

# ESTUDO DA FISSURAÇÃO DAS CAIXAS REDUTORAS DAS LOCOMOTIVAS DA SÉRIE 2600

Morgado\*, T. L. M.; Branco\*\*, C.M.; Infante\*\*\*, V.

\* Equiparada a Professora Adjunta, ESTA-IPT, Abrantes – Portugal.

\*\* Professor Catedrático, IST-UTL, Lisboa – Portugal.

\*\*\*Professora Auxiliar, IST-UTL, Lisboa – Portugal.



## RESUMO

*Este artigo apresenta os resultados obtidos no estudo das causas de fissuração, da excessiva vibração e desgaste em serviço verificado nas caixas redutoras das locomotivas da CP da série 2600. Neste trabalho é proposto um conjunto de recomendações destinadas a eliminar ou reduzir o problema do surgimento de fissuração. As fissuras neste componente surgem em duas partes distintas: na zona superior da tampa da caixa redutora e na zona central frontal do corpo da caixa redutora. Para a realização deste trabalho foram obtidos dados em serviço, em duas viagens de rotina destas locomotivas, respectivamente no comboio Intercidades de passageiros Lisboa-Porto com velocidade máxima de 160 km/hora, e num comboio de mercadorias Entroncamento-Guarda, com uma velocidade máxima prevista de 120Km/hora.*

## 1. INTRODUÇÃO

Uma análise de falha dum componente ou estrutura deve levar à determinação da sua causa primária, para que se possa, com base nessa determinação iniciar acções preventivas ou correctivas em eventuais casos similares.

Para uma correcta análise da falha, a informação recolhida e/ou determinada deve ser sistematizada tendo em atenção os factores básicos envolvidos, como:

- 1 Geometria do componente
- 2 Caracterização mecânica, química e metalográfica do material
- 3 Modo de processamento e fabrico do componente
- 4 Condições mecânicas e ambientais de

serviço

- 5 Estado de tensão
- 6 Caracterização da fissura
- 7 Observações macro e micro fractográfica.

Os factores envolvidos devem ser agrupados em:

- 1 Caracterização do componente e historial das condições de fabricação e das condições mecânicas e ambientais de serviço (ou seja registos prévios sobre o projecto, o material e o serviço);
- 2 Determinações efectuadas após a fractura (com incidência sobre a zona de ocorrência e nas condições específicas de serviço no momento da falha).

Os elementos do primeiro grupo incluem

a descrição do componente (acompanhada de desenhos do projecto), suas funções, especificação mecânica, química e microestrutural do material, processo de fabrico e tratamentos, condições mecânicas e ambientais de serviço incluindo registo de ocorrências verificadas, inspecções, reparações, condições de trabalho no momento da falha, etc..

Neste artigo é descrito o procedimento e apresentado os resultados obtidos em dois estudos encomendados à divisão de fractura da SPM referentes, respectivamente, à medição das solicitações e deslocamentos em serviço nas caixas reductoras das locomotivas da CP da série 2600 (adjudicado pela EMEF), e medição dos esforços nos apoios e acelerações em serviço nas mesmas caixas (adjudicado pela UMAT/CP) (*Moura Branco, Abril 2002*).

Para a realização deste trabalho efectuaram-se as seguintes tarefas:

- 1 Avaliação das características mecânicas dos aços da tampa e do corpo da caixa, e determinação dos módulos de elasticidade desses aços;
- 2 Medição das extensões em serviço no corpo e tampa da caixa, usando extensómetros eléctricos do tipo roseta colados em algumas zonas mais críticas destes elementos, aonde se tem vindo a detectar fissurações;
- 3 Medição da força axial em serviço nos comboios, com uma célula de carga, fornecida pela CP e montado no engate entre a locomotiva e a primeira carruagem ou vagão;
- 4 Medição das velocidades dos comboios

ao longo dos percursos;

- 5 Medição dos deslocamentos verticais nos dois rodados da frente da locomotiva (esquerdo e direito) ao longo dos percursos;
- 6 Medição das acelerações no corpo da caixa, para a determinação de forças e binários na caixa reductora;
- 7 Cálculo dos esforços nos apoios mais solicitados da caixa reductora;
- 8 Previsão dos danos de vida de fadiga nas várias localizações críticas da fissuração;
- 9 Conclusões finais e recomendações.

## 2. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DA CAIXA REDUTORA

A caixa reductora (fig.1) é de construção soldada, em que o corpo da caixa é um aço estrutural de baixo teor de carbono, com 8 mm de espessura, segundo a especificação ARMCO (ST22-3), e o aço da tampa é também um aço estrutural com baixo teor de carbono, mas com a especificação ST37-2. Na tabela 1 estão indicadas as composições químicas em peso destes dois aços, determinadas em amostras retiradas de uma das caixas reductoras.

Da análise dos dados apresentados na tabela 1 verifica-se que o teor de carbono é mais baixo no corpo da caixa reductora do que o da tampa da caixa reductora, mas tem uma maior quantidade de elementos de liga o que faz aumentar o carbono equivalente (0.26% para o corpo e 0.20% para a tampa).

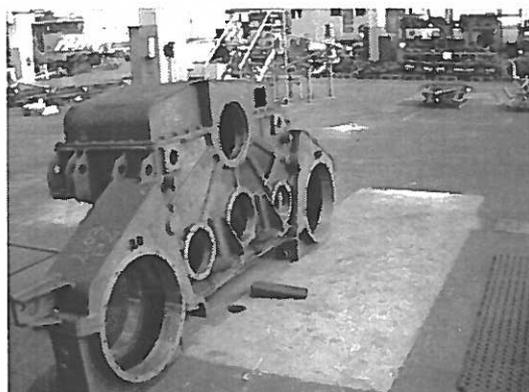


Fig. 1 - Vista frontal da caixa reductora.

**Tabela 1** - Composição química dos aços da tampa e do corpo da caixa redutora.

Elemento	Tampa (5mm de espessura)	Corpo da caixa (8 mm de espessura)
Carbono (C)	0.16	0.14
Manganês (Mn)	0.49	0.77
Fósforo (P)	0.02	0.02
Enxofre (S)	0.02	0.02
Silício (Si)	0.01	0.22
Cobre (Cu)	0.007	0.03
Níquel (Ni)	0.02	0.02
Crómio (Cr)	0.01	0.01
Molibdénio (Mb)	0.008	0.01
Vanádio (V)	<0.002	0.003
Ferro (Fe)	Aprox. restante	Aprox. restante

Determinaram-se também as durezas Vickers nestes dois componentes. Neste procedimento aplicou-se uma carga de 5 Kgf durante 15 segundos em amostras dos dois aços previamente polidas. O equipamento utilizado foi o macrodurómetro MITUTOYO AVK C-2 com leitura digital do Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM) do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa (IST-UTL). Os valores médios obtidos para dez indentações feitas em cada aço, deram os seguintes resultados:

- 1 Corpo da caixa (8mm):  $163 \pm 7$ ;
- 2 Tampa da caixa (5mm):  $147 \pm 1$ .

Verifica-se que para o corpo da caixa, a dureza é mais elevada do que seria de esperar atendendo ao valor mais elevado do carbono equivalente. No entanto o aço ao carbono da caixa apresenta maior variabilidade nos valores de dureza, o que indica menor homogeneidade do material

neste componente.

Determinou-se o módulo de elasticidade, E, e o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , recorrendo à máquina servohidráulica DARTEC do LEM do IST onde os ensaios tracção em provetes normalizados segundo a norma ASTM E-8 (ASTM, 1992), retirados da tampa e do corpo da caixa redutora, foram realizados, com um carregamento incremental no domínio elástico. Os provetes foram instrumentados com dois extensómetros longitudinais e dois transversais, montados em ponte completa. Em cada ensaio registaram-se seis leituras (correspondentes aos seis carregamentos) das extensões lidas numa ponte estática de extensometria VISHAY. Verifica-se que o valor do coeficiente de Poisson é bastante próximo para os dois materiais ( $\nu_{\text{tampa}} = 0.28$  e  $\nu_{\text{corpo}} = 0.29$ ), mas o módulo de elasticidade obtido para o aço do corpo da caixa ( $E_{\text{corpo}} = 198\text{GPa}$ ) é cerca de 10% menor do que o módulo de elasticidade do

aço da tampa da caixa redutora ( $E_{\text{tampa}} = 218\text{GPa}$ ).

Realizaram-se também ensaios de tracção até à rotura seguindo também a norma ASTM E-80. Nestes ensaios utilizou-se a máquina servohidráulica referida no parágrafo anterior e as extensões foram continuamente monitorizadas até à rotura, usando um extensómetro axial directamente acoplado ao provete, com

comprimento de deformação  $l_0 = 25\text{mm}$ . Obtiveram-se assim as curvas tensão-extensão nominais até à rotura e os valores da tabela 2. Nesta tabela pode-se observar que existe uma maior dispersão de resultados para o aço do corpo da caixa redutora, o aço da tampa da caixa é mais resistente que o aço do corpo da caixa e, a ductilidade deste aço é bastante menor do que o aço da tampa.

**Tabela 2** – Valores da tensão de cedência, resistência à tracção e alongamento de rotura dos aços da caixa.

	$\sigma_{\text{ced}}$ [MPa]	$\sigma_R$ [MPa]	$\epsilon_R$
Corpo da caixa redutora (ensaio 1)	312.7	424.3	0.13
Corpo da caixa redutora (ensaio 2)	272.4	425.2	0.10
Tampa da caixa redutora (ensaio 1)	339.7	469.8	0.39
Tampa da caixa redutora (ensaio 2)	347.1	407.6	0.31

### 3. METODOLOGIAS E INSTRUMENTAÇÃO

Neste trabalho foram coladas 9 rosetas a  $45^\circ$  (3 extensómetros) nas seguintes posições:

- 1 A roseta 1 na zona central da tampa da caixa para medir as tensões na tampa;
- 2 A roseta 2 na zona afastada dos cordões de soldadura, no corpo da caixa, para medir as tensões nominais;
- 3 A 3 roseta foi colada junto ao pé do cordão de soldadura do disco de reforço inferior da caixa, local onde surgiram fissuras de fadiga;
- 4 As rosetas 4, 5, 6, 7, 8, 9 foram coladas nos seis apoios para determinar as forças de reacção (fig. 2).

Utilizaram-se os mesmos procedimentos de preparação de superfície, colagem de

extensómetros e ligações referidas em (Moura Branco, Janeiro 2002).

A recolha de dados foi feita com um PC portátil e com o sistema de processamento HPVEE para tratamento e análise de sinais.

Foram, também instrumentados os dois tirantes da locomotiva, localizados na parte inferior da estrutura, com dois extensómetros lineares cada um, com 5mm de comprimento de deformação e  $120\Omega$  de resistência. Os extensómetros foram colados na direcção longitudinal e sensivelmente a meia distância entre as articulações dos tirantes (fig.3). Os extensómetros 1 e 3 foram colados nas faces superiores dos tirantes, e os extensómetros 2 e 4 nas faces inferiores opostas. Utilizou-se a mesma instrumentação e procedimento de recolha de sinal que os extensómetros roseta.

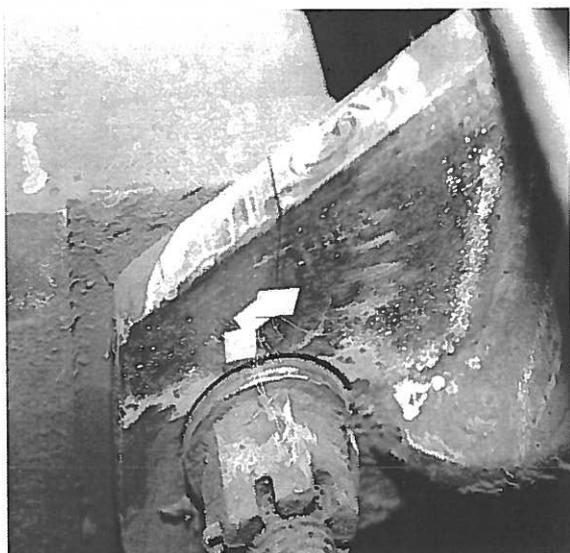


Fig. 2 - Fotografia da roseta 6.

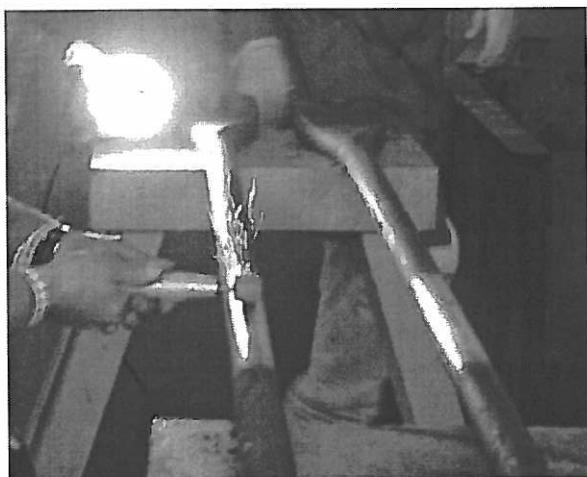


Fig. 3 - Preparação dos tirantes para instrumentação.

A força de tracção axial na locomotiva, foi medida com uma célula de carga da CP, montada entre a locomotiva e a primeira carruagem ou vagão. Esta célula de carga foi previamente calibrada no LEM do IST-UTL. A captação e o tratamento de sinais, na forma de espectros de extensão, foi também realizado pela ponte de extensómetros e pelo sistema HPVEE.

Montaram-se dois transdutores do tipo LVDT para medir os deslocamentos verticais do rodado dianteiro da locomotiva. Um dos transdutores foi também fornecido pela CP. O curso dos transdutores é de 100mm. Os sinais destes foram lidos em dois canais de um conversor-amplificador de sinal separado da ponte de extensometria dinâmica. Estes transdutores também foram previamente calibrados no LEM.

As acelerações na caixa redutora foram medidas com três acelerómetros fixados ao corpo da caixa num ponto situado na parte superior da superfície frontal vertical do corpo da caixa. Os três acelerómetros foram orientados segundo x, y e z, montados nas três faces de um cubo que foi fixado à estrutura (fig. 4). Os sinais das acelerações foram introduzidos num conversor-amplificador exclusivo dos acelerómetros. Os espectros das acelerações foram obtidos e analisados através da placa de aquisição e do PC portátil.

Obtiveram-se as velocidades dos comboios durante toda a viagem através do velocímetro da CP. Os sinais foram lidos na ponte de extensometria e recolhidos no PC.

Os dados foram obtidos em serviço, no comboio Intercidades de passageiros Lisboa-Porto, com uma velocidade máxima de 160 km/h (tabela 3) e no comboio de mercadorias Entroncamento-Guarda, com uma velocidade máxima de 120 km/h (tabela 4). A programação das leituras das rosetas foi feita de modo a obter a melhor informação comparativa possível, seleccionando os troços considerados *a priori*, os mais críticos.

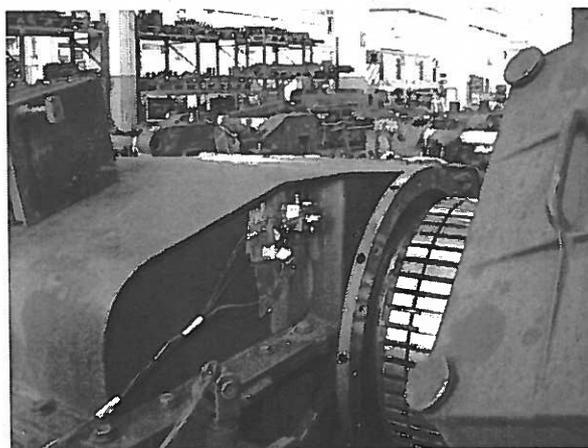


Fig. 4 - Fotografia da montagem dos três acelerómetros.

## 4. ANÁLISE DE ESPECTROS

### 4.1 Análise de extensões e tensões

Após a aquisição experimentalmente dos espectros das rosetas obtiveram-se os espectros das tensões recorrendo às equações 1 e 2 (Moura Branco, 1999):

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left( \frac{(\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{1+\nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + (-\sigma_1)^2} \quad (2)$$

sendo  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $\varepsilon_c$ , as extensões máxima, intermédia e mínima, respectivamente.

Após a análise dos espectros obtidos para cada roseta, verificou-se que as extensões na tampa (roseta 1) têm valores de compressão significativos enquanto que no corpo da caixa predominam as tensões nominais de tracção, e que as tensões no comboio de mercadorias são de uma forma geral mais elevadas do que no comboio Intercidades. Optou-se pelas extensões da roseta 7 para o cálculo da reacção no apoio, por serem as mais significativas.

Admitindo que a caixa redutora funciona de uma forma equilibrada, a reacção máxima no apoio da roseta 6, simétrico ao da roseta 7, deveria dar o mesmo valor do que a roseta 7. Porém, este facto não se verifica experimentalmente.

As causas possíveis para este facto são: desnivelamento da caixa redutora, desalinhamento do veio de transmissão e/ou desgaste nos apoios dos veios da caixa.

Os espectros das extensões dos tirantes

revelaram que:

- 1 Não há diferenças significativas entre as extensões medidas nas faces superior e inferior da secção do tirante, o que indicam que trabalham com um alinhamento satisfatório.
- 2 Os valores das extensões medidas foram bastantes baixos.
- 3 No comboio de mercadorias existe alguma desigualdade de distribuição de esforço nos dois tirantes.

#### 4.2 Análise de velocidades e de esforços

Dos perfis das velocidades verificou-se que o comboio Intercidades não apresenta irregularidades significativas nas velocidades (fig. 5) mas o comboio de mercadorias apresenta perfis de velocidades irregulares (fig. 6), que podem traduzir o estado da linha e as condições de tracção.

No ensaio de esforço verificou-se que a velocidade variou de uma maneira razoavelmente uniforme, de 0 até 30 km/h em cerca de 90s, sem escorregamento e que o comboio demorou cerca de 60 segundos a arrancar.

Na figura 7 está representado os esforços axiais medidos pela célula de carga da CP. Os valores mais elevados foram obtidos no ensaio de esforço e estão representados na figura 8.

**Tabela 3** - Sequência das leituras dos dados colhidos no comboio Intercidades Lisboa-Porto

Instrumentação	1ª Leitura Lisboa Entronc.	2ª Leitura Entronc. Fátima	3ª Leitura Fátima Pombal	4ª Leitura Pombal Alfarelos	5ª Leitura Alfarelos CoimbraB	6ª Leitura CoimbraB Pampilhosa	7ª Leitura Pampilhosa Aveiro
Barra de tracção1	XX	XX				XX	
Barra de tracção2	XX						
LVDT's 1	X	X	X	X	X	X	X
LVDT's 2	X	X	X	X	X	X	
1 célula de carga	X	X				X	X
Acelerometro1	X	X	X	X	X	X	X
Acelerometro2	X	X	X	X	X	X	X
Acelerometro3	X	X	X	X	X	X	X
Velocimetro	X	X	X	X	X	X	
Roseta 1 (1,2,3)							
Roseta 2(4,5,6)			X	X			
Roseta 3(7,8,9)							
Roseta 4(10,11,12)							
Roseta 5 (13, 14, 15)			X				X
Roseta 6 (16, 17, 18)						X	
Roseta 7 (19, 20, 21)		X				X	
Roseta 8 (22,23,24)				X	X		
Roseta 9 (25,26,27)							

Tabela 4 – Sequência das leituras dos dados colhidos no comboio de mercadorias Entroncamento-Guarda

Instrum.	1ª Leitura Mortágua [Km73.5] [Km78.5]	2ª Leitura [Km84] (ensaio de esforço)	3ª Leitura StaComba Dão [Km85.5] Castelejo [Km89.7]	4ª Leitura Castelejo [km89.7] Oliveirinha [Km102.4]	5ª Leitura Oliveirinha [Km102.4] Nelas [Km117.2]	6ª Leitura Mangualde [Km128.5] Contenças [Km133.8]	7ª Leitura Contenças [Km133.8] Abrunhosa [Km139.9]	8ª Leitura Abrunhosa [Km 139.9] Gouveia [Km 144.2]	9ª Leitura Gouveia [Km144.2] Fornos [Km152.2]
Barra de tracção1		X	X	X		X			X
Barra de tracção2		X	X			X			X
LVDT's 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
LVDT's 2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1 célula de carga		X	X	X		X			X
Acel. 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Acel. 2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Acel. 3	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Veloc.	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Roseta 1 (1,2,3)	X							X	
Roseta 2 (4,5,6)	X				X			X	
Roseta 3 (7,8,9)	X							X	
Roseta 4 (10,11,12)					X		X		
Roseta 5 (13, 14, 15)					X		X		
Roseta 6 (16, 17, 18)				X		X			
Roseta 7 (19, 20, 21)				X		X			
Roseta 8 (22, 23, 24)									
Roseta 9 (25, 26, 27)		X	X						X

Comboio Intercidades Lisboa - Porto  
(Troço Lisboa-Entroncamento)

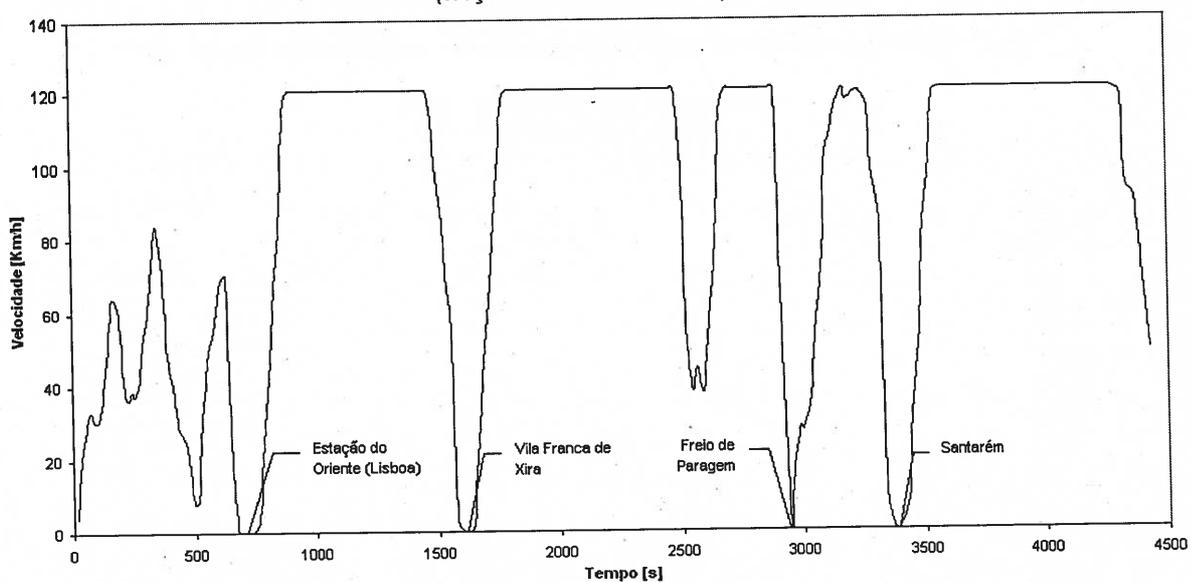
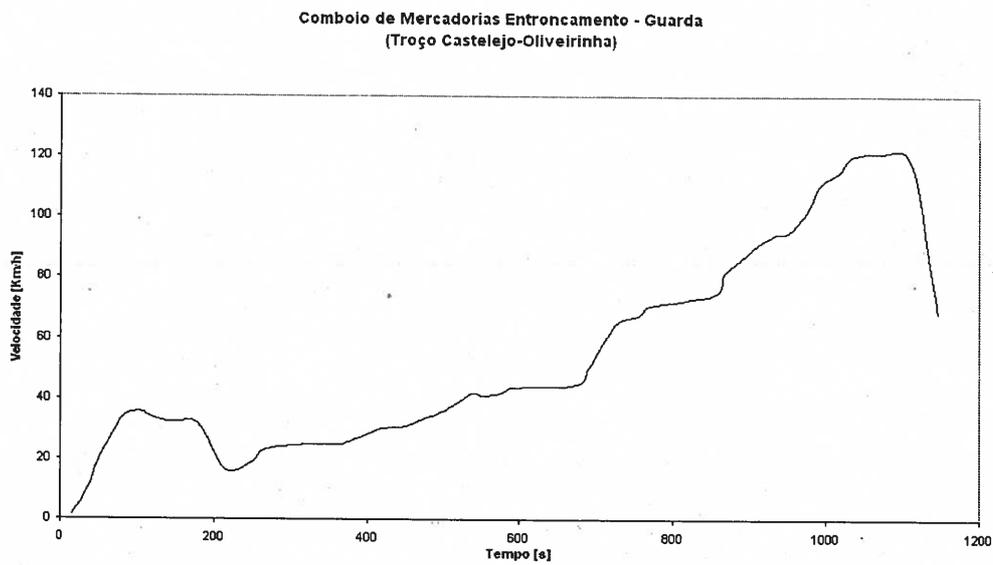
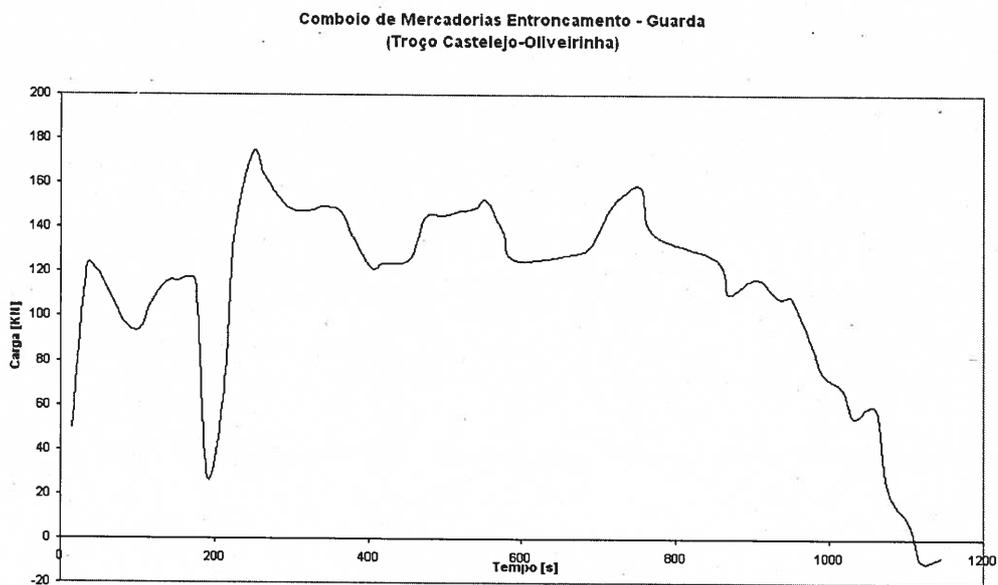


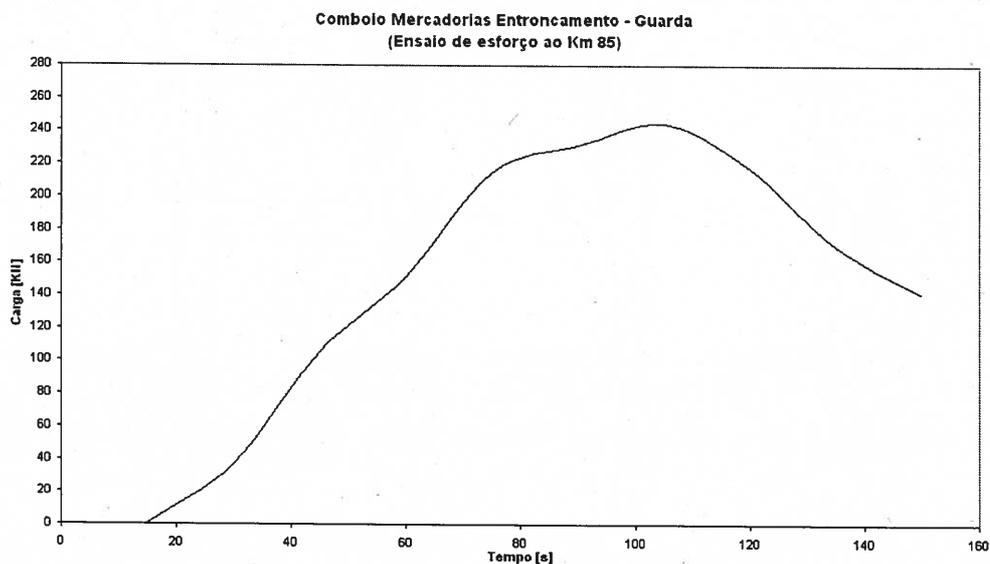
Fig. 5 - Velocidade ao longo do tempo do comboio Intercidades no troço Lisboa Entroncamento.



**Fig. 6 -** Variação da velocidade ao longo do tempo do comboio de mercadorias no troço Castelejo Oliveirinha.



**Fig. 7 -** Variação do esforço axial ao longo do tempo no troço Castelejo-Oliveirinha.



**Fig. 8 -** Variação do esforço axial ao longo do tempo no ensaio de esforço realizado no comboio de mercadorias.

### 4.3 Análise dos deslocamentos nos rodados com os transdutores LVDT

Da análise dos espectros deslocamentos verticais versus tempo pode-se observar o seguinte:

- 1 No comboio de mercadorias, em todas as leituras verificaram-se deslocamentos superiores a 5 mm e os valores de pico são significativamente mais elevados do que no comboio Intercidades (fig. 9).
- 2 A frequência do sinal dos deslocamentos no comboio de mercadorias é bastante mais elevada que no Intercidades, com grandes oscilações a ocorrerem em pequenos intervalos de tempo.
- 3 Em todas as leituras do comboio de mercadorias, o transdutor do lado direito deu deslocamentos com sentido predominantemente negativos, enquanto que no lado esquerdo, os deslocamentos apresentam sentidos predominantemente positivos.

### 4.4 Análise das forças de inércia

As forças de inércia foram calculadas com base nos espectros obtidos pelos acelerómetros da figura 4, nos troços indicados nas tabelas 3 e 4. Usou-se a componente da aceleração na direcção do eixo normal à superfície frontal da caixa, que é o mais importante. O valor da massa usada nos cálculos foi de 27105 kg.

O comboio Intercidades apresenta uma

variação em termos de picos de forças de inércia de um factor de 8 vezes entre as forças de inércia mais elevadas (fig. 10) e as forças de inércia mais baixas. O comboio de mercadorias apresenta valores mais uniformes ao longo do percurso, com um factor próximo dos 4.5 vezes entre as forças maiores e as menores. Estas variações e os valores tão elevados poderão ser reduzidos por modificação do sistema de apoios da caixa e da distribuição das massas.

Em ambos os comboios, as variações de aceleração ao longo do tempo são muito significativas o que traduz o comportamento do accionamento, visto que a aceleração mais importante está a ser medida na direcção do eixo de transmissão do motor.

## 5. SIMULAÇÃO NÚMERICA

### 5.1 Cálculo das reacções nos apoios

Uma vez que, em funcionamento, a carga no apoio (apoió onde foi colada a roseta 7) é giratória em função do tempo, admitiu-se que a direcção da resultante da reacção terá valores passíveis de ocorrer com uma direcção  $\theta$ , a variar no plano de articulação do apoio. Deste modo, recorrendo ao método dos elementos finitos, determinou-se a reacção, R, (força resultante no olhal), de 30 em 30 graus e para o ângulo da direcção da tensão principal, 22.73°.

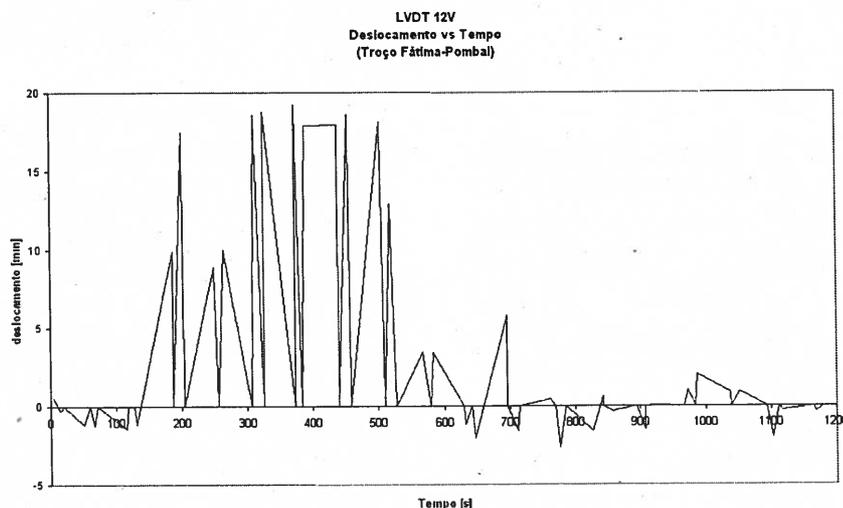


Fig. 9 - Gráfico do deslocamento versus tempo medidos no LVDT de 12V.

Forças de Inércia  
Troço Pampilhosa-Aveiro  
Comboio Intercidades

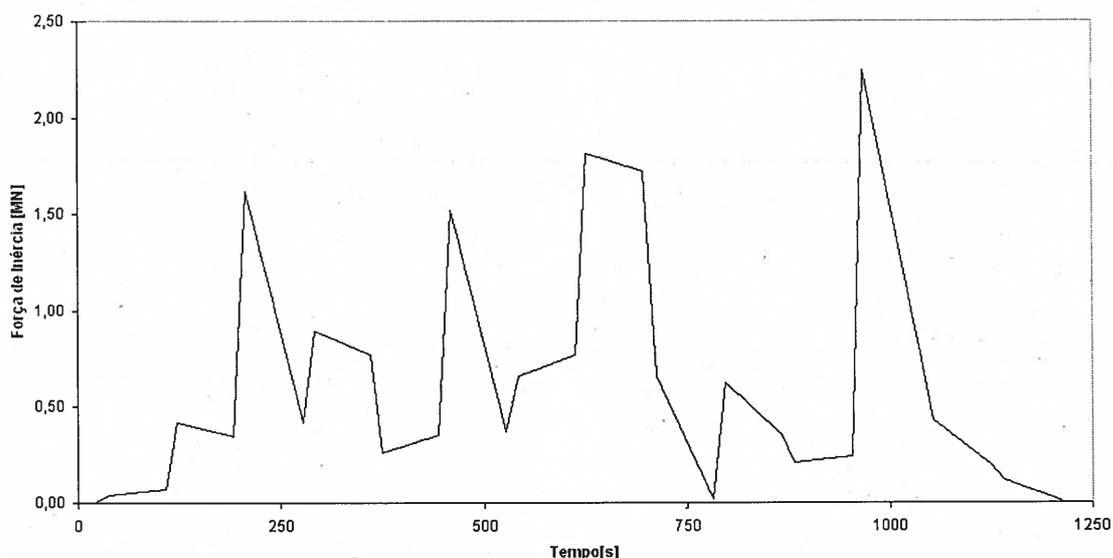


Fig. 10 - Gráfico da variação da força de inércia no troço que apresenta valores mais elevados.

Para determinar a força de reacção na cavilha admitiu-se que esta seria a resultante de uma pressão  $p$  uniformemente distribuída ao longo da superfície de contacto do furo com a cavilha, cuja área é dada pela relação,

$$A = 2\pi r l \quad (3)$$

em que  $r$ , representa o raio do furo e  $l$ , representa a espessura de um olhal na direcção perpendicular ao papel. Deste modo, a reacção  $R$ , no olhal é dada pela equação 4.

$$R = Ap \quad (4)$$

Os valores de  $R$  foram determinados com uma análise por elementos finitos 2D da zona do detalhe, utilizando o código ANSYS com elementos isoparamétricos planos. Como condições fronteira considerou-se o apoio encastrado em relação a toda a restante estrutura da caixa.

A figura 11 mostra a rede de elementos finitos utilizada. A malha é constituída por 730 elementos, 1952 nós e 3904 graus de liberdade.

A metodologia utilizada para calcular a pressão foi a de incrementar a pressão uniforme no bordo até o programa apresentar na zona onde foi colado o extensómetro, valores da tensão principal,  $\sigma_1$ , e da tensão equivalente,  $\sigma_{eq}$ , iguais aos valores de pico referentes ao diagrama de frequências de tensão de fadiga.

Todos os ângulos foram marcados no sentido directo como mostra a tabela 5. Nesta tabela também estão indicados os valores da reacção  $R$ , para cada posição angular, e para os valores medidos de  $\sigma_1$  e de  $\sigma_{eq}$ .

Analisando estes resultados, verifica-se que os valores da força de reacção a considerar são valores mínimos, que são sensivelmente independentes de  $\theta$  para ângulos até  $60^\circ$ , o que corresponde à gama de valores aonde pertence o ângulo de  $22.73^\circ$ . Pode-se concluir que os valores significativos da reacção no apoio da roseta 7 estarão entre os 220KN e 230KN. Este valor de esforço no apoio é bastante elevado, e define o pico da reacção no apoio mais solicitado na caixa redutora.

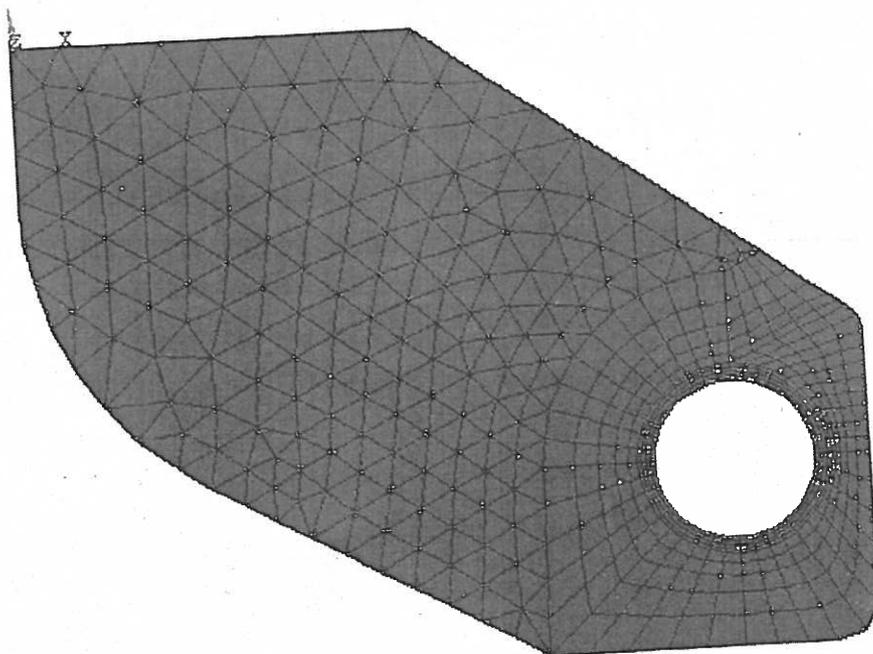


Fig. 11 - Malha de elementos finitos.

Tabela 5 - Valores calculados para a reacção nos apoios laterais

Ângulo [°]	Posição	Critério	Força [N]
90	↑	$\sigma_1$	330606
90		$\sigma_{eq}$	225679
270	↓	$\sigma_1$	572320
270		$\sigma_{eq}$	239132
0	→	$\sigma_1$	248472
0		$\sigma_{eq}$	241443
180	←	$\sigma_1$	(tensão=0)
180		$\sigma_{eq}$	301804
45	↗	$\sigma_1$	234861
45		$\sigma_{eq}$	212733
225	↘	$\sigma_1$	(tensão=0)
225		$\sigma_{eq}$	212733
135	↖	$\sigma_1$	(tensão=0)
135		$\sigma_{eq}$	260771
315	↙	$\sigma_1$	327298
315		$\sigma_{eq}$	260771
30	↗	$\sigma_1$	232342
30		$\sigma_{eq}$	219392
60	↗	$\sigma_1$	250321
60		$\sigma_{eq}$	213219
120	↗	$\sigma_1$	619150
120		$\sigma_{eq}$	252854
150	↖	$\sigma_1$	(tensão=0)
150		$\sigma_{eq}$	263330
210	↖	$\sigma_1$	(tensão=0)
210		$\sigma_{eq}$	219392
240	↘	$\sigma_1$	(tensão=0)
240		$\sigma_{eq}$	213219
300	↘	$\sigma_1$	377126
300		$\sigma_{eq}$	252854
330	↗	$\sigma_1$	294909
330		$\sigma_{eq}$	263330
22.73	↗	$\sigma_1$	231423
22.73		$\sigma_{eq}$	221790

## 6. ANÁLISE DO DANO DE FADIGA E PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA

Os danos de fadiga foram calculados considerando o modelo linear de acumulação de dano com a regra de Miner. Como a tensão média não é constante nos ciclos de fadiga fez-se o cálculo do dano ciclo a ciclo. A sequência de cálculo foi a seguinte:

- 1 Recorreu-se ao método das rampas decrescentes para a contagem dos ciclos, e procedeu-se, considerando o critério da tensão principal máxima e o critério da tensão equivalente, ao cálculo da gama de tensões, da amplitude de tensões da razão de tensões e da tensão média, recorrendo às respectivas fórmulas:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (5)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (7)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (8)$$

2 Construiu-se a curva de fadiga S-N aplicando uma regressão linear aos resultados obtidos e obteve-se a relação:

$$\Delta\sigma_{R=0} = \frac{1055.6}{N_R^{0.164}} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

3 Determinou-se o dano roseta a roseta da seguinte forma:

a) Calculou-se a tensão limite de fadiga considerando:

- $\sigma_R = 425 \text{ MPa}$
- $N = 1 \times 10^6$  ciclos, determinou-se  $\sigma_{\max(R=0)}$  através da equação 9 e substituiu-se esse valor na equação 10

$$\sigma_{\max R=0} \left[ \frac{1}{\sigma_{f0}} \left( \frac{1-0.05}{2} \right) + \left( \frac{1+0.05}{2} \right) \frac{1}{\sigma_r} \right] = 1 \quad (10)$$

b) Ciclo a ciclo calculou-se a tensão máxima (para cada R) considerando o critério de Goodman (*Radaj, 1994*):

$$\sigma_{\max R} \left[ \frac{1}{\sigma_{f0}} \left( \frac{1-R}{2} \right) + \left( \frac{1+R}{2} \right) \frac{1}{\sigma_r} \right] = 1 \quad (11)$$

c) Recalculou-se ciclo a ciclo o nº de ciclos recorrendo novamente à equação 9 e calculou-se o dano através da equação 12:

$$DANO = \frac{n}{N} = \frac{1}{N} \quad (12)$$

Os resultados do dano de fadiga foram obtidos para um nível de truncatura para uma tensão máxima no ciclo de fadiga igual a 50MPa, o que corresponde a uma vida de fadiga de  $10^8$  ciclos, entrando com a equação da curva S-N dos aços. Este nível de truncatura significa que os ciclos com

tensões máximas inferiores a 50MPa não causam danos de fadiga. Esta hipótese é justificada pelo cálculo do número de ciclos de fadiga da caixa para uma vida útil de 25 anos, que se apresenta a seguir:

4 Vida útil da estrutura, em Ciclos

4.1- Frequência média dos ciclos de fadiga: 0.6Hz

4.2- Tempo de serviço da estrutura [s]:

25 Anos x 300 dias =  $3.24 \times 10^8$  segundos

Então a vida útil da estrutura em ciclos de fadiga será dada por

$3.24 \times 10^8 \times 0.6\text{Hz} = 1.944 \times 10^8$  ciclos

Os resultados dos danos por viagem calculados para o comboio Intercidades e de mercadorias indicam valores mais elevados de dano para a roseta 2 e para a roseta 7, como se esperava. Nas situações comparáveis, os resultados indicam valores mais elevados de dano para o comboio de mercadorias (roseta 7).

Os valores calculados de dano são muito próximos para o critério da tensão equivalente e para o critério da tensão principal máxima.

Admitindo o critério de dano igual a 1 para a situação de início de fissuração, podem calcular-se o número de viagens críticas para os casos de maior dano/viagem:

1 Comboio Intercidades (4 viagens/dia)

Roseta 2; leituras 3 e 4

35168 viagens = 29.3 anos

Rosetas 6 e 7; leituras 2 e 6

31045 viagens = 25.8 anos

2 Comboio de mercadorias (2 viagens/dia)

Roseta 2; leituras 1, 5 e 8

27647 viagens = 46.1 anos

Rosetas 6 e 7; leituras 4 e 6

4042 viagens = 6.74 anos

Estes valores de tempo de serviço são próximos dos tempos a partir dos quais começaram a surgir os danos críticos de

fissuração de fadiga nas caixas. A situação é mais severa para as zonas dos apoios.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dos valores das reacções nos apoios e do comportamento à fadiga da caixa redutora, podem tirar-se as seguintes conclusões:

- 1 O aço ao carbono do corpo da caixa (ST22-3) não possui o nível de resistência e a ductilidade adequada para esta aplicação.
- 2 O aço da tampa da caixa (ST37-2) apesar de possuir melhores características mecânicas do que o aço ST22-3, também não é o mais indicado para este tipo de aplicação.
- 3 O nível de tensões medido na caixa redutora com os extensómetros eléctricos, é elevado, o que origina problemas de fissuração à fadiga, especialmente nas zonas críticas dos cordões de soldadura.
- 4 As reacções nos apoios laterais superiores deram valores muito elevados.
- 5 Os valores das reacções e tensões na caixa são, fundamentalmente, devido aos valores elevados das forças de inércia.
- 6 Verificaram-se valores elevados no cálculo do dano de fadiga.
- 7 Os valores calculados para as vidas de fadiga aproximam-se dos tempos de serviço, ao fim dos quais se iniciaram as fissuras de fadiga.

Considerando os resultados obtidos, recomendam-se as seguintes acções de reparação ou reabilitação a realizar nas caixas redutoras em serviço (Moura Branco, Fernandes, Castro, 1999):

- 1 Afagar os cordões de soldadura da caixa e/ou tratar os pés dos cordões com martelagem pneumática, controlando a sua geometria (Infante, Abril 2002).
- 2 Rectificar e polir as cavilhas, pernos e respectivos alojamentos, de modo a aumentar a vida de fadiga dos apoios.
- 3 Desmontar a caixa redutora e equilibrar veios e engrenagens, para reduzir as forças de inércia.

## REFERÊNCIAS

- ASTM, *Specification for tensile testing of cast ferrous materials*, American Society for Testing and Materials, USA, E8 specification, 1992.
- Infante, Virginia I. M. N, *Análise da melhoria do comportamento à fadiga de juntas soldadas*, Tese de Doutoramento, IST, Abril de 2002.
- Moura Branco, C., *Estudo das causas de fissuração dos engates (rabeta) dos vagões de transporte de carvão*, trabalho realizado para a EMEF e Tejo Energia, SPM, Janeiro 2002.
- Moura Branco, C., *Estudo sobre a determinação das tensões, deslocamentos, reacções nos apoios e análise de vida nas caixas redutoras das locomotivas da série 2600*, trabalho realizado para a CP/UMAT e EMEF, SPM, Abril 2002.
- Moura Branco, C., *Mecânica dos Materiais*, 3ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.
- Moura Branco, C., Fernandes, A. A., Castro, P.T., *Fadiga de Estruturas Soldadas*, 2ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.
- Radaj, D., *Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures*, Ed. Abington Publishing, Cambridge, U.K., 1994.

