globais pelo que sempre que se acrescentam restrições desse tipo se recomenda um aumento desse número para que se possa chegar a uma solução que seja de facto próxima da óptima. No ponto seguinte são apresentados resultados de análises com esse tipo de restrições.

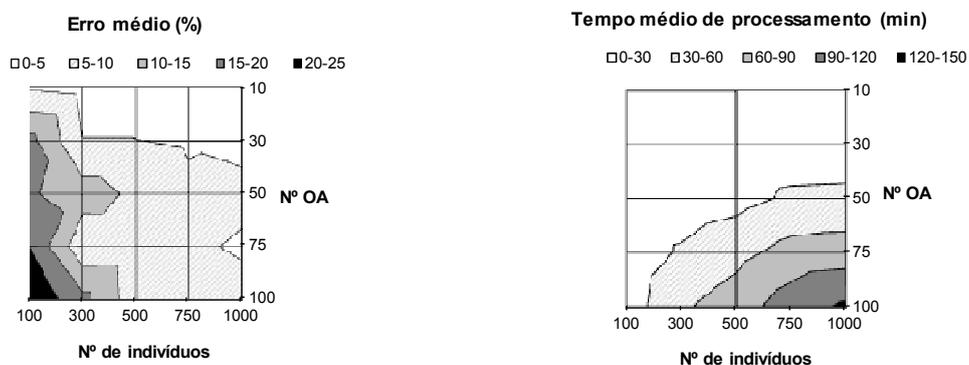


Figura 2 - Variação do erro e do tempo de processamento com o número de obras e o tamanho da população (média de 3 iterações com 10% sobreviv., 10% perm., 90% cruz. e 10% mutação)

### 3.2 Apresentação de resultados obtidos na análise de sensibilidade

Quando são impostas restrições globais para o parque de obras de arte, o tipo de validação anteriormente referido já não pode ser usado. Nesses casos a verificação dos resultados foi efectuada com exemplos hipotéticos de pequena dimensão.

A Tabela 4 apresenta a solução óptima de actuação encontrada para um conjunto de 8 obras de arte em alguns cenários distintos – sem limitações globais e com imposição do número máximo de actuações num dos ciclos temporais. Como se pode verificar pela análise dos resultados apresentados na Tabela 4, onde à excepção do primeiro exemplo, se considerou um FC igual ao REG, a limitação do número de intervenções no quarto ciclo temporal começa por se reflectir na solução da OA 8, onde o desconto associado ao baixo valor de REG permite aumentar até o número de acções com uma conseqüente melhoria do EC médio. Depois, quando se pretende eliminar outra intervenção do quarto ciclo, a solução que se altera é a da OA 6, uma vez que a diferença do custo do adiamento dessa obra é menor que a associada à alteração da solução para a OA 7. Por essa mesma razão, a alteração seguinte é na OA 5 e só depois, quando se limitam as intervenções a 4, se verifica a alteração na OA 7. Finalmente, quando só é permitida uma intervenção no quarto ciclo, a alteração resulta num adiamento da obra em melhor estado e com menos exigências funcionais, ou seja a obra com maior REG: OA 1.

Tabela 4 – Variação dos resultados com a imposição de restrições globais

IOA			ECmax: Limites de actuações:				Limites de actuações:				Limites de actuações:												
100			3				7				6												
REG			EC Ini				FC = REG				FC = REG												
			Actuação por ciclo				Actuação por ciclo				Actuação por ciclo												
			EcmecECmax				EcmecECmax				EcmecECmax												
OA1	90%	1	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	1	0	2,3	2,7
OA2	70%	1	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	1	0	2,3	2,7
OA3	70%	2	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	0	1	0	2,4	2,7
OA4	50%	2	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	0	1	0	2,4	2,7
OA5	50%	3	1	0	1	1	0	2,3	2,7	1	0	1	1	0	2,3	2,7	1	0	1	1	0	2,3	2,7
OA6	30%	3	1	0	1	1	0	2,3	2,7	1	0	1	1	0	2,3	2,7	1	0	1	1	0	2,3	2,7
OA7	30%	4	1	1	0	1	0	2,5	3,0	1	1	0	1	0	2,5	3,0	1	1	0	1	0	2,5	3,0
OA8	10%	4	1	1	0	1	0	2,5	3,0	1	1	1	0	1	2,3	3,0	1	1	1	0	1	2,3	3,0

IOA			ECmax: Limites de actuações:				Limites de actuações:				Limites de actuações:												
100			3				5				4				1								
REG			EC Ini				FC = REG				FC = REG				FC = REG								
			Actuação por ciclo				Actuação por ciclo				Actuação por ciclo				Actuação por ciclo								
			EcmecECmax				EcmecECmax				EcmecECmax				EcmecECmax								
OA1	90%	1	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	0	1	2,3	2,7
OA2	70%	1	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	1	0	2,3	2,7	0	0	1	1	0	2,3	2,7
OA3	70%	2	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	1	0	1	2,3	2,7
OA4	50%	2	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	0	1	0	2,4	2,7	0	1	1	0	1	2,3	2,7
OA5	50%	3	1	0	1	0	1	2,3	2,7	1	0	1	0	1	2,3	2,7	1	0	1	0	1	2,3	2,7
OA6	30%	3	1	0	1	0	1	2,3	2,7	1	0	1	0	1	2,3	2,7	1	0	1	0	1	2,3	2,7
OA7	30%	4	1	1	0	1	0	2,5	3,0	1	1	1	0	1	2,3	3,0	1	1	1	0	1	2,3	3,0
OA8	10%	4	1	1	1	0	1	2,3	3,0	1	1	1	0	1	2,3	3,0	1	1	1	0	1	2,3	3,0

3000 indivíduos, 25% sobrevivência, 50% elite, 10% permutações, 75% cruzamentos e 1% mutações

Tabela 5 – Alteração da solução por imposição de limites de custo e por cálculo em sub-grupos

ECmax:			OA 1a 8:				OA 1a 8:								
(geral) (REG<50%)			Limites de Índice de custo:				Limites de Índice de custo:								
3			FC = 1				FC = 1								
IOA			Actuação por ciclo				Actuação por ciclo								
REG			ECmax				ECmax								
EC Ini															
OA1	310	90%	1	0	0	1	1	0	2,7	0	1	0	1	0	2,7
OA2	1060	70%	1	0	0	1	1	0	2,7	0	0	1	1	0	2,7
OA3	350	70%	1	0	0	1	1	0	2,7	0	1	0	1	0	2,7
OA4	905	60%	2	0	1	0	1	0	2,7	0	1	0	1	0	2,7
OA5	600	50%	2	0	1	0	1	0	2,7	1	0	1	0	1	2,7
OA6	296	45%	2	1	1	1	1	1	2,0	1	1	1	1	1	2,0
OA7	110	45%	3	1	1	1	1	1	2,0	1	1	1	1	1	2,0
OA8	725	40%	3	1	1	1	1	1	2,0	1	1	1	1	1	2,0
Custos por ciclo:			614	1019	996	1013	175	3817	816	941	944	908	331	3941	
Total:															

ECmax:			OA 5 a 8 + OA 1 a 4:				OA impares + OA pares:								
(geral) (REG<50%)			Limites de Índice de custo:				Limites de Índice de custo:								
3			FC = 1				FC = 1								
IOA			Actuação por ciclo				Actuação por ciclo								
REG			ECmax				ECmax								
EC Ini															
OA1	310	90%	1	0	0	1	0	1	2,7	0	0	1	1	0	2,7
OA2	1060	70%	1	0	0	1	1	0	2,7	0	0	1	0	1	2,7
OA3	350	70%	1	0	0	1	1	0	2,7	0	0	1	1	0	2,7
OA4	905	60%	2	1	1	0	1	0	2,7	1	1	0	1	0	2,7
OA5	600	50%	2	0	1	0	1	0	2,7	0	1	0	1	0	2,7
OA6	296	45%	2	1	1	1	1	1	2,0	1	1	1	1	1	2,0
OA7	110	45%	3	1	1	1	1	1	2,0	1	1	1	1	1	2,0
OA8	725	40%	3	1	1	1	1	1	2,0	1	1	1	1	1	2,0
Custos por ciclo:			919	846	996	955	256	3971	919	846	996	814	451	4026	
Total:															

Parâmetros: 750 indivíduos/OA, 10% sobrevivência, 50% elite, 10% permutações, 90% cruzamentos e 10% mutações  
 Divisão: No 1º grupo sem restrições de índice de custo e no 2º com limitação à diferença do total para o valor do 1º grupo

Na Tabela 5 é apresentado um exemplo dos resultados obtidos quando o limite máximo de EC é mais exigente nas obras com menor REG. Para além disso, pensando nos casos em que há necessidade de estabelecer tectos orçamentais, são apresentadas as soluções obtidas quando são impostos limites de índice de custo de

intervenção nos vários ciclos temporais da análise. Com o intuito de testar ainda uma eventual possibilidade de cálculo em sub-grupos, as soluções apresentadas para esse caso foram geradas por três processos distintos – cálculo das 8 obras de arte de uma só vez e cálculo em dois sub-grupos obtidos por dois processos de divisão distintos. Num dos casos de cálculo com divisão em sub-grupos a solução obtida foi ligeiramente melhor que a obtida de forma global e no outro caso foi ligeiramente mais onerosa. No entanto, apesar de as soluções obtidas pelos três processos distintos não terem sido absolutamente coincidentes, a maior diferença entre os resultados finais não chegou a ultrapassar os dois pontos percentuais. Aliás, essas ligeiras diferenças também podem ser verificadas entre soluções geradas pelo mesmo processo em diferentes iterações. Assim sendo, o cálculo por partes poderá não conduzir à mesma solução que o cálculo único, no entanto é possível que de uma forma geral não conduza a resultados significativamente diferentes, podendo ser ligeiramente melhor ou pior – o que se pode aceitar quando não se procura necessariamente o óptimo absoluto e se pode aceitar uma solução próxima da óptima, como é o caso. Assim sendo, nos parques com grande número de obras de arte em que o cálculo global se pode tornar complicado, a solução poderá ser obtida por recurso a uma técnica de sub-divisão semelhante à utilizada no exemplo apresentado na Tabela 5.

### 3.3 Apresentação de resultados obtidos com um conjunto real de obras de arte

Para testar a aplicação informática desenvolvida foi escolhida uma amostra de 100 Obras de Arte de Betão Armado da REFER, de entre as com comprimento igual ou superior a 10m e de forma a manter características dimensionais variáveis e uma distribuição por EC próxima da amostra inicial. Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos na optimização da intervenção das obras de arte dessa amostra sem imposição de restrições globais.

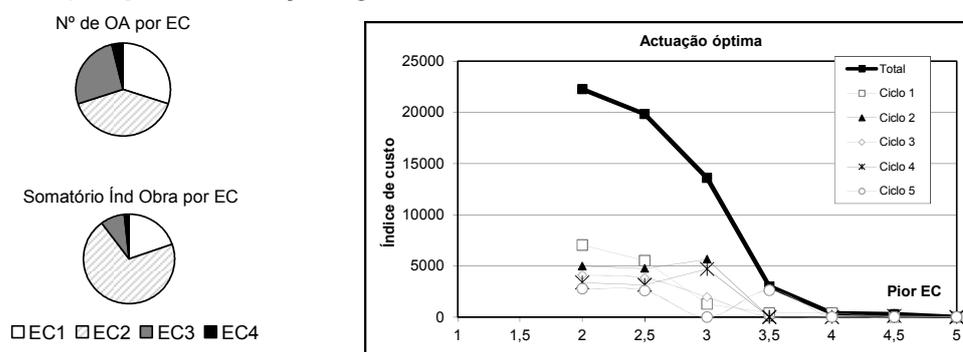


Figura 3 – Caracterização da amostra de 100 Obras de Arte considerada e Gráfico com as respectivas soluções óptimas de actuação (EC convertido numa escala de 1 a 5)

No caso da Figura 3 pode por exemplo observar-se que a diferença de custo entre limitar o pior estado a 2 ou a 2,5 é diminuta e muito pouco expressiva (11%) quando comparada com a diferença entre os limites de 2,5 e 3 (31%) ou de 3 e 3,5 (78%), evidenciando assim a utilidade deste tipo de resultados para fundamentar determinadas decisões dos gestores.

Na Tabela 6, esses resultados óptimos obtidos em cenários sem restrições globais são ainda comparados com os obtidos com outras estratégias de intervenção e com alterações da classificação do EC, para além de resultados obtidos com limitações do custo dos dois últimos ciclos. Na comparação da solução óptima com a da actuação estabelecida (nas obras de EC1 actuar só no 3º e 5º ciclos; nas obras de EC4 actuar com nível 2 no 1º ciclo e depois com nível 1 de 8 em 8 anos; nas restantes obras actuar nos ciclos ímpares) é possível verificar a importância da optimização que no exemplo apresentado chega a significar uma poupança de 21% do custo. Para além

disso, uma vez que à classificação do Estado de Condição de cada ponte está sempre inerente uma certa subjectividade (Brent M. Phares 2001), importa analisar a variabilidade dos resultados com a alteração do EC inicial das obras de arte. Nesse sentido, a Tabela 6 mostra a título de exemplo que a variação do índice de custo total com o aumento e a diminuição de um valor do EC inicial em todas as obras corresponde, respectivamente, a um acréscimo de 54% e a um decréscimo de 21%. Relativamente aos resultados obtidos numa optimização com restrições globais o exemplo apresentado na Tabela 6 mostra que apesar de conduzir, como esperado, a um custo ligeiramente superior em comparação com a solução sem restrições, pode acabar por se tornar mais vantajoso pelo facto de distribuir esse custo de forma mais uniforme pelos vários ciclos.

Tabela 6 – Resultados obtidos para a amostra de 100 Obras de Arte (o cálculo dos casos sem restrições globais foi efectuado usando o somatório dos Índices de Obra de cada EC)

Sem restrições globais (com EC máximo = 3 e PI = 0):

ΣIOA	EC Ini	Actuação óptima por ciclo						Ecméd	FC	ΣIOA	EC Ini	Actuação estabelecida						Ecméd	FC
3312	1	0	0	1	1	0	2,7	100%	3312	1	0	0	1	0	1	2,7	100%		
11738	2	0	1	0	1	0	2,7	100%	11738	2	1	0	1	0	1	2,7	100%		
1419	3	1	0	1	1	0	2,7	100%	1419	3	1	0	1	0	1	2,7	100%		
283	4	1	1	0	1	0	3,0	100%	283	4	2	0	1	0	1	2,7	100%		
Índice de custo por ciclo: Total:									Índice de custo por ciclo: Total:										
1267 5648 1968 4703 0 13585									5510 0 6605 0 4374 16489 + 21%										

ΣIOA	EC Ini	Actuação óptima por ciclo						Ecméd	FC	ΣIOA	EC Ini	Actuação óptima por ciclo						Ecméd	FC
3312	2	0	1	0	1	0	2,7	100%	3312	1	0	0	1	1	0	2,7	100%		
11738	3	1	0	1	1	0	2,7	100%	11738	1	0	0	1	1	0	2,7	100%		
1419	4	1	1	0	1	0	3,0	100%	1419	2	0	1	0	1	0	2,7	100%		
283	5	2	1	0	1	0	3,0	100%	283	3	1	0	1	1	0	2,7	100%		
Índice de custo por ciclo: Total:									Índice de custo por ciclo: Total:										
10133 2416 4528 3795 0 20871 + 54%									174 666 6563 3328 0 10731 - 21%										

Com restrições globais (com EC máximo = 3 e PI = 0):

Limites de custo:		Pior EC
4000	4000	3,0
Índice de custo por ciclo: Total:		
1267	5648	2032 3992 939 13877 + 2%

Actuação óptima calculada via AG com 1500 ind, 10% sob, 10% perm, 90% cruz e 10% mutação

#### 4 CONCLUSÕES

A aplicação de apoio à gestão apresentada permite planear de forma optimizada a actuação num parque de obras de arte ao longo de um horizonte temporal de médio/longo prazo, tendo em conta as restrições impostas pelo utilizador e critérios associados à funcionalidade e segurança das obras. A optimização é efectuada com recurso a um algoritmo genético que se mostrou capaz de manipular bem os parâmetros discretos e de encontrar uma actuação de mínimo custo entre um vasto espaço de soluções possíveis. Essa aplicação foi preparada de forma a permitir ter em conta a taxa de actualização prevista e a ponderar eventuais benefícios associados a ter as obras de maior importância funcional em melhor estado. Para o efeito é efectuada uma previsão da degradação do Estado de Condição (EC) de cada uma das obras ao longo do tempo, com recurso a matrizes de Markov, bem como a correcção dessa classificação em função das actuações equacionadas.

Nos resultados obtidos na análise de uma amostra de cem pontes ferroviárias pode por exemplo observar-se que a solução óptima permite uma poupança de cerca

de 20% em relação a uma outra política de actuação não otimizada e ainda que a diferença de custo entre limitar o pior estado a 2 ou a 2,5 é pouco expressiva (11%) quando comparada por exemplo com a diferença entre os limites de 2,5 e 3 (31%). Esses resultados permitiram ainda verificar uma grande sensibilidade dos índices de custo de intervenção finais relativamente à classificação do Estado de Condição inicial pelo que em trabalhos futuros será de procurar implementar medidas de redução da subjectividade associada a esse parâmetro. Relativamente à possibilidade de imposição de restrições os resultados analisados mostram que as mesmas podem permitir encontrar soluções, que embora apresentem custos totais ligeiramente superiores, sejam mais vantajosas pelo facto de conseguirem, por exemplo, distribuir mais uniformemente o custo pelos vários ciclos temporais.

A metodologia apresentada possibilita assim um estudo económico-financeiro de múltiplos cenários de utilidade na tomada de decisões e na justificação de necessidades de investimento perante uma entidade financiadora ou reguladora.

## 5 AGRADECIMENTOS

Agradece-se a colaboração da REFER neste trabalho bem como o apoio financeiro da FCT, ao abrigo Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/49255/2008 do programa PROTEC. No entanto, ressalva-se o facto de as conclusões e opiniões apresentadas na comunicação não reflectirem necessariamente o ponto de vista dessas entidades.

## 6 REFERÊNCIAS

1995. Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges. . Report N° FHWA-PD-96-001, FHWA, U.S. Dep. Transportation.
- Brent M. Phares, D. D. R., Benjamin A. Graybeal, and Glenn A. Washer. 2001. "Reliability of Visual Bridge Inspection." Public Roads Magazine Vol64-n°5.
- Castro, R. E. D. 2001. Otimização de Estruturas com Multi-objetivos Via Algoritmos Genéticos, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Brasil. Doutoramento.
- Cesare, M. A., C. Santamarina, et al. 1992. "Modeling Bridge Deterioration with Markov Chains." Journal of Transportation Engineering - ASCE Vol.118(N.º 6).
- Elbehairy, H. 2007. Bridge Management system with integrated Life Cycle Cost Optimization. Waterloo, Ontario, Canada, University of Waterloo. Doctor of Philosophy.
- Elbehairy, H., T. Hegazy, et al. 2009. "Integrated Multiple-Element Bridge Management System." Journal of Bridge Engineering (ASCE).
- Farrera, F. A. A. 2006. 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. Universitat Politècnica de Catalunya. Tesis Doctoral.
- Haupt,R.L., Haupt,S.E.. 2004. "Practical Genetic Algorithms" 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Holland, J. H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems.
- INNOTRACK. 2007. Report D 6.2.1 - LCC Methodology - Unique Boundary Conditions, ADIF.
- Lounis, Z. 2006. Risk-based Maintenance optimization of aging highway bridge decks NRCC - Canada.
- Morcous, G. 2006. "Performance Prediction of Bridge Deck Systems Using Markov Chains." Journal of Performance of Constructed Facilities - ASCE.
- Orcesi,A.D., Cremona,C.F. 2009. "Optimization of management strategies applied to the national reinforced concrete bridge stock in France", Structure and Infrastructure Engineering 5(5): 355-366.
- Poli, R., W. B. Langdon, et al. 2008. "A Field Guide to Genetic Programming."
- REFER. 2009. Inspecção da Infra-estrutura Ferroviária – Pontes. Curso de Formação em Engenharia Ferroviária - Módulo 4 - Construção, Monitorização, Manutenção e Renovação da Infra-estrutura ferroviária (FUNDEC - IST).
- UIC. 1989. Defects in railway bridges and procedures for maintenance and strengthening. UIC Code 778-4R.