“Momento óptimo de substituição de uma chapa sujeita a degradação”

Rui Assis

Engenheiro Mecânico IST
rassis@netcabo.pt

Abril/1999

Resumo

O presente artigo descreve a forma de determinar o número económico de vezes que uma chapa, integrante de uma estrutura sujeita a forte corrosão, deve ser repintada antes que a sua espessura atinja um limite mínimo que aconselhe a sua substituição. Nesta abordagem, parte-se do conhecimento de todos os custos pertinentes originados previsivelmente ao longo do ciclo de vida da chapa e demonstra-se a utilidade de combinar as funções descritoras de fenómenos físicos, do domínio da Engenharia dos materiais, com funções de análise financeira, completando, assim, aquilo que poderemos apelidar, com propriedade, de “análise técnico-económica”, cuja oportunidade se verifica em tantas situações da Engenharia de Manutenção.

Palavras-chave:

Análise económica. Conversão financeira. Taxa de juro. Optimização. Apoio à decisão.

Introdução

Existem muitos casos de dimensionamento em Engenharia nos quais a variável de decisão, salvaguardadas as vertentes segurança e impacte ambiental, pode assumir diferentes valores práticos (normalizados pelos fabricantes e, muitas vezes, descritos em tabelas técnicas). A selecção do valor mais adequado resulta, em última análise, da ponderação dos vários custos previstos ao longo do chamado "ciclo de vida" do elemento estruturante, considerados pertinentes para o processo de apoio à decisão. Este valor da variável de decisão torna a soma de todos os custos (de investimento, de exploração e de desactivação) mínima. Constitui, pois, um valor "óptimo" na perspectiva económica, o qual deverá ser idealmente o eleito entre várias alternativas.

Este é, sem dúvida, um assunto de grande importância, quando tomamos consciência de que os nossos engenheiros recebem nas nossas escolas uma formação essencialmente tecnológica e da qual, matérias de análise económica e financeira, se encontram praticamente arredadas. Perdem-se, assim, oportunidades de introduzir racionalidade económica nas decisões, quer ao nível do projecto, quer ao nível de melhorias de produtividade ao longo da fase de exploração de muitos equipamentos. Com efeito, constitui prática generalizada e incorrecta decidir apenas com base no preço de aquisição (custo do investimento) mais baixo. Sendo os recursos sempre escassos, é consensual afirmar que interessa seleccionar a alternativa mais económica entre todas as alternativas viáveis (segundo outros critérios). Contudo, aquilo que é muitas vezes esquecido (ou desconhecido?) é que, ser mais económico significa apresentar "o menor custo do ciclo de vida" e não "o menor investimento" - já lá diz o ditado: "O que é barato sai caro"!

Vejamos um caso ilustrativo de uma abordagem na perspectiva económica de um problema de Engenharia de Manutenção.

Caso de substituição de uma chapa

Existem estruturas que funcionam imersas em ambientes hostis (líquidos ou gasosos) e que se degradam com relativa rapidez. Após algum tempo da sua entrada em serviço, ocorre o primeiro episódio de recuperação parcial dos materiais expostos, ao qual outros se seguirão. Esta recuperação é levada a cabo aplicando materiais de protecção superficial (pintura, metalização, etc.). Passado algum tempo, as características físicas de alguns pontos da estrutura ter-se-ão degradado até limites mínimos de segurança, tornando inevitável a substituição de alguns dos seus componentes. Chapas de aço constituintes do costado e convés de navios ou das paredes laterais e do fundo de tanques de tratamento químico por imersão, constituem alguns exemplos.

Este tipo de estruturas apresenta frequentemente expectativas de vida útil de algumas dezenas de anos, o que torna economicamente viável a substituição parcial de materiais constituintes da estrutura em vez da decisão radical pelo abate definitivo.

Neste tipo de situações, cada paragem para tratamento da superfície envolve custos elevados: custos de materiais, custos de aplicação, custos de ocupação de estaleiro e custos de oportunidade. Estes últimos são proporcionais ao tempo de imobilização. Em contrapartida, a degradação é contida por algum tempo, alongando a vida útil dos materiais expostos. Quando o limite mínimo de alguma característica física mensurável (espessura, por exemplo) é atingido nalgum ponto da estrutura, o componente degradado (chapa, perfil, etc.) deve ser substituído imediatamente. Na prática, será substituído logo que a última medição seja conhecida e se julgue desnecessária nova recuperação de superfície. Neste momento, ocorrerão custos normalmente muito mais elevados do que uma operação de pintura.

Suponhamos o caso de uma chapa naquelas condições e na qual a espessura constitua o parâmetro crítico. Um problema desta natureza pode, então, ser formulado da seguinte forma: Uma vez conhecida a espessura inicial e_0 e a espessura limite mínima e_m, qual deverá ser, na perspectiva económica, o número ideal n* de vezes de pintura da chapa antes de a sua espessura atingir valores muito próximos da espessura limite mínima e_m? Ou, dito de outra forma, qual deverá ser a fracção Δe do intervalo admissível de degradação tolerada da espessura (e_0-e_m) que minimiza a soma do custo de substituição da chapa (investimento) e do custo das várias operações de pintura (manutenção) ao longo do tempo de vida útil, ou seja, até que a espessura limite mínima seja atinjida?

Suponhamos conhecidos os valores: (i) de substituição da chapa por outra nova C_s (material, desmontagem e montagem, tinta e aplicação, estaleiro e oportunidade), (ii) do custo de uma pintura C_p (tinta e aplicação, estaleiro e oportunidade), (iii) da taxa mínima de rentabilidade real e anual i% que a empresa tem estabelecida como política para este tipo de investimentos, (iv) do tempo de duração de uma pintura T (períodos) antes de a degradação se reiniciar.

A próxima etapa consiste em conhecer a evolução previsional da espessura da chapa em função do tempo (função de degradação). Esta evolução é, normalmente, da seguinte forma:

$$e = e_0 - \alpha . t^{\beta}$$

em que: e – é a espessura da chapa decorridos t períodos (semanas, meses, anos, etc.);
e_0 – representa a espessura inicial da chapa;
α – é um parâmetro que representa a velocidade inicial de degradação;
t – representa o tempo (meses, anos, etc., ou, genericamente, períodos);
β – é um parâmetro que representa a aceleração da degradação.

A representação gráfica daquela função pode ser observada na Figura 1, adiante.

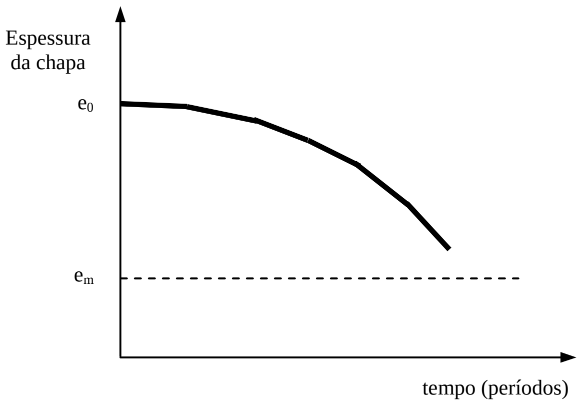

Figura 1 – Evolução temporal da espessura da chapa sem intervalos de pintura

Contudo, sempre que a chapa atinge as espessuras (e_0-Δe), (e_0-2.Δe), (e_0-3.Δe), ... , (e_0-n.Δe), até valores muito próximos de e_m, a chapa será repintada. Em consequência, a sua degradação será interrompida n vezes durante n.T unidades de tempo. Assim sendo, e assumindo que o reinício da degradação se verifica em cada ponto da curva onde aquela fora anteriormente interrompida, aquela função deixa de ser contínua e passa a apresentar patamares que se iniciam nos momentos 0, t_1, t_2, t_3, ... , t_n, cada um com a duração de T períodos, conforme se pode observar adiante, na Figura 2.

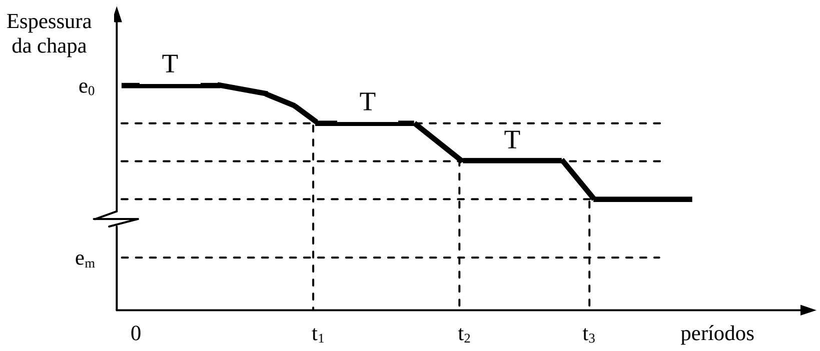

Figura 2 – Evolução temporal da espessura da chapa com intervalos de pintura

A abordagem consistirá, então, em calcular, para cada alternativa de decremento da espessura Δe da chapa e adoptando o método dos preços constantes (em alternativa ao dos preços correntes) o custo total correspondente à soma do custo do investimento, isto é, do custo de substituição da chapa degradada por uma nova, e do custo da sua manutenção, isto é, do custo das pinturas que se seguirão de forma a prolongar a sua vida útil. Uma vez conhecido o custo total de cada alternativa do valor do decremento, poderá seleccionar-se o valor óptimo deste, o qual corresponderá, obviamente, ao menor valor daquele.

Como a vida útil da chapa para cada decremento alternativo Δe da sua espessura é diferente, pois varia proporcionalmente com a frequência das pinturas, e assumindo a continuidade da vida do equipamento do qual a chapa é parte integrante, o método adequado para comparação entre si dos custos totais de cada alternativa deve ser o do custo uniforme equivalente (ou renda) e não o do custo (ou valor) actual equivalente.

Os custos a ter em conta serão, então, os seguintes:

- o somatório dos custos das operações de pintura que terão lugar nos momentos t_1, t_2, t_3, ... , t_n, uniformizado para o intervalo de tempo entre hoje e o momento t_s (momento em que a chapa será novamente substituída), equivalente à soma de N vezes o custo C_p de uma operação de pintura e actualizada à taxa periódica i_p%:

$$C_{up} = (A/P;i_p;t_s).\sum_{1}^{N} C_p.(P/F;i_p;t_n)$$

- o custo de substituição da chapa C_s uniformizado à taxa periódica i_p% para o intervalo de tempo entre hoje e o momento t_s :

$$C_{us} = C_s.(A/P;i_p;t_s)$$

O diagrama de *cash-flow* representando estes custos pode ser visto na Figura 3 adiante. Nesta, supôs-se que o momento da análise (hoje ou momento 0) coincide com um dos momentos em que a chapa acabou de ser substituída e vai entrar em serviço.

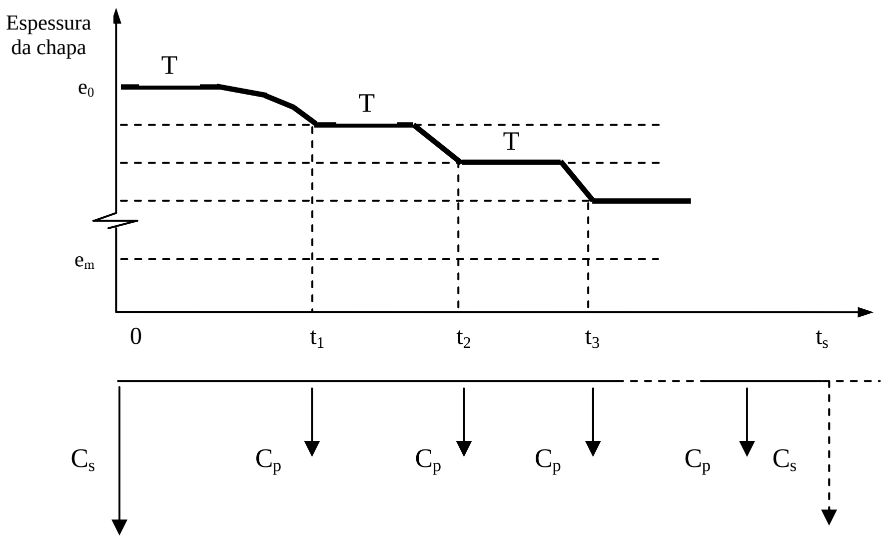

Figura 3 – Diagrama do cash-flow previsional mostrando os momentos de pintura da chapa e o da sua substituição

A análise poderia ter sido realizada considerando o custo de substituição da chapa C_s, não como tendo lugar hoje, mas sim no futuro no momento t_s. O custo uniforme equivalente resultaria diferente mas as conclusões seriam as mesmas.

Somando aqueles custos, obtém-se, para cada valor de Δe, o custo uniforme total. O decremento económico da espessura Δe^* será, então, aquele a que corresponde o menor custo uniforme total.

A solução pode ser encontrada recorrendo-se a um método iterativo de cálculo. Vejamos um exemplo de aplicação.

Exemplo de aplicação

Suponhamos o caso de chapas do convés de um navio. A degradação da superfície processa-se de uma forma muito heterogénea, verificando-se zonas de maior incidência. No estado de nova, a chapa apresenta uma espessura de 10 mm, encontrando-se especificado que nenhum ponto da sua superfície deverá apresentar alguma vez uma espessura inferior a 6 mm. Do cadastro deste tipo de navios e face às condições de uso previsionais (ou resultante de ensaios laboratoriais), podemos estimar os valores dos parâmetros da expressão da degradação temporal (em meses) da espessura: $\alpha = 0,2$ e $\beta = 2$. O tempo médio durante o qual a pintura protege suficientemente a chapa, isto é, sem que se verifiquem sinais sensíveis de corrosão superficial, é de 6 meses. Cada operação de pintura será efectuada durante o tempo útil de exploração do navio (no mar e/ou no cais). Os custos estimados de cada pintura e de substituição geral das chapas são, respectiva e aproximadamente, 500 e 3.000 contos. A taxa mínima de rentabilidade real fixada pela empresa para investimentos de manutenção é 24% ano. Qual será o nº ideal de pinturas antes de uma substituição geral?

Representemos primeiramente o diagrama de *cash-flow*, supondo que o momento da análise coincide com o momento em que o navio deixa o estaleiro – no estado de novo ou após uma substituição geral das chapas – e (re)inicia a sua actividade.

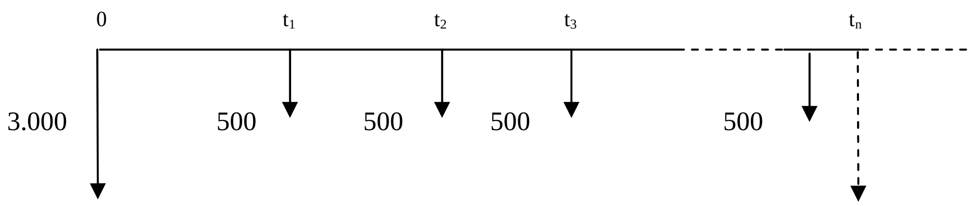

Figura 4 – Diagrama do cash-flow previsional

A análise deste problema não permite a representação do resultado por uma função contínua. O resultado tem de ser encontrado por tentativas ensaiando diversos valores possíveis do decremento da espessura Δe. Suponhamos variações discretas do decremento múltiplos de 0,1 mm. Teremos, então, de construir um quadro que nos dê o resultado do cálculo dos custos de pintura e de substituição para cada alternativa do decremento Δe. Como a espessura começa em 10 mm e pode reduzir-se até 6 mm, a quantidade de valores que o decremento Δe poderá assumir será, pois, 40 (de 0,1 até 4,0 mm). Suponhamos, também, que a função de degradação é retomada no ponto onde esta foi suspensa de cada vez que a chapa é limpa e repintada.

Calculemos os custos no caso de, por exemplo, $\Delta e = 0,5$ mm.

O momento t_1 é dado por: $t_1 = T + t_{01}$

A espessura e_1 é, por sua vez, dada por: $e_1 = e_0 - \Delta e$

Como: $e_1 = e_0 - \alpha .\ t_{01}^{\beta}$

Vem, que: $t_{01} = [(e_0 - e_1)/\alpha]^{1/\beta}$

Logo:

$e_1 = 10 - 0,5 = 9,5$ mm

$t_{01} = [(10 - 9,5)/0,2]^{1/2} = 1,58$ meses

$t_1 = 6 + 1,58 = 7,58$ meses

Prosseguindo, obtemos:

$e_2 = e_0 - 2.\Delta e$

$e_2 = 10 - 2 \times 0,5 = 9$ mm

$t_{12} = [(10 - 9)/0,2]^{1/2} = 2,24$ meses

$t_2 = 2 \times 6 + 2,24 = 14,24$ meses

E:

$e_3 = e_0 - 3.\Delta e$

$e_3 = 10 - 3 \times 0,5 = 8,5$ mm

$t_{23} = [(10 - 8,5)/0,2]^{1/2} = 2,74$ meses

$t_3 = 3 \times 6 + 2,74 = 20,74$ meses

Ou, num quadro:

Espessura (mm)	**Mês**
10	0
9,5	7,58
9	14,24
8,5	20,74
8	27,16
7,5	33,54
7	39,87
6,5	46,18
6	52,47

Obtemos, assim, os momentos, ou os meses a partir do estado de chapa nova, em que, previsionalmente, deverão ocorrer as pinturas (2ª coluna do quadro anterior). A substituição da chapa deverá ter lugar no momento t_s = 52,47 meses.

Calculemos agora os custos. Todavia, antes de prosseguirmos, temos de ter em atenção que a taxa de referência dada é uma taxa anual e real (já, portanto, ajustada da inflação) e, como a unidade temporal escolhida para esta análise é o mês, torna-se necessário calcular uma taxa de referência mensal i_p tal que, a taxa efectiva anual resulte igual àquela taxa dada.

A expressão aplicável é a seguinte:

$$i_p = (1 + i)^{1/f} - 1$$

em que: i_p - taxa correspondente à frequência de capitalização f;
i - taxa real correspondente a 1 ano de capitalização;
f - frequência de capitalização anual

Substituindo valores na expressão anterior, obtemos:

$$i_p = (1 + 0{,}24)^{1/12} - 1 = 1{,}81\%.\text{mês}$$

Vejamos, então, quais os custos uniformes das pinturas e da substituição da chapa:

Custo uniforme da substituição C_{us} (que terá lugar dentro de 52,47 meses):

$$C_{us} = 3.000 \times \overset{A/P;1,81;52,47}{(0{,}0297)} = 89{,}01 \text{ contos/mês}$$

Custo uniforme das pinturas C_{up}:

$$C_{up} = 500 \times [\overset{P/F;1,81;7,58}{(0{,}8730)} + \overset{P/F;1,81;14,24}{(0{,}7747)} + \overset{P/F;1,81;20,74}{(0{,}6895)} + \ldots + \overset{P/F;1,81;46,18}{(0{,}4370)}] \times \overset{A/P;1,81;52,47}{(0{,}0297)} =$$

$$C_{up} = 65{,}66 \text{ contos/mês}$$

Logo, o custo uniforme total será:

$$C_{ut} = C_{up} + C_{us} = 65{,}66 + 89{,}01 = 154{,}67 \text{ contos/mês}$$

Chegados a este ponto, temos de calcular o custo total de todas as outras alternativas de valores de Δe (múltiplos de 0,1 mm) para, finalmente, podermos saber a qual dos valores de Δe corresponde o menor daquele custo. Recorrendo a uma folha de cálculo, foi possível obter os resultados que se mostram de forma gráfica na Figura 5.

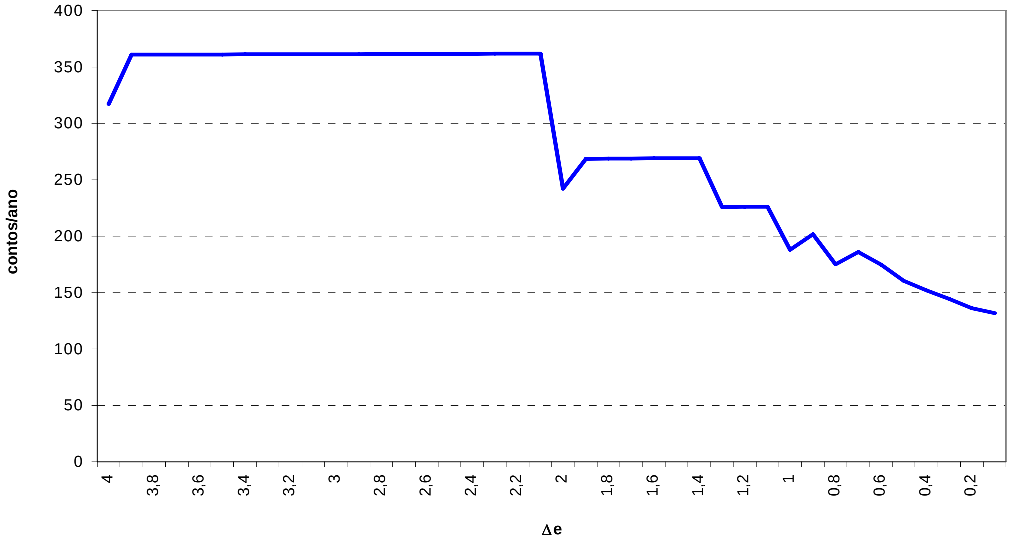

Figura 5 – Variação do custo uniforme total com decrementos decimais de Δe

Conforme podemos observar, o custo uniforme total vai sempre diminuindo e prolonga-se para além de Δe = 0,1 mm. Se aumentarmos a definição do decremento da espessura no intervalo [0,2 : 0,01], obtemos os resultados que se mostram na Figura 6.

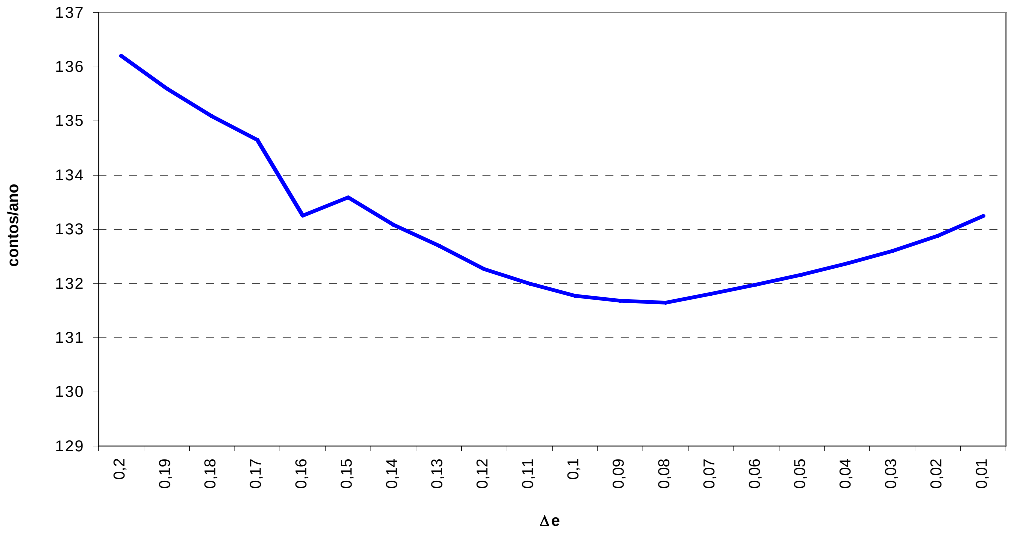

Figura 6 – Variação do custo uniforme total decrementos centesimais de Δe

Daqui se conclui que o decremento económico é $\Delta e^* = 0{,}08$ mm para um custo total de 168 contos/mês. Contudo, como valores do decremento inferiores a 0,5 mm são impossíveis de medir na prática, a opção deverá ser a mais próxima de 0,08 mm, ou seja, precisamente, $\Delta e = 0{,}5$ mm para um custo total de 220 contos/mês – o que representa um acréscimo de custo de (220 – 168)/168 x 100 = 30,5%.

Nas figuras 5 e 6, podemos notar que a curva do custo uniforme total apresenta alguns pontos de inflexão súbita. Estes devem-se ao facto de o nº de pinturas por unidade de tempo não variar de forma contínua ao longo da vida útil da chapa, pois a última operação de pintura tem sempre lugar quando se verifica que a espessura da chapa nesse momento é inferior a ($e_m + \Delta e$). Com efeito, se por exemplo, atentarmos no que se passa nos pontos: $\Delta e = 1{,}9$; 2,0; e 2,1 mm, verificamos o seguinte:

- Quando $\Delta e = 2{,}1$ mm, a primeira e única operação de pintura realizar-se-ia no momento 9,24 meses (quando a chapa tivesse atingido a espessura de 10 - 2,1 = 7,9 mm). O custo uniforme da única operação de pintura e o custo de substituição da chapa no momento 10,47 meses (quando tivesse atingido a espessura de 6 mm) seriam, respectivamente, 44,77 e 317,04 contos/mês;
- Quando $\Delta e = 2$ mm, a primeira e única operação de pintura realizar-se-ia no momento 9,16 meses (quando a chapa tivesse atingido a espessura de 10 - 2 = 8 mm). O custo uniforme da única operação de pintura e o custo de substituição da chapa no momento 16,47 meses (quando tivesse atingido a espessura de 6 mm) seriam, respectivamente, 30,01 e 212,23 contos/mês;
- Quando $\Delta e = 1{,}9$ mm, a primeira operação de pintura realizar-se-ia no momento 9,08 meses (quando a chapa tivesse atingido a espessura de 10 - 1,9 = 8,1 mm) e a segunda operação no momento 16,36 meses (quando a chapa tivesse atingido a espessura de 10 - 2 x 1,9 = 6,2 mm). O custo uniforme destas duas operações de pintura e o custo de substituição da chapa no momento 16,47 meses (quando tivesse atingido a espessura de 6 mm) seriam, respectivamente, 56,44 e 212,23 contos/mês;

Ou seja, enquanto que o custo uniforme de substituição da chapa se reduz progressivamente com o alongamento da vida útil, o custo das operações de pintura é influenciado pela variação do nº de pinturas por unidade de tempo e, logo, oscila. É interessante notar que, pelas mesmas razões, se verificam ainda outros quatro pontos singulares, que são: $\Delta e = 0{,}8$, 1,0, 2,0 e 4,0 mm.

Podemos completar a análise, determinando quais os valores óptimos assumidos pelo decremento da espessura quando se faz variar o custo da pintura. Conforme seria de esperar, tendo em conta a forma convexa da curva do custo uniforme total, o segmento direito do arco vai subindo progressivamente até que, quando o custo por operação de pintura atinge o valor aproximado de 1.750 contos, o ponto mínimo da curva passa-se para o segmento esquerdo correspondente ao decremento 4,0 mm (ver a Figura 7 adiante). Neste ponto, chegar-se-ia à conclusão de que não era económico proceder a quaisquer operações de pintura e que se deveria simplesmente substituir a chapa quando esta atingisse a espessura limite mínima.

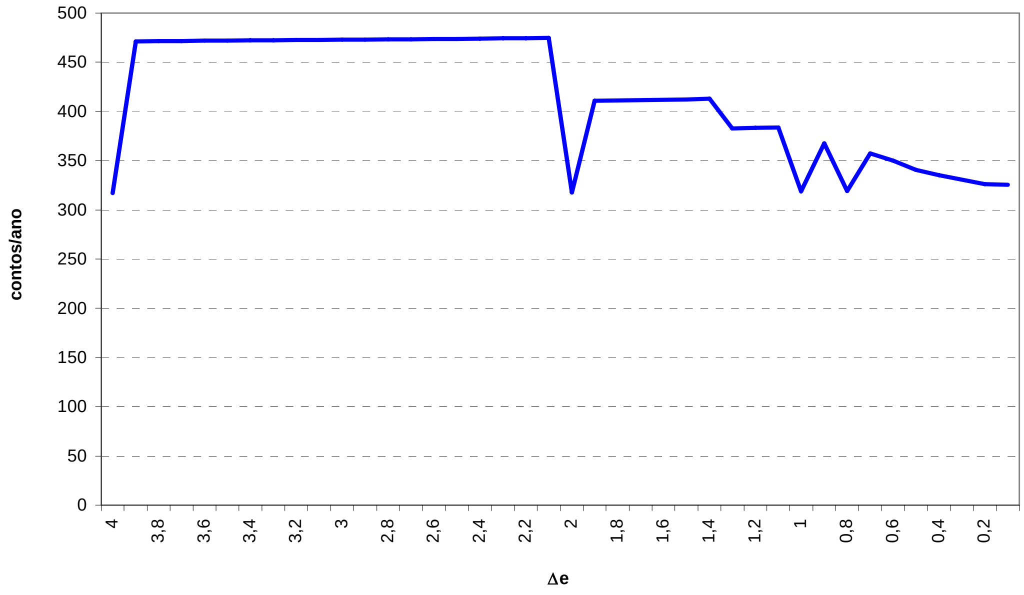

Figura 7 – Variação do custo uniforme total com decrementos decimais de Δe quando o custo da pintura cresce até 1.750 contos

Conclusões

Embora conceptualmente simples, pois foram usados apenas os conceitos matemáticos de função de degradação, conversão financeira, taxa de juro e optimização, os cálculos revelaram-se extensos e algo complexos, aconselhando o recurso ao cálculo automático, por exemplo, numa folha de cálculo – hoje ao alcance de qualquer técnico ou gestor.

De notar que partimos do princípio de que a função de degradação seria retomada no ponto onde esta tinha sido suspensa de cada vez que a chapa é limpa e pintada. Poderá, todavia, não ser sempre esta a situação real. Não foi nossa intenção enveredar por considerações desta natureza, mas tão somente, demonstrar a utilidade de combinar as funções descritoras de fenómenos físicos do domínio da Engenharia, com funções de análise financeira, completando, assim, aquilo que poderemos apelidar, com propriedade, de "análise técnico-económica". A procura de soluções nesta óptica constitui, em contexto de recursos escassos, uma prática obviamente necessária.

O caso tratado neste artigo permite destacar como as ferramentas de análise financeira podem completar as decisões em Engenharia. Com efeito, não parece evidente que qualquer regra empírica pudesse substituir o método que utilizámos na sua resolução. Com uma vantagem: o método permite generalização e, assim, o momento da análise poderá ser qualquer um e não apenas o correspondente ao estado de novo – como foi o caso visto atrás. Ou seja, se construirmos um pequeno programa em computador, em qualquer momento que se efectue uma medição da espessura da chapa, o seu valor poderá ser nele introduzido e obteremos a previsão de quanto tempo resta até procedermos à próxima operação de pintura.

Bibliografia relacionada

- ASSIS, Rui, - *Manutenção Centrada na Fiabilidade – Economia das Decisões*, Lisboa, LIDEL, 1997
- CANADA, John R., William Sullivan, John A. White, *Capital Investment Analysis for Engineering and Management*, Prentice Hall, Inc., New Jersey 1996
- THUESEN, Fabrycky, *Engineering Economy*, Prentice-Hall International Editions, 1989

Rui Assis
rassis@netcabo.pt
Setembro 1999