

## CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DO PARQUE NACIONAL DE MACACOS HIDRÁULICOS UTILIZADOS EM OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL

*António M. Baptista e A. Silva Ribeiro*

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, ambaptista@lnec.pt, asribeiro@lnec.pt

### Resumo

O presente trabalho apresenta uma síntese dos resultados obtidos num estudo estatístico, realizado com base na análise da informação recolhida em Certificados de Calibração de macacos hidráulicos, emitidos pelo Laboratório de Metrologia de Forças do LNEC no período de 1998 a 2006. Este estudo permitiu avaliar as características metrológicas gerais dos macacos hidráulicos utilizados em actividades ligadas à engenharia civil.

As conclusões deste estudo permitem ainda fundamentar uma série de alterações a introduzir numa próxima revisão dos Procedimentos de Calibração (LMF/PC01) e de Determinação da Incerteza (LMF/PCI01) seguidos nestas operações metrológicas.

**Palavras-chave:** Metrologia; Calibração, Classificação, Macacos Hidráulicos, Pré-Esforço.

### 1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Metrologia de Forças (LMF) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem vindo a desenvolver desde há algumas dezenas de anos, no âmbito das atribuições conferidas pela sua lei orgânica, uma actividade regular de verificação ou calibração de sistemas de medição de forças de equipamentos utilizados em actividades ligadas à construção e obras públicas.

Durante a década de noventa intensificou-se, em particular, a realização de operações de calibração de macacos hidráulicos, utilizados na aplicação de pré-esforço em elementos de betão estrutural ou em obras de geotecnia, na sequência de uma crescente sensibilização das empresas de construção e de fiscalização das obras para a importância do controlo do valor do pré-esforço aplicado.

Em face da inexistência de normas nacionais, europeias ou internacionais, ou de outros documentos normativos sobre a calibração do sistema de medição da força de macacos hidráulicos, que pudessem ser utilizados no exercício desta actividade metrológica, foi decidido desenvolver no seio do LMF os estudos necessários à preparação de um procedimento de calibração com este campo de aplicação.

O Procedimento de Calibração LMF/PC01 [1], então elaborado com esta finalidade, estipula um critério de

classificação dos macacos em função dos resultados da sua calibração. A classificação é efectuada com base nos valores de uma série de grandezas, associadas às características do equipamento de calibração, do sistema de medição da força do macaco e aos resultados das operações de calibração,

A escolha das tolerâncias, relativas a cada uma destas grandezas, que estabelecem os limites entre as várias classes apresentou algumas dificuldades, devidas ao desconhecimento de experiências normativas anteriores neste domínio e à inexistência de um historial suficientemente alargado de resultados de calibrações destes equipamentos que permitisse fundamentar esta escolha.

Passada uma década desde a elaboração do referido Procedimento LMF/PC01, dispõe-se actualmente de um acervo significativo de resultados de calibrações do sistema de medição de forças de macacos hidráulicos, de acordo com este procedimento. Esta informação permite, por um lado, fundamentar uma análise estatística dos valores tomados pelas grandezas que permitem estabelecer a classificação dos macacos e, por outro lado, avaliar a escolha das correspondentes tolerâncias, para cada uma das classes previstas neste procedimento.

A presente comunicação apresenta uma síntese dos resultados dessa análise estatística, através da qual se dispõe de uma perspectiva global das características metrológicas dos sistemas de medição de forças dos macacos hidráulicos calibrados pelo LNEC durante a última década.

### 2. TÉCNICA DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA FORÇA DOS MACACOS

A definição da técnica de calibração do sistema de medição da força de macacos hidráulicos baseou-se na experiência anterior do LMF na realização desta operação metrológica, e em estudos desenvolvidos no âmbito da normalização de operações de verificação dos sistemas de medição da força de máquinas de ensaios ([2] e [5]) e da calibração de instrumentos de medição de forças ([3] e [4]).

Os padrões de força utilizados nas calibrações de macacos devem encontrar-se calibrados segundo a Norma Europeia EN ISO 376 e possuir certificados de calibração válidos, de modo a assegurar a sua rastreabilidade de acordo com as orientações europeias sobre a actuação de laboratórios acreditados.

As forças de calibração são aplicadas por patamares regularmente distribuídos ao longo da gama de medição do macaco, de modo a detectar possíveis variações de comportamento em determinadas zonas da gama, devidas a defeitos ou avarias como fugas de óleo no sistema hidráulico ou atritos em manómetros analógicos, por exemplo.

Os resultados da calibração do macaco permitem quantificar uma série de grandezas associadas às características do seu sistema de medição da força, com base nas quais se pode proceder a uma classificação do macaco, nomeadamente:

- a resolução do aparelho indicador do sistema de medição do macaco, definida, no caso de uma escala analógica, através da razão entre a largura do ponteiro e a distância entre os centros de dois traços de referência adjacentes (menor divisão da escala);
- o erro relativo do zero  $f_o$ , calculado em função do valor absoluto da maior diferença entre os valores lidos antes do início de cada série de forças de calibração  $X_o$  e no final da descarga da mesma série  $X_f$ , após a supressão da força. O valor de  $f_o$  é expresso em percentagem do valor absoluto de  $X_N$ , correspondente ao alcance máximo da gama de medição do macaco:

$$f_o = \frac{|X_f - X_o|}{|X_N|} \times 100\% \quad (1)$$

- o erro relativo da repetibilidade  $b'$ , das medições sem rotação do macaco em torno do seu eixo, calculado para cada patamar de força através da diferença entre os valores indicados pelo padrão nesse patamar durante as duas primeiras séries de forças de calibração na mesma posição,  $F_1$  e  $F_2$ . O seu valor é expresso em percentagem do valor médio de  $F_1$  e  $F_2$ , designado por  $\overline{F}_{wr}$  (2).

$$b' = \frac{|F_2 - F_1|}{\overline{F}_{wr}} \times 100\% \quad ; \quad \overline{F}_{wr} = \frac{F_2 + F_1}{2} \quad (2)$$

- o erro relativo da repetibilidade  $b$ , das medições com rotação do macaco em torno do seu eixo, calculado para cada patamar de força através da diferença entre os valores máximo  $F_{\max}$  e mínimo  $F_{\min}$  indicados pelo padrão de força nesse patamar durante as três últimas séries de forças de calibração crescentes,  $F_2$ ,  $F_3$  e  $F_4$ . O seu valor é expresso em percentagem do valor médio destas três leituras  $F_2$ ,  $F_3$  e  $F_4$ , designado por  $\overline{F}_r$  (3).

$$b = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{|\overline{F}_r|} \times 100\% \quad ; \quad \overline{F}_r = \frac{F_2 + F_3 + F_4}{3} \quad (3)$$

- O erro relativo de interpolação  $f_c$ , calculado para cada patamar de força calibrado através da diferença entre a média dos valores indicados pelo padrão de força nesse patamar durante as três últimas séries de calibração,  $\overline{F}_r$ , e o valor  $F_a$ , determinado a partir de uma equação do 1º, 2º ou 3º grau ajustada ao conjunto dos valores médios  $\overline{F}_r$ , relativos ao conjunto dos patamares de força calibrados. Esta equação do 1º, 2º ou 3º grau é designada por curva de

calibração do sistema de medição da força, e deve constar do certificado de calibração do macaco. O erro relativo de interpolação  $f_c$  é expresso em percentagem do valor  $F_a$  fornecido pela curva de calibração:

$$f_c = \frac{|\overline{F}_r - F_a|}{|F_a|} \times 100\% \quad (4)$$

### 3. CLASSIFICAÇÃO DO MACACO

O Procedimento de Calibração LMF/PC01 [1] estipula um critério de classificação dos macacos (atribuição das Classes 0,5, 1, 2 ou 3), em função dos resultados da sua calibração. Os limites de tolerância para cada uma das grandezas em que se baseia este critério de classificação são indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Limites de tolerância para a classificação dos macacos

Classe	Erros relativos do sistema de medição			
	$b$ (%)	$b'$ (%)	$f_c$ (%)	$f_o$ (%)
<b>0,5</b>	0,5	0,25	0,5	0,1
<b>1</b>	1,0	0,5	1,0	0,2
<b>2</b>	2,0	1,0	2,0	0,4
<b>3</b>	3,0	1,5	3,0	0,6

A gama de medição para a qual o macaco é classificado deve ser determinada através da análise, no sentido decrescente, de cada um dos patamares de força de calibração, começando pelo alcance máximo até à menor das forças de calibração.

O alcance mínimo da gama de medição, numa dada classe, coincidirá com a menor das forças de calibração para as quais são satisfeitas as exigências indicadas na Tabela 1, relativas à classe em questão.

A gama de medição em que o macaco é classificado deve cobrir, nessa classe, pelo menos o domínio compreendido entre 50 % e 100 % do seu alcance máximo.

### 4. DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA

O critério de escolha das tolerâncias para os erros de repetibilidade do sistema de medição  $b'$  e  $b$ , em cada uma das classes, foi idêntico ao adoptado na normalização europeia e internacional para o controlo metrológico de máquinas de ensaios mecânicos ([3] e [4]).

Por outro lado, nos casos do erro do zero do indicador do sistema de medição da força  $f_o$  e do erro da interpolação das medições  $f_c$ , foram adoptadas tolerâncias mais elevadas, correspondentes a cerca do dobro dos valores habitualmente especificados para os equipamentos atrás referidos. O valor mais elevado destas tolerâncias destinou-se a assegurar uma melhor adaptação do critério de classificação dos macacos hidráulicos às características próprias e ao comportamento habitual destes equipamentos,

com base na experiência adquirida ao longo de anos de actividade do LMF neste domínio.

A actuação de um laboratório de calibração implica a determinação das incertezas associadas às operações metrológicas nele realizadas e aos respectivos resultados, expressos no Certificado de Calibração por ele emitidos.

O cálculo das incertezas associadas aos resultados da calibração do sistema de medição de forças de macacos hidráulicos apresentava, porém, o mesmo tipo de dificuldades atrás referidas, decorrentes da inexistência de documentos normativos sobre esta matéria. Foi, por isso, decidido elaborar no LMF os estudos de base para a definição de um procedimento de cálculo das referidas incertezas.

O Procedimento LMF/PCI01 para a “*Determinação da Incerteza dos Resultados da Calibração do Sistema de Medição da Força de Macacos Hidráulicos*”, resultante destes estudos, foi também publicado em anexo à Informação Técnica sobre Metrologia ITM7 [1], juntamente com o Procedimento de Calibração LMF/PC01 anteriormente referido.

A escolha dos limites de tolerância, indicados na Tabela 1, para a atribuição de classes aos macacos teve também em consideração os valores máximos da incerteza que, de acordo com o Procedimento LMF/PCI01, passariam a estar associados aos valores da força indicados pelo sistema de medição da força do macaco.

Assim, os limites de tolerância adoptados asseguram, no seu conjunto, que a incerteza global associada ao valor da força lido no aparelho indicador do sistema de medição do macaco seja: (i) inferior a 0,5% desse valor no caso de um macaco da Classe 0,5; (ii) inferior a 1% do valor referido se o macaco for da Classe 1; e (iii) inferior a 2% ou a 3% do mesmo valor se o macaco for da Classe 2 ou 3, respectivamente.

### 3. FONTES E ORGANIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO

Decorrida uma década desde a elaboração do Procedimento de Calibração LMF/PC01, dispõe-se actualmente de um acervo significativo de resultados de calibrações do sistema de medição de forças de macacos hidráulicos, de acordo com este procedimento. Esta informação permite, por um lado, fundamentar uma análise estatística dos valores tomados pelas grandezas que permitem estabelecer a classificação dos macacos e, por outro lado, avaliar a escolha dos correspondentes limites de tolerância, para cada uma das classes previstas neste procedimento.

O estudo visando a caracterização das classes dos macacos hidráulicos tem como base o registo da actividade desenvolvida pelo LMF no âmbito da calibração deste tipo de equipamentos, no período de nove anos compreendido entre 1998 e 2006.

A informação utilizada neste estudo foi colhida em 719 certificados de calibração emitidos no período referido, cada qual com cerca de 10 patamares de força calibrados,

abrindo uma larga diversidade de tipos e de marcas de equipamentos, essencialmente utilizados em actividades inerentes à Engenharia Civil e possuindo características metrológicas diversas, nomeadamente em termos de resolução.

De entre as grandezas em que se baseia o critério de classificação adoptado no Procedimento LMF/PC01 foi decidido seleccionar para o presente estudo os erros relativos da repetibilidade  $b'$  e  $b$ , e o erro relativo de interpolação  $f_c$ . Esta decisão baseou-se no facto de serem estas as grandezas em relação às quais se dispunha de um maior volume de informação, uma vez que o seu valor foi calculado individualmente para cada um dos patamares de força calibrados.

Acresce o facto de o valor da resolução estar ligado ao aparelho indicador do sistema de medição do macaco, geralmente constituído por um manómetro analógico ou digital, que por vezes é utilizado com diferentes macacos, pelo que a análise desta grandeza poderá não ser tão representativa do parque de macacos em que se fundamentou o presente estudo como a dos erros  $b'$ ,  $b$  e  $f_c$ .

A análise foi efectuada considerando a amostra relativa ao conjunto dos anos observados (1998-2006) e, também, as amostras relativas a cada um destes anos, isoladamente. Desta forma pretendeu-se observar a evolução temporal do equipamento calibrado e, simultaneamente, dispor de uma visão global do seu comportamento através da amostragem completa plurianual, com o intuito de detectar alterações de padrão ou padrões consistentes de desempenho.

Atendendo à natureza dos ensaios envolvidos nas operações de calibração, verifica-se que a classificação é significativamente condicionada pelo desempenho dos equipamentos nos patamares de ensaio mais baixos (tipicamente compreendidos entre 10% da gama e 30% da gama). Este facto conduziu a que se efectuasse uma análise complementar dos resultados observados, considerando os valores dos erros  $b'$ ,  $b$  e  $f_c$  em cada um dos três primeiros patamares de ensaio, compreendidos entre 10% e 20%, entre 20% e 30%, ou entre 30% e 40% do alcance máximo da gama de medição do macaco.

A representação em histograma, adoptada como forma de exposição da informação tratada, permite efectuar uma comparação directa entre a distribuição de cada tipo de erros e os intervalos de classificação estipulados no Procedimento LMF/PC01. Desta forma é possível constatar, com algum grau de rigor, se os limites definidos a priori são consistentes com o desempenho do equipamento de medição observado na prática.

Deve-se salientar que o estudo efectuada resulta da actividade acreditada do Laboratório de Metrologia de Forças do LNEC, desenvolvida com base num conjunto alargado de padrões de referência (evitando, dessa forma, efeitos indesejáveis de correlação dos dados observados), sujeitos a calibrações periódicas e rastreados aos padrões primários nacionais e internacionais da grandeza força, o que constitui um elemento de garantia de qualidade dos resultados obtidos.

Relativamente à avaliação das incertezas de medição, recorda-se que estas são determinadas, para cada um dos patamares de calibração, de acordo com o Procedimento LMF/PCI01, anexo à Informação Técnica ITM7 [1], pelo que os seus valores possibilitam uma avaliação comparativa com os parâmetros estudados.

Embora se tenha decidido que a sua análise se encontrava para além dos objectivos inerentes ao presente estudo, deve-se referir que, em regra, a sua dimensão é razoavelmente inferior ao conjunto dos erros observados. A sua consideração poderia eventualmente conduzir a um critério de classificação menos severo, dependendo obviamente dos limites de tolerância adoptados para a incerteza global associada ao valor da força lido no aparelho indicador do macaco, em cada uma das classes consideradas.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os histogramas apresentados nas Fig. 1 a 24 evidenciam que os comportamentos observados nas amostras anuais (Fig. 5 a 8, 13 a 16, e 21 a 24) se repercutem no comportamento observado na amostragem plurianual, no que se refere aos 3 parâmetros considerados ( $b'$ ,  $b$  e  $f_c$ ).

Da análise dos histogramas depreende-se, também, que os limites de tolerância adoptados para cada uma das classes de macacos previstas no Procedimento LMF/PC01 (ver Tabela 1) constituem em geral fronteiras marcantes na distribuição dos erros experimentais, facto que vem validar as opções tomadas na quantificação destes limites aquando da elaboração deste Procedimento de Calibração.

Com efeito, no que se refere ao erro relativo da repetibilidade  $b'$ , a Fig. 1 mostra a existência de quatro zonas perfeitamente demarcadas. A primeira corresponde ao conjunto de ocorrências de valores de  $b'$  compreendidos entre 0% e 0,25%, constituído pelas primeiras cinco barras (cada uma destas correspondente a um intervalo de 0,05% de variação de  $b'$ ), com cerca de 600 a 1000 ocorrências em cada barra. O valor médio das ocorrências no conjunto destas cinco barras é superior a 800, pelo que o total de ocorrências no intervalo de 0% a 0,25%, que integra os erros  $b'$  que satisfazem as exigências da Classe 0,5, é superior a 4000.

Ao passar-se da quinta barra (0,20% a 0,25%) para a sexta barra (0,25% a 0,30%) na Fig. 1 é já possível observar uma queda acentuada no número de ocorrências, de cerca de 600 para cerca de 400, a qual mostra que o valor 0,25% constitui efectivamente uma fronteira bem salientada, e que este valor foi uma escolha adequada para demarcar a Classe 0,5 da Classe 1 (Tabela 1). Esta delimitação é ainda mais acentuada se considerarmos o intervalo de 0,25% a 0,5%, correspondente à Classe 1, onde o número total de ocorrências é igual a cerca de 1600, ou seja 2,5 vezes inferior ao verificado na Classe 0,5.

Mais uma vez, é possível observar uma descontinuidade importante no valor limite de 0,5%, que estabelece a fronteira entre a Classe 1 e a Classe 2, a qual vem também validar a escolha feita para o limite de tolerância indicado na Tabela 1. Esta descontinuidade é ainda mais marcante se se

considerar o valor médio de ocorrências em cada intervalo de 0,05% (correspondente a uma barra vertical) que, no intervalo de 0,5% a 1,0%, correspondente à Classe 2, é cerca de 4 vezes inferior ao verificado na Classe 1. Este facto mostra que a Classe 2 ocorre já de forma pouco frequente, o que traduz uma qualidade genérica do parque de equipamentos calibrado.

É ainda possível constatar, através da Fig. 1, que o número de ocorrências no intervalo de 1,0% a 1,5%, correspondente à Classe 3, é já bastante diminuto, facto que poderá justificar a eliminação desta Classe numa próxima revisão do Procedimento LMF/PC01. Por último, faz-se notar que o número de ocorrências de valores do erro  $b'$  superiores a 1,5% é praticamente residual, o que justifica o facto de os macacos com esses erros não serem classificáveis de acordo com o Procedimento LMF/PC01.

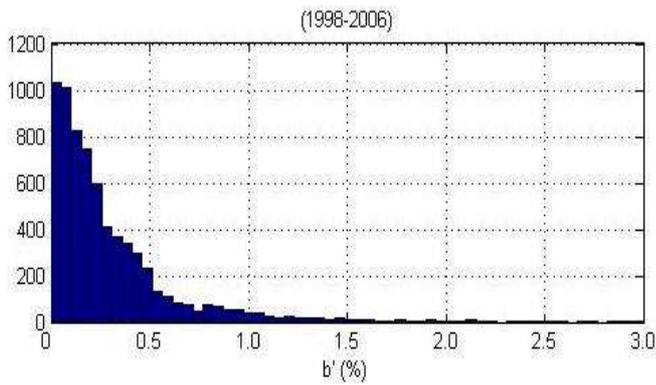
A mesma demarcação atrás referida pode ser observada na Fig. 5, referente aos resultados obtidos para o erro  $b'$  durante o ano de 2004, apesar de a variação do número de ocorrências entre barras adjacentes não ser tão gradual, em consequência da menor dimensão da amostra de resultados. Ainda assim, também esta figura mostra que a escolha dos valores 0,25%, 0,5%, 1,0% e 1,5% se revela bastante adequada para a delimitação das Classes 0,5, 1, 2 e 3, conforme indicado na Tabela 1.

A comparação relativa dos diferentes histogramas obtidos para cada um dos anos no período de 1998 a 2006 (cuja representação não é possível apresentar no presente trabalho devido à limitação de espaço) evidenciou uma distribuição idêntica, não se verificando qualquer melhoria ou degradação relevante do parque. Esta informação afigura-se útil, no contexto da manutenção deste tipo de equipamentos, podendo eventualmente vir a constituir matéria para uma futura reavaliação da periodicidade de calibração mais apropriada para este tipo de equipamento.

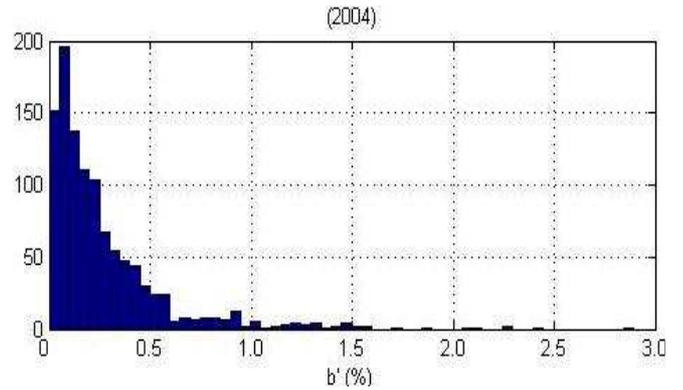
Outro aspecto com interesse reside na observação dos histogramas relativos aos diversos patamares de força calibrados, de modo a se perceber de que modo estes poderão influenciar a classificação do macaco.

A Fig. 2 e a Fig. 6 mostram que, na gama de medição compreendida entre 10% e 20% do alcance máximo  $F_N$  da gama de medição do macaco, o número de ocorrências na Classe 1 é muito mais próximo do verificado na Classe 0,5, e que o número de ocorrências nas Classes 1 e 2 é, neste caso, bastante mais significativo do que na Fig. 1 e na Fig. 5. O mesmo comentário é válido para o número de macacos não classificáveis de acordo com o Procedimento LMF/PC01, com valores do erro  $b'$  superiores a 1,5%.

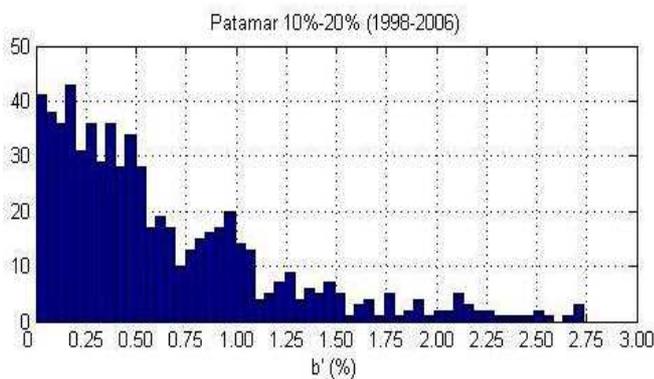
As Fig. 3 e 7, e as Fig. 4 e 8, mostram que este fenómeno se vai atenuando progressivamente, assim que os patamares de força se tornam mais elevados. Esta informação afigura-se igualmente bastante interessante, uma vez que permite avaliar de que modo os primeiros patamares calibrados afectam a classificação da gama de medição dos macacos. Um melhor conhecimento desta influência poderá também vir a constituir um factor a ter em consideração numa próxima revisão do Procedimento LMF/PC01.



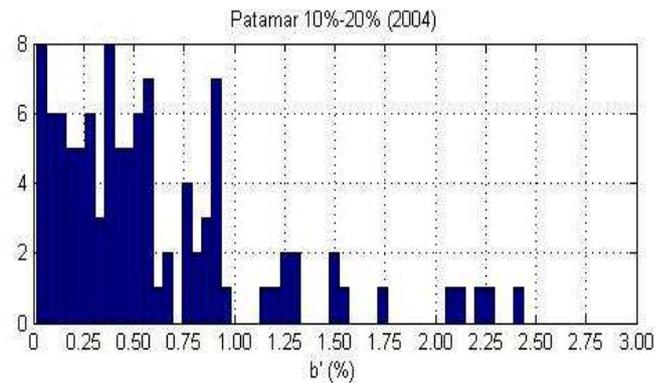
**Figura 1** – Valores de  $b'$  no conjunto de todos os patamars de força calibrados, no período de 1998 a 2006



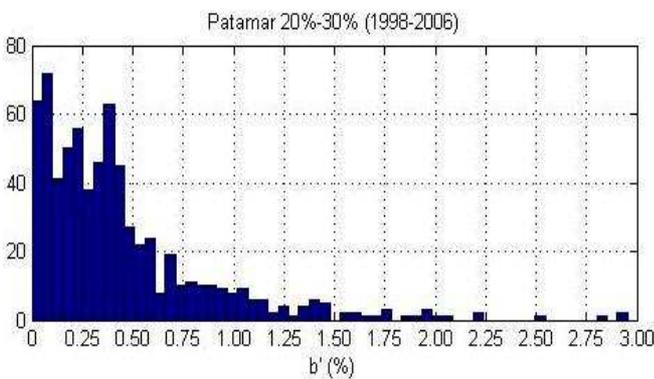
**Figura 5** – Valores de  $b'$  no conjunto de todos os patamars de força calibrados, no ano de 2004



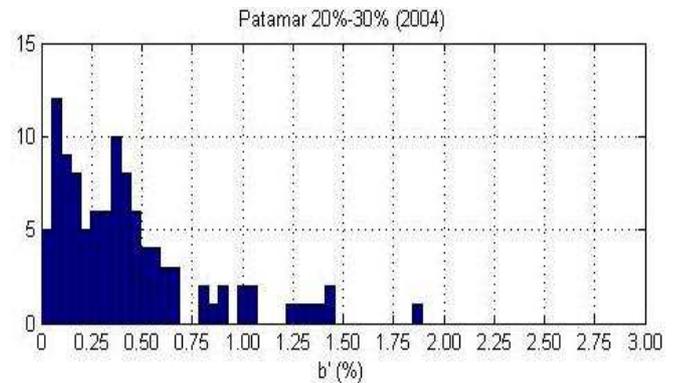
**Figura 2** – Valores de  $b'$  nos patamars de 10% a 20% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



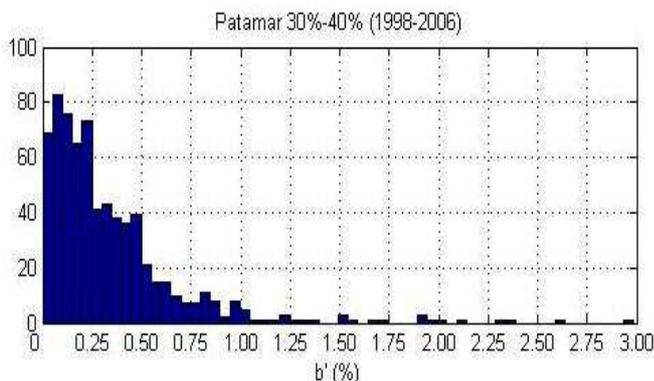
**Figura 6** – Valores de  $b'$  nos patamars de 10% a 20% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



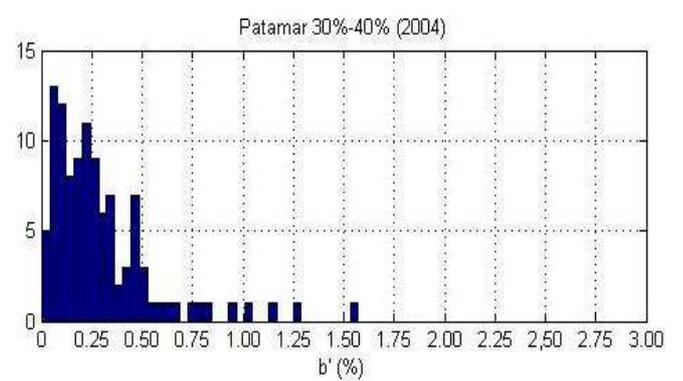
**Figura 3** – Valores de  $b'$  nos patamars de 20% a 30% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



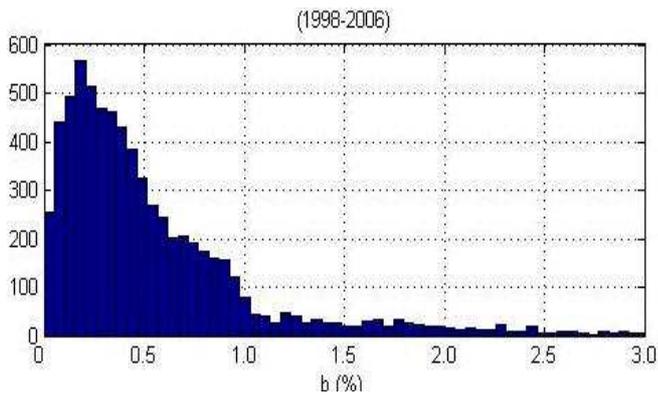
**Figura 7** – Valores de  $b'$  nos patamars de 20% a 30% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



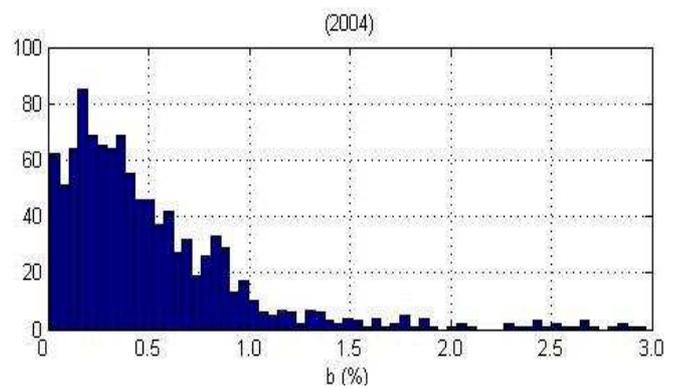
**Figura 4** – Valores de  $b'$  nos patamars de 30% a 40% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



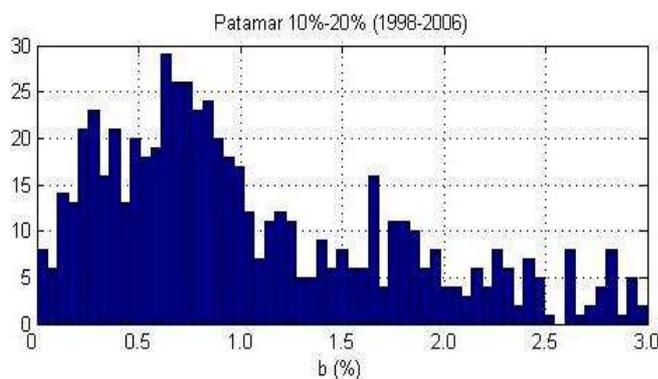
**Figura 8** – Valores de  $b'$  nos patamars de 30% a 40% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



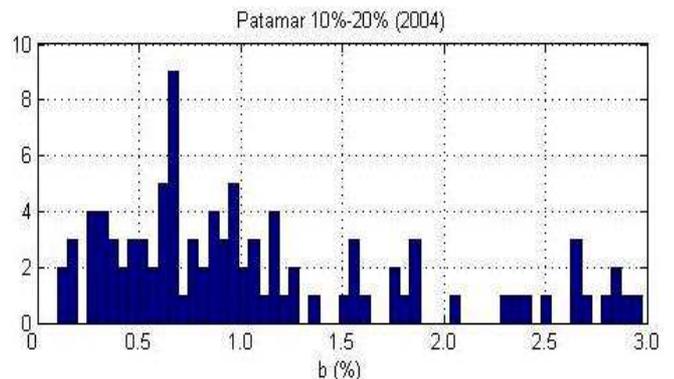
**Figura 9** – Valores de  $b$  no conjunto de todos os patamares de força calibrados, no período de 1998 a 2006



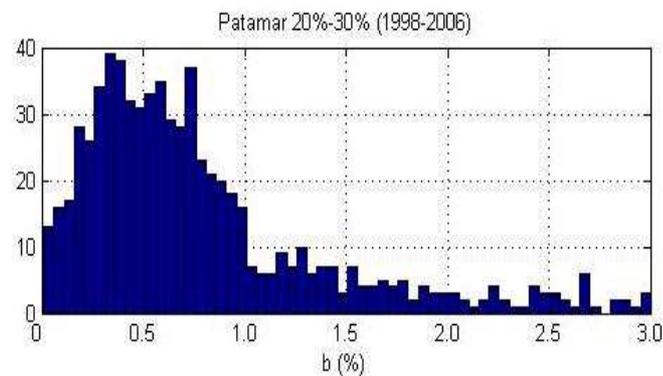
**Figura 13** – Valores de  $b$  no conjunto de todos os patamares de força calibrados, no ano de 2004



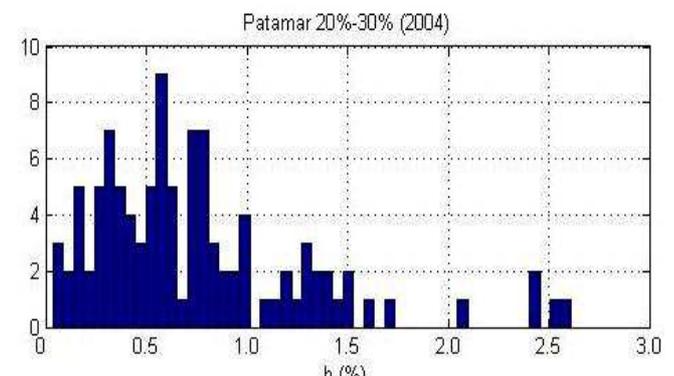
**Figura 10** – Valores de  $b$  nos patamares de 10% a 20% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



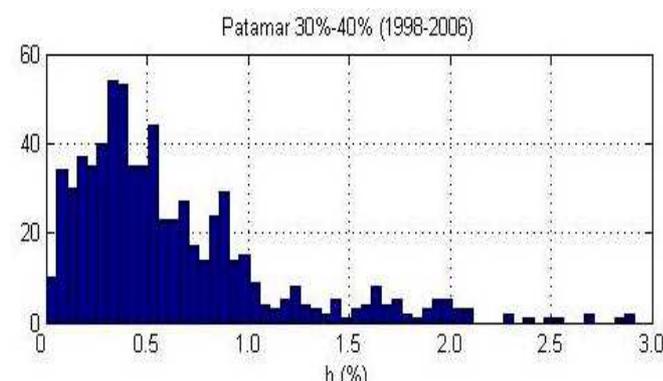
**Figura 14** – Valores de  $b$  nos patamares de 10% a 20% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



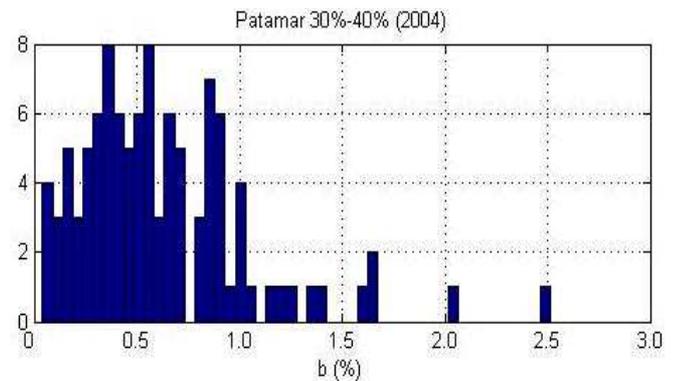
**Figura 11** – Valores de  $b$  nos patamares de 20% a 30% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



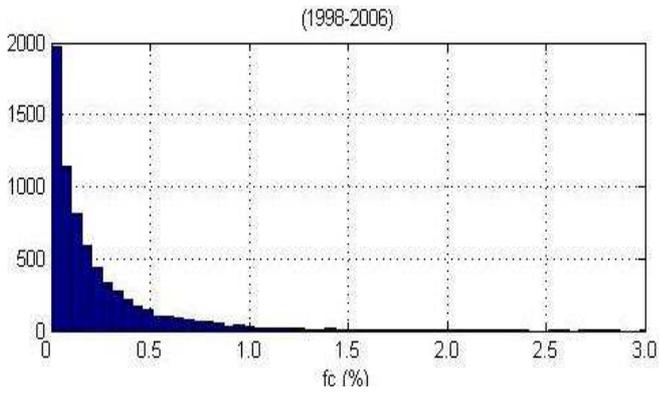
**Figura 15** – Valores de  $b$  nos patamares de 20% a 30% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



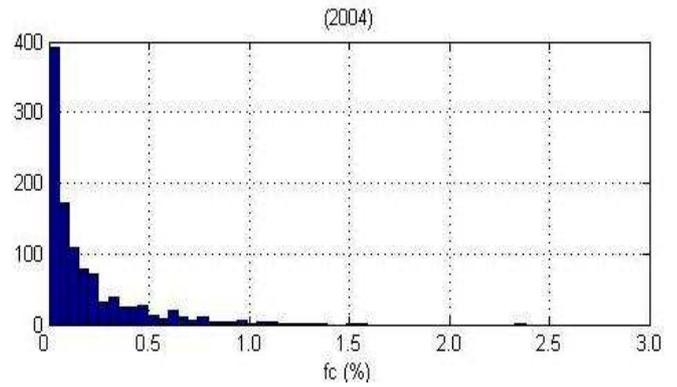
**Figura 12** – Valores de  $b$  nos patamares de 30% a 40% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



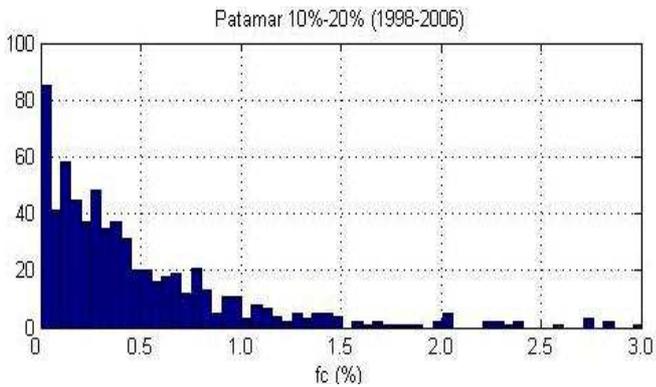
**Figura 16** – Valores de  $b$  nos patamares de 30% a 40% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



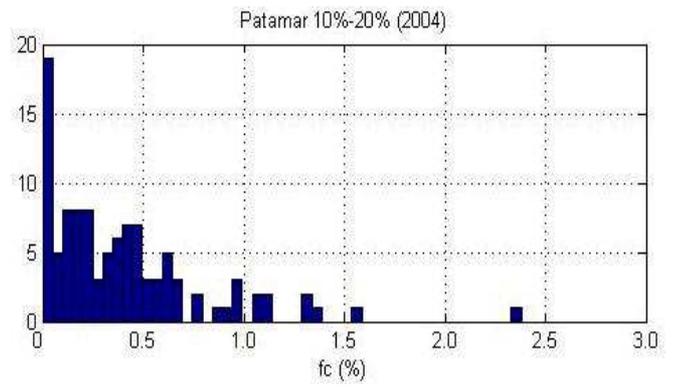
**Figura 17** – Valores de  $f_c$  no conjunto de todos os patamares de força calibrados, no período de 1998 a 2006



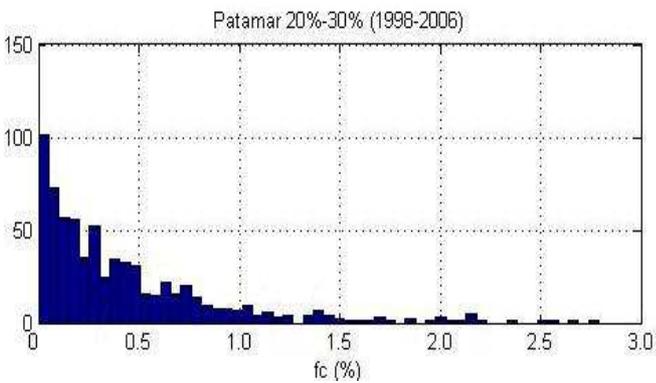
**Figura 21** – Valores de  $f_c$  no conjunto de todos os patamares de força calibrados, no ano de 2006



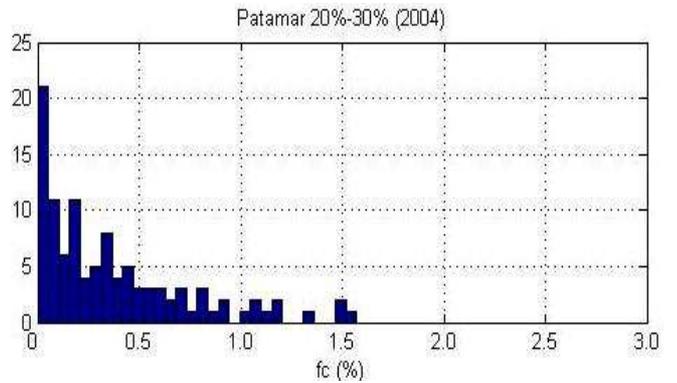
**Figura 18** – Valores de  $f_c$  nos patamares de 10% a 20% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



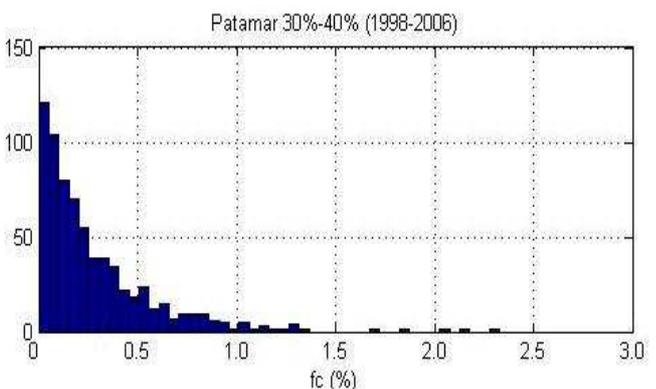
**Figura 22** – Valores de  $f_c$  nos patamares de 10% a 20% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



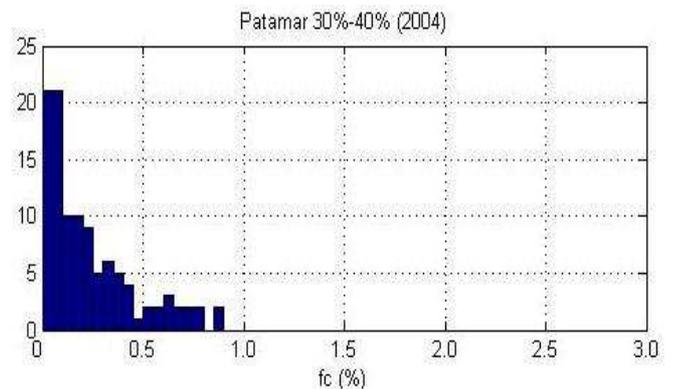
**Figura 19** – Valores de  $f_c$  nos patamares de 20% a 30% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



**Figura 23** – Valores de  $f_c$  nos patamares de 20% a 30% do alcance máximo de medição, no ano de 2004



**Figura 20** – Valores de  $f_c$  nos patamares de 30% a 40% do alcance máximo de medição, no período de 1998 a 2006



**Figura 24** – Valores de  $f_c$  nos patamares de 30% a 40% do alcance máximo de medição, no ano de 2004

Os comentários anteriores, referentes à análise dos histogramas apresentados nas Fig. 1 a 8 e respeitantes ao erro relativo da repetibilidade  $b'$ , são também genericamente aplicáveis ao erro relativo da repetibilidade  $b$ , na sequência da análise dos histogramas apresentados nas Fig. 9 a 16. As Fig. 9 e 13 mostram que a escolha dos limites de 0,5%, 1,0% e 2,0% para as Classes 0,5, 1 e 2, parece ter sido bastante adequada. Também neste caso se coloca a hipótese de vir a eliminar, mais tarde, a Classe 3, em face do reduzido número de ocorrências nesta Classe.

As Fig. 10 e 14, tal como as Fig. 2 e 6, mostram que os patamares compreendidos entre 10% e 20% de  $F_N$  são os que mais penalizam a classificação do macaco, pelo que não parece razoável incluí-los na gama de classificação obrigatória do macaco. Por sua vez, as Fig. 11, 12, 15 e 16 poderão vir a contribuir para a escolha do alcance mínimo a impor para a referida gama de classificação obrigatória, que foi fixada entre 50% e 100% de  $F_N$ , e que poderá futuramente vir a ser alargada.

Nas Fig. 9 a 16 é também possível constatar que o número de ocorrências de valores do erro  $b$  entre 0% e 0,10% (correspondentes às duas primeiras barras verticais) é inferior ao dos intervalos seguintes, ao contrário do que acontecia, em geral, nas Fig. 1 a 8. Este facto resulta da maior sensibilidade do sistema de medição da força do macaco ao erro de repetibilidade  $b$ , influenciado por excentricidades na aplicação da força de calibração decorrentes da montagem do macaco ou de possíveis assimetrias da sua geometria, por exemplo.

Por último, a análise das Fig. 17 a 24 veio revelar que os valores adoptados para os limites de tolerância do erro relativo de interpolação  $f_c$  se afiguram demasiado elevados, quando a sua posição nos histogramas relativos ao erro  $f_c$  é comparada com a posição dos limites adoptados para os erros de repetibilidade  $b'$  e  $b$  nos respectivos histogramas, apresentados nas Fig. 1 a 8 e nas Fig. 9 a 16.

Assim, com base nos histogramas relativos à amostra plurianual (Fig. 17 a 20) ou a um ano em particular (Fig. 21 a 24) é possível concluir que seria mais adequado adoptar limites de tolerância iguais a metade dos valores actuais (Tabela 1), ou seja iguais a 0,25%, a 0,5%, a 1,0% e a 1,5%, para as Classes 0,5, 1, 2 e 3, respectivamente. Caso contrário, o erro  $f_c$  torna-se praticamente irrelevante, pois raramente afecta a classificação do macaco.

Esta conclusão, que permitirá fundamentar a redução dos limites de tolerância indicados na Tabela 1 para o erro  $f_c$ , aquando duma próxima revisão do Procedimento LMF/PC01, significa, uma vez mais, que a qualidade genérica do parque de macacos hidráulicos calibrados ao longo destes anos é melhor do que aquela que tinha sido estimada quando este Procedimento foi concebido.

Com base nas alterações atrás referidas e num eventual aumento das exigências relativas à resolução do indicador da força, justificável através do recurso crescente a manómetros digitais com melhor resolução que os manómetros analógicos, poder-se-á reduzir consideravelmente o nível

máximo da incerteza global associada a cada uma das classes previstas neste Procedimento de Calibração (ver 2.).

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta um estudo estatístico dos resultados das calibrações do sistema de medição da força de macacos hidráulicos realizadas pelo Laboratório de Metrologia de Forças do LNEC no período de 1998 a 2006.

Com base neste estudo é possível fundamentar uma série de alterações a introduzir no critério de classificação dos macacos, numa próxima revisão do Procedimento de Calibração LMF/PC01 seguido nestas operações metroológicas.

Os estudos apresentados neste trabalho poderão ainda ser alargados à análise da distribuição estatística da incerteza global dos valores da força aplicada pelos macacos, e da sua relação com outras grandezas, tais como o alcance máximo ou a resolução do indicador da força do macaco. Com base neste estudo será possível efectuar uma revisão do Procedimento LMF/PC01 (ver 2.), e melhorar a correlação entre os limites de tolerância adoptados na classificação dos macacos e o valor da correspondente incerteza global.

Estes estudos poderão ainda ser alargados à análise da evolução dos resultados de um mesmo equipamento ao longo do tempo, de modo a reavaliar a periodicidade recomendada para a sua calibração periódica.

## REFERÊNCIAS

- [1] Baptista, A.M., *Calibração do sistema de medição de força de macacos hidráulicos*, ICT - Informação Técnica Metrologia ITM7, LNEC, 2002, 32 pág.
- [2] Baptista, A.M., *Metrologia de Forças. Calibração de padrões de força utilizados na verificação estática de máquinas de ensaios mecânicos uniaxiais. Projecto de Norma Portuguesa*, Relatório 169/89-NCE, LNEC, 18 p.
- [3] Baptista, A.M., *Máquinas de ensaios mecânicos. Verificação das máquinas para ensaios de compressão e de flexão. 1ª Parte: Verificação do sistema de medição da força. Projecto de Norma Portuguesa*, Relatório 170/89-NCE, LNEC, 1989, 20 p.
- [4] Baptista, A.M., *Materiais metálicos. Ensaio de tracção. Parte 2: Verificação do sistema de medição da força da máquina de ensaio de tracção. Projecto de versão portuguesa da Norma Europeia EN 10002-2(1991)*, Relatório 33/92-NCE, LNEC, 1992, 33 p.
- [5] Baptista, A.M., *Materiais metálicos. Ensaio de tracção. Parte 3: Calibração dos instrumentos de medição de força utilizados na verificação de máquinas de ensaios uniaxiais. Projecto de versão portuguesa da Norma Europeia EN 10002-3 (1994)*, Nota Técnica nº14/96 - NCE, LNEC, 1996, 32 p.