



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/552/00872

CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE EQUIPAMENTOS PENDULARES UTILIZADOS EM ENSAIOS DE CHOQUE CHARPY DE MATERIAIS PLÁSTICOS

Estudo realizado por solicitação do Departamento de
Materiais do LNEC

Lisboa • Janeiro de 2009

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 16/2009 – NQM

Caracterização Metrológica de Equipamentos Pendulares utilizados em Ensaios de Choque Charpy de Materiais Plásticos

Resumo

Este estudo tem por objectivo a caracterização metrológica de equipamentos pendulares utilizados em ensaios de choque Charpy de materiais plásticos. O presente documento menciona o enquadramento normativo associado a esta matéria sendo, também, efectuada uma breve descrição do ensaio de choque Charpy e, em particular, do equipamento pendular utilizado neste contexto. A caracterização metrológica realizada abrange diversos aspectos de natureza mecânica, dimensional e geométrica assim como o instrumento de medição de deslocamento angular integrante do equipamento em estudo.

Metrological Characterisation of Pendulum Equipments used for Charpy Impact Tests of Plastic Materials

Abstract

The aim of this study is to perform the metrological characterization of pendulum equipments used for Charpy impact tests of plastic materials. The present document mentions the normative framework associated with this issue and also performs a short description of the Charpy impact test, focusing on the pendulum equipment used. The performed metrological characterization includes the study of several mechanical, dimensional and geometrical characteristics and also the characterisation of the angular displacement measurement instrument incorporated in the studied equipment.

Caractérisation Métrologique des Équipements Pendulaires utilisés dans les Essais de Choc Charpy sur Matériaux Plastiques

Résumé

L'objectif de cette étude est la caractérisation métrologique des équipements pendulaires utilisés dans les essais de choc Charpy sur matériaux plastiques. Le présent document décrit l'encadrement normatif associé à cette matière et fait, aussi, une brève description de l'essai de choc Charpy, en particulier, de l'équipement pendulaire utilisé dans ce contexte. La caractérisation métrologique réalisée couvre des aspects mécaniques, dimensionnelles et géométriques et aussi la caractérisation métrologique de l'instrument de mesure de déplacement angulaire inclus dans l'équipement étudié.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ENSAIO DE CHOQUE CHARPY DE MATERIAIS PLÁSTICOS.....	3
2.1 Enquadramento normativo.....	3
2.2 Objectivos do ensaio.....	4
2.3 Descrição do equipamento pendular.....	5
3 CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE EQUIPAMENTOS PENDULARES.....	7
3.1 Introdução.....	7
3.2 Caracterização metrológica mecânica.....	7
3.3 Caracterização metrológica dimensional e geométrica.....	11
3.3.1 Equipamento pendular.....	11
3.3.2 Pêndulo de choque.....	13
3.3.3 Apoios de provete.....	14
3.4 Caracterização metrológica do instrumento de medição de deslocamento angular.....	15
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	17
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
ANEXO 1 – Relações cinemáticas e energéticas associadas ao movimento de um pêndulo....	23
ANEXO 2 – Requisitos normativos relativos à massa e à rigidez do equipamento pendular.	25

1 INTRODUÇÃO

No contexto da medição é observada uma inevitável dispersão de valores associada à obtenção da estimativa de uma grandeza – a incerteza de medição – que apresenta contribuições que podem ser atribuídas ao método de medição e ao operador (caso este possua um papel determinante na realização da medição) mas, também, ao próprio instrumento de medição utilizado para esse efeito.

Frequentemente, a contribuição da instrumentação constitui a parcela determinante para a qualidade das medições efectuadas. Deste modo, é recomendável proceder a uma avaliação prévia da adequação do instrumento de medição face ao nível de exactidão requerido para a medição que se pretende efectuar. Esta avaliação deve ser baseada na identificação dos factores de influência intrínsecos ao próprio instrumento de medição que afectam o resultado da medição e na sua quantificação pela via probabilística.

No Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), a elaboração de estudos visando a caracterização metrológica de instrumentos de medição constitui uma actividade desenvolvida pelo Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica (CIC) possuindo, este sector, meios humanos e materiais que permitem dar resposta a algumas das solicitações efectuadas neste âmbito. O presente estudo resultou de uma solicitação do Laboratório de Ensaios de Materiais Orgânicos para a Construção (LEMOC), inserido no Núcleo de Materiais Orgânicos do Departamento de Materiais do LNEC, visando promover a caracterização metrológica de equipamentos pendulares utilizados em ensaios de choque Charpy de materiais plásticos.

Para além de permitir a divulgação de conhecimento científico considerado relevante e comum a diversas áreas de actividade do LNEC, o presente relatório constitui um elemento de apoio à avaliação de incertezas de medição associadas à realização de um ensaio de choque Charpy de materiais plásticos, actividade laboratorial para a qual o LEMOC se encontra acreditado no âmbito do Sistema Português da Qualidade. Salienta-se que, a sua tradução prática, efectuada pelo Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM) do LNEC, se encontra pormenorizadamente descrita num procedimento de ensaio metrológico desenvolvido especificamente para suporte da actividade experimental [1].

No que respeita ao seu conteúdo, no capítulo 2 deste relatório é efectuada uma breve descrição do ensaio de choque Charpy, nomeadamente, o seu enquadramento normativo, os seus objectivos e a descrição do equipamento pendular utilizado. Por sua vez, o capítulo 3 é dedicado à

caracterização metrológica propriamente dita, com particular incidência nas características de natureza mecânica, dimensional, geométrica e no instrumento de medição de deslocamento angular enquanto componente do equipamento pendular. Por último, no capítulo 4 são apresentadas as considerações finais associadas à realização do presente estudo.

2 ENSAIO DE CHOQUE CHARPY DE MATERIAIS PLÁSTICOS

2.1 Enquadramento normativo

O ensaio de choque Charpy de materiais plásticos possui um enquadramento normativo que abrange quer a realização do ensaio, quer os aspectos relacionados com o ensaio metrológico do equipamento pendular utilizado nesse contexto experimental. Com efeito, é possível assegurar uma uniformização da metodologia de ensaio e do equipamento pendular associado, o que se traduz numa melhoria significativa da reprodutibilidade do ensaio de choque supracitado.

No que respeita à realização do ensaio, o LEMOC segue as recomendações descritas na norma EN ISO 179-1:2000 [2] intitulada “*Plastics. Determination of Charpy impact properties. Part 1: Non-instrumented impact test*”. Para além dos aspectos relacionados com a terminologia e definições aplicáveis no contexto do ensaio, esta norma define o princípio, o método e o procedimento de ensaio a adoptar incluindo, também, indicações relativas à preparação e ao condicionamento ambiental dos provetes a ensaiar. Em matéria de ensaio metrológico do equipamento pendular utilizado, este documento normativo menciona a consulta da norma EN ISO 13802:2006 [3] intitulada “*Plastics. Verification of pendulum impact-testing machines – Charpy, Izod and tensile impact-testing.*”.

Esta norma define, ainda, o conjunto de requisitos de natureza mecânica, dimensional e geométrica que o equipamento pendular deverá cumprir de forma a que a sua utilização, no âmbito do ensaio de choque Charpy de materiais plásticos, seja considerada válida. Com efeito, são enumeradas as diversas características intrínsecas do equipamento consideradas essenciais para a correcta avaliação da sua adequação ao ensaio pretendido.

A caracterização metrológica descrita no presente relatório resulta de uma análise crítica dos elementos mencionados em [3] visando estabelecer quais os requisitos metrológicos que devem ser avaliados neste ensaio. Com efeito, ambas as normas [2] e [3] mencionam, implicitamente, a existência de requisitos aplicáveis num contexto de dimensionamento e produção e outros que requerem uma avaliação periódica. Na ausência de informação normativa explícita sobre esta matéria, o presente estudo pretende clarificar quais os requisitos que podem ser razoavelmente atribuídos à entidade responsável pelo ensaio metrológico do equipamento em estudo e, conseqüentemente, promover a sua avaliação de modo que a entidade laboratorial requisitante o possa considerar apto ao serviço.

2.2 Objectivos do ensaio

O ensaio de choque Charpy tem por objectivo a determinação da energia absorvida por um provete (representativo de um material plástico) durante o seu processo de fractura em resultado da aplicação de uma carga de choque. As estimativas obtidas permitem conhecer a resistência do material plástico ensaiado a este tipo de solicitações tendo em conta a influência de diversas variáveis como a temperatura, a composição química, a microestrutura, o processo de fabrico e os tratamentos físico-químicos a que eventualmente foi submetido.

Com o objectivo de facilitar o processo de fractura durante a realização do referido ensaio, o provete possui, regra geral, um entalhe localizado na face oposta à face na qual é aplicada a solicitação de choque. Note-se que, todos os aspectos dimensionais e geométricos associados ao provete, incluindo o próprio entalhe, se encontram definidos na norma de ensaio aplicável [2] dado constituírem variáveis de influência dos resultados obtidos.

A realização do ensaio de choque Charpy decorre num equipamento dedicado que permite a libertação de um pêndulo (conforme representado na figura 1) o qual, por acção gravítica, efectua um movimento de rotação descendente intersectando o provete de ensaio numa posição conhecida (regra geral, correspondente à posição vertical de repouso do pêndulo) originando, desta forma, o choque pretendido e a conseqüente fractura do provete. O equipamento utilizado incorpora um instrumento de medição de deslocamento angular que permite estimar o ângulo inicial, α_0 , e o ângulo máximo de subida do pêndulo após o choque com o provete, α_R .

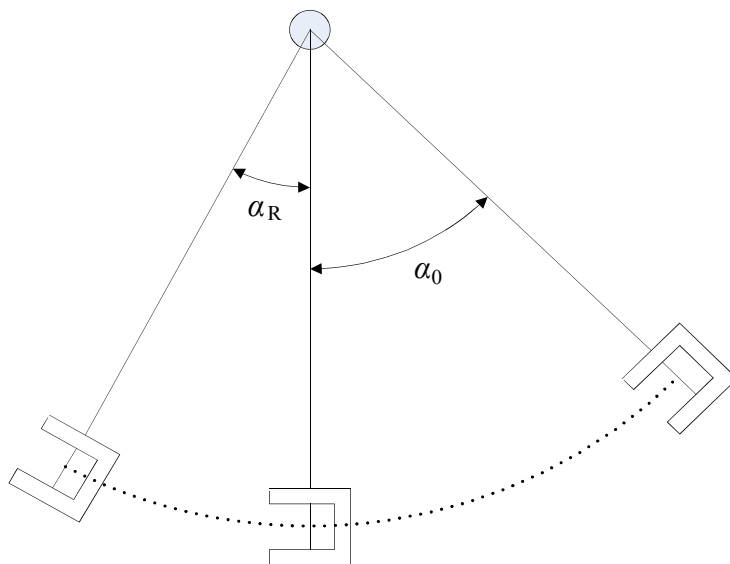


Figura 1: Representação esquemática do movimento de rotação do pêndulo de choque.

A mensuranda de interesse do ensaio – a energia absorvida, W – é obtida por via indirecta mediante o seguinte modelo matemático

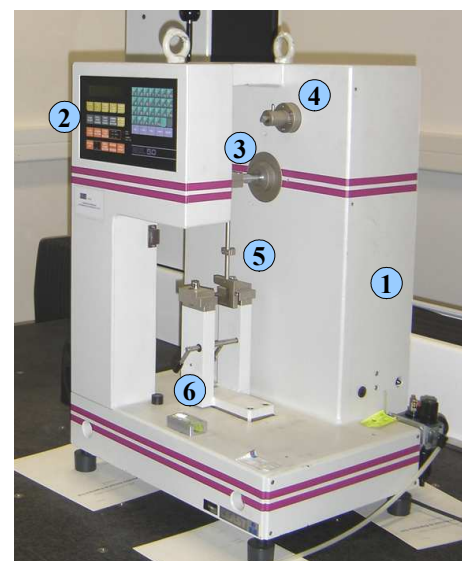
$$W = M_H(\cos\alpha_R - \cos\alpha_0) - W_F - W_D - W_S, \quad (1)$$

onde M_H corresponde ao momento de rotação associado ao pêndulo, W_F representa a variação de energia resultante do atrito no instrumento de medição de deslocamento angular, nos rolamentos do eixo de rotação e no deslocamento do pêndulo no ar, W_D é a variação de energia por deformação elástica do pêndulo e dos apoios do provete durante o choque e W_S corresponde à variação de energia de origem dinâmica que, regra geral e em conjunto com W_D , são consideradas desprezáveis face à variação de energia por atrito, W_F , responsável pelo amortecimento do movimento oscilatório do pêndulo.

2.3 Descrição do equipamento pendular

No conjunto diversificado de equipamentos pendulares dedicados à realização de ensaios de choque Charpy de materiais plásticos, identificam-se como principais componentes (*vide* figura 2):

- ◆ estrutura de apoio, que inclui
 - ◆ instrumento de medição de deslocamento angular;
 - ◆ mecanismo de libertação do pêndulo;
 - ◆ eixo de rotação;
 - ◆ rolamentos do eixo de rotação;
 - ◆ travão;
- ◆ pêndulo, constituído por
 - ◆ haste;
 - ◆ martelo e aresta de choque;
 - ◆ massas adicionais.
- ◆ bigorna ou apoios de provete.



Legenda:
1-estrutura de apoio;
2-painel de parametrização;
3-eixo de rotação;
4- mecanismo de libertação do pêndulo;
5-pêndulo;
6-apoios de provete.

Figura 2: Exemplo de equipamento pendular.

Por vezes, este tipo de equipamento pode ser adaptado à realização de outros tipos de ensaios de choque, nomeadamente, o ensaio de choque Izod ou o ensaio de tracção-choque, mediante a utilização dos acessórios adequados a esse efeito.

3 CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE EQUIPAMENTOS PENDULARES

3.1 Introdução

De acordo com [4], a *caracterização metrológica* é essencial para a *avaliação da adequação de cada instrumento para efectuar medições dentro de determinada gama, com uma exactidão conhecida, obtendo um valor da mensuranda e a estimativa da sua inexactidão*. Esta caracterização metrológica permite identificar as grandezas de influência associadas a um determinado instrumento de medição que traduzem o inevitável afastamento em relação ao seu modelo conceptual ideal.

As secções seguintes são dedicadas à descrição da caracterização metrológica efectuada para o equipamento pendular utilizado no ensaio de choque Charpy de materiais plásticos, reflectindo a sua concretização real imperfeita com base em características próprias de natureza mecânica, dimensional, geométrica ou, ainda, no próprio instrumento de medição de deslocamento angular que engloba.

3.2 Caracterização metrológica mecânica

Numa perspectiva conceptual, o pêndulo de choque do equipamento em estudo pode ser descrito como um pêndulo simples constituído por uma partícula de massa equivalente à do pêndulo de choque, conectada a um ponto de rotação por um fio de comprimento L_p com massa nula. Qualquer afastamento da partícula em relação à sua posição vertical de repouso e conseqüente libertação origina, por acção gravítica, um movimento harmónico simples caracterizado por um período de oscilação, T_p , dado pela expressão [5] (*vide* Anexo 1)

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{L_p}{g}} \quad , \quad (2)$$

onde g é a estimativa da aceleração gravítica local. Note-se que esta expressão apenas é válida para movimentos harmónicos simples de pequena amplitude.

A determinação experimental do período de oscilação do pêndulo permite caracterizar o equipamento em estudo na medida em que torna possível estimar o comprimento do pêndulo (ideal), permitindo a sua posterior comparação com o comprimento de choque (real), L_l , definido como a distância entre o eixo de rotação do equipamento e o ponto da aresta do martelo onde ocorre o choque com o centro da face do provete ensaiado.

De acordo com [3], a adequação do pêndulo ao ensaio proposto está assegurada caso a estimativa do comprimento de choque L_l , obtida por via directa (*vide* figura 3), esteja compreendida

no intervalo $0,99 \cdot L_p \leq L_1 \leq 1,01 \cdot L_p$.

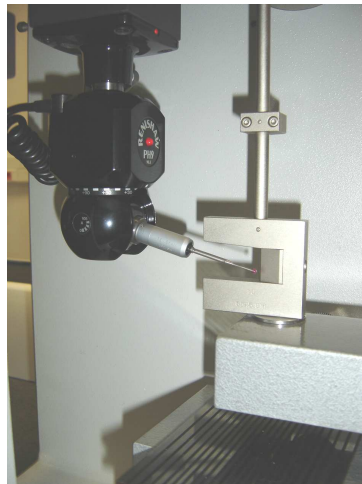


Figura 3: Medição do comprimento de choque do pêndulo usando a máquina de medição por coordenadas 3D.

O método de ensaio indicado em [3] consiste na determinação do tempo, T , que o pêndulo de choque demora a efectuar n oscilações consecutivas, por acção gravítica, após a sua libertação de um ângulo inicial reduzido (aproximadamente, 5°) relativamente à sua posição vertical de repouso. O período de oscilação do pêndulo é dado pela seguinte expressão:

$$T_p = \frac{T}{n} \quad . \quad (3)$$

Com base na estimativa de T_p obtida pela expressão anterior e tendo em conta o modelo matemático (2), o comprimento do pêndulo (ideal) é obtido mediante

$$L_p = \frac{g \cdot T_p^2}{4 \pi^2} \quad . \quad (4)$$

Neste contexto importa referir que, a velocidade de choque do pêndulo corresponde, também, a uma característica metrológica relevante para o ensaio realizado estando a sua determinação experimental contemplada, segundo [3], no ensaio metrológico do equipamento pendular. Esta grandeza dinâmica traduz a variação da energia cinética atribuída ao pêndulo durante o seu movimento a partir da sua posição inicial (em que a sua é velocidade nula) até à posição de choque.

Em condições ideais, esta variação de energia cinética iguala a variação da energia potencial gravítica do pêndulo que corresponde, na prática, à quantidade máxima de energia disponível que o provete pode absorver durante um ensaio de choque. Na generalidade dos equipamentos pendulares, o choque ocorre na posição vertical do pêndulo em repouso na qual a velocidade do pêndulo é máxima durante a realização do ensaio. Neste caso, a velocidade de choque pode ser escrita como

$$v_1 = \sqrt{2 g L_1 (1 - \cos \alpha_0)} \quad , \quad (5)$$

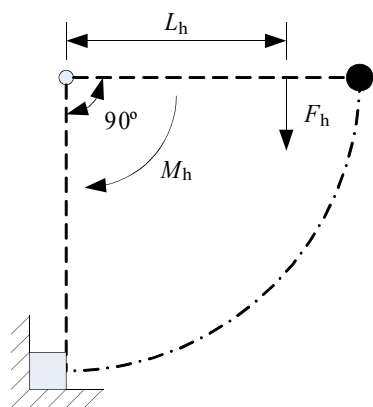
conforme exposto em [5] (*vide* Anexo 1). Com base na estimativa obtida em (5), o julgamento da adequação do pêndulo ao ensaio pretendido consiste na avaliação do cumprimento das tolerâncias citadas na norma vigente (*vide* tabela 2, página 7 de [3]), de acordo com a respectiva energia potencial gravítica nominal associada ao pêndulo.

Após a caracterização metrológica da componente energética cinemática associada ao pêndulo importa, também, determinar o afastamento da sua componente de energia potencial gravítica em relação ao seu modelo conceptual nominal, conforme previsto em [3].

O método de ensaio previsto para a determinação desta característica metrológica consiste na medição do momento de rotação, M_h , do pêndulo de choque numa posição horizontal (situada, aproximadamente, a 90° relativamente à sua posição de repouso) e na medição do ângulo inicial α_0 . A determinação do momento de rotação referido é efectuada, indirectamente, mediante a medição da força vertical, F_h , exercida sobre o pêndulo na posição horizontal e na medição da respectiva distância, L_h , entre o seu ponto de aplicação e o eixo de rotação, ou seja,

$$M_h = F_h \cdot L_h \quad , \quad (6)$$

conforme ilustrado nas figuras 4 e 5.



Figuras 4 e 5: Representação esquemática e experimental da determinação do momento de rotação do pêndulo.

Nestas condições, a energia potencial gravítica do pêndulo é obtida mediante

$$E = M_h (1 - \cos \alpha_0) \quad , \quad (7)$$

sendo esta expressão válida apenas para equipamentos pendulares com ângulos de choque iguais a

zero (o choque ocorre na posição vertical do pêndulo em repouso). Segundo [3], o pêndulo é considerado adequado para utilização no âmbito do ensaio de choque Charpy, caso a estimativa obtida em (7) esteja compreendida no intervalo $\pm 1 \%$ do valor nominal de energia potencial gravítica.

As irreversibilidades associadas à utilização do equipamento pendular durante a realização do ensaio de choque Charpy (ou seja, ao processo de transferência de energia potencial gravítica do pêndulo para energia cinética e posteriormente para energia absorvida pelo provete) constituem características com uma influência significativa na mensuranda de interesse, destacando-se:

- as irreversibilidades de origem dinâmica;
- as irreversibilidades por atrito;
- as irreversibilidades por deformação elástica.

No primeiro caso citado, as irreversibilidades são originadas pela solicitação dinâmica que o pêndulo exerce sobre a estrutura de apoio constituinte do equipamento pendular. Neste âmbito, a massa do pêndulo e da estrutura de apoio, bem como, a rigidez associada ao equipamento pendular na sua totalidade, constituem importantes características metrológicas de natureza mecânica com implicações na energia cinética e potencial gravítica associada ao equipamento em estudo.

Na opinião dos autores do presente documento, a quantificação das características metrológicas supracitadas não deve ser incluída na realização do ensaio metrológico do equipamento pendular visto se tratarem de grandezas que permanecem aproximadamente constantes ao longo do tempo, exceptuando as situações em que o equipamento em causa sofra alguma alteração profunda na sua constituição. Com efeito, cabe ao fabricante do equipamento avaliar a sua adequação ao ensaio pretendido, com base nos requisitos normativos exigidos em [3] (*vide* Anexo 2) para as características metrológicas referidas nesta secção.

Por sua vez, as irreversibilidades por atrito têm por origem o instrumento de medição de deslocamento angular, os rolamentos do eixo de rotação e o deslocamento do pêndulo no ar, constituindo características metrológicas do equipamento pendular utilizado cuja quantificação permite efectuar a correcção sistemática da estimativa da mensuranda de interesse – a energia absorvida – após a realização de um ensaio de choque.

A norma vigente [3] para o ensaio metrológico do equipamento em estudo prevê a determinação experimental da variação de energia por atrito referida anteriormente incidindo, em particular, nos equipamentos pendulares com instrumentos de medição de deslocamento angular

analógicos. Actualmente, a maioria dos equipamentos pendulares utilizados incorpora transdutores de deslocamento angular digitais cuja variação de energia por atrito é, regra geral, desprezável face às restantes contribuições do atrito existente nos rolamentos do eixo de rotação ou do deslocamento do pêndulo no ar.

Neste âmbito e na ausência de indicações normativas para este tipo de equipamentos, é recomendado como método de ensaio a libertação do pêndulo da sua posição inicial com ausência de qualquer elemento impeditivo do seu deslocamento, nomeadamente, provete de ensaio na zona de choque. Nesta situação, o valor de energia absorvida indicada pela cadeia de medição do equipamento pendular pode ser razoavelmente atribuído à variação de energia por atrito citada anteriormente, considerando desprezáveis as irreversibilidades de origem dinâmica.

Independentemente do tipo de equipamento pendular em questão, a norma de ensaio metrológico vigente estabelece os valores máximos de variação de energia por atrito permitidos, de acordo com a energia potencial gravítica nominal associada ao pêndulo utilizado (*vide* tabela 2, página 7 de [3]).

As irreversibilidades por deformação elástica resultam da aplicação da carga de choque sobre o provete ensaiado o qual, durante o conseqüente processo de fractura, exerce forças de reacção sobre os restantes elementos intervenientes – o pêndulo e os apoios de provete – originando a sua deformação elástica. Comparativamente com a magnitude das restantes irreversibilidades citadas, esta contribuição é considerada desprezável, motivo pelo qual a sua caracterização metrológica não está contemplada em [3].

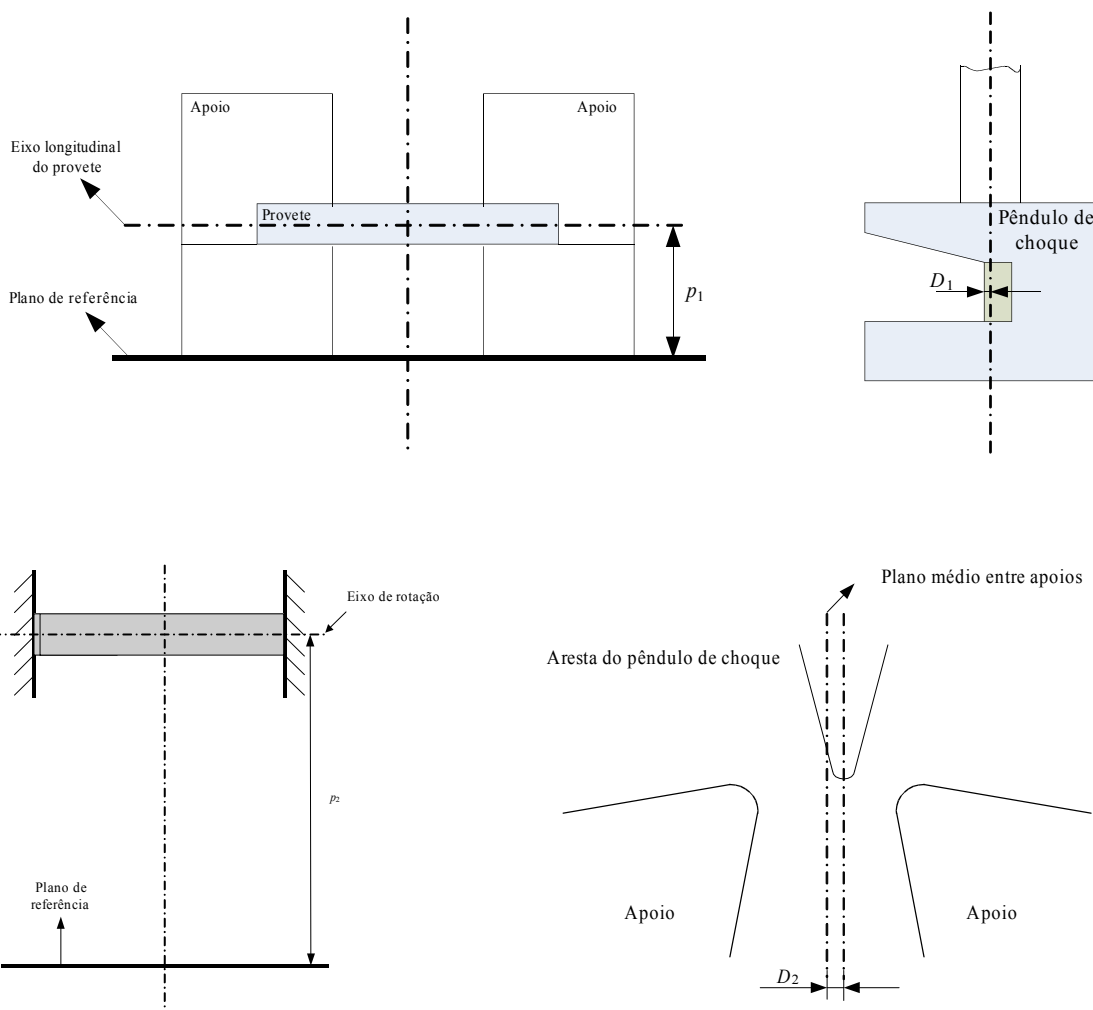
3.3 Caracterização metrológica dimensional e geométrica

As características metrológicas apresentadas nas secções seguintes devem ser quantificadas com recurso aos métodos de ensaio e aos instrumentos de medição previstos em [3], sendo efectuada a avaliação da adequação do equipamento pendular ao ensaio pretendido com base nos intervalos de tolerância das estimativas referidos na norma vigente (*vide*, em particular, as tabelas 3 e 6 de [3]).

3.3.1 Equipamento pendular

Num contexto dimensional e geométrico, o equipamento pendular revela um afastamento relativamente ao seu modelo conceptual, cuja caracterização permite determinar a sua adequação ao ensaio pretendido, envolvendo a quantificação das seguintes grandezas (*vide* figuras 6 a 9):

- paralelismo, p_1 , entre o eixo longitudinal do provete e um plano de referência;
- paralelismo, p_2 , entre o eixo de rotação do pêndulo e um plano de referência;
- folga radial e axial dos rolamentos do eixo de rotação do pêndulo;
- distância, D_1 , entre a aresta de choque e o centro de gravidade do martelo;
- distância, D_2 , do plano médio entre apoios de provete relativamente à aresta de choque.



Figuras 6, 7, 8 e 9: Grandezas dimensionais e geométricas de caracterização do equipamento pendular.

A caracterização metrológica dimensional e geométrica do equipamento pendular, mediante a determinação dos paralelismos referidos anteriormente, tem por pressuposto a existência de planos de referência certificados por parte do fabricante. Note-se que, na sua ausência, a adoção de outras superfícies do equipamento como representativas de um plano de referência pode conduzir à obtenção de resultados que se afastam significativamente das respectivas tolerâncias normativas.

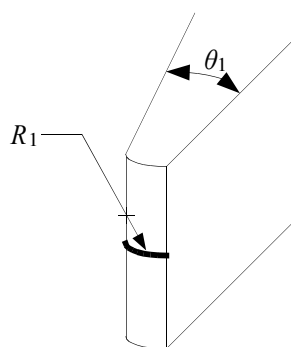
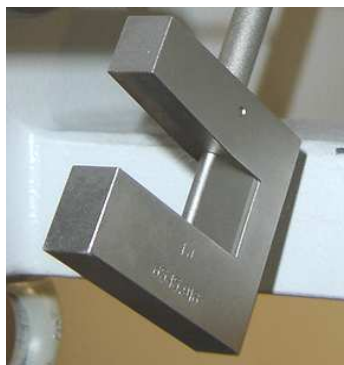
Salienta-se que, a determinação experimental da folga axial e radial dos rolamentos do eixo

de rotação do pêndulo está dependente do acesso a estes elementos constituintes do equipamento pendular. Em caso de impossibilidade de acesso, é considerado que o fabricante do equipamento tem a responsabilidade de assegurar a sua conformidade decorrente do respectivo processo de montagem.

Destaca-se, também, como característica dimensional, a distância D_2 entendendo-se que esta depende do tipo de apoios de provete incorporado no equipamento pendular. Caso se tratem de apoios ajustáveis, isto é, existindo a possibilidade de variar a distância entre apoios de provete nos diversos ensaios de choque realizados, a determinação desta característica metrológica não deve ser incluída no ensaio metrológico do equipamento em estudo. Com efeito, qualquer alteração posterior decorrente da sua utilização no contexto experimental pode conduzir à existência de diferenças significativas entre as estimativa obtidas, respectivamente, no ensaio metrológico do equipamento e num ensaio corrente de choque. Neste caso, é recomendável incorporar no respectivo procedimento de ensaio de choque Charpy a medição prévia da distância D_2 e conseqüente avaliação de conformidade de acordo com o estipulado em [3].

3.3.2 Pêndulo de choque

No que respeita ao pêndulo de choque (*vide* figura 10), as características metrológicas dimensionais e geométricas mais relevantes no contexto do ensaio de choque Charpy são o raio de curvatura, R_1 , e o ângulo de abertura, θ_1 , cuja ilustração esquemática consta na figura 11.



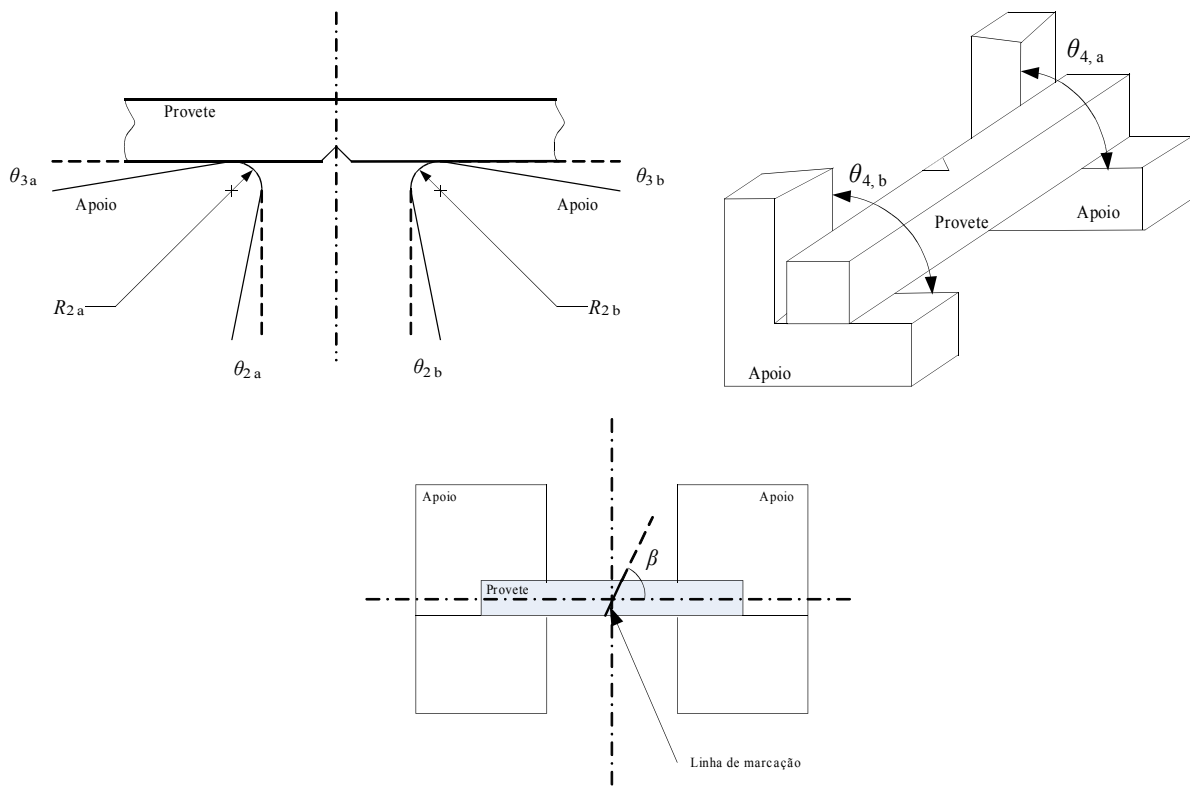
Figuras 10 e 11: Aresta do pêndulo de choque (à esquerda) e respectiva representação esquemática (à direita).

A inclusão destes elementos dimensionais e geométricos no ensaio metrológico do equipamento pendular permite constatar a existência de deformações plásticas significativas na aresta do pêndulo de choque em virtude dos choques promovidos com a realização dos ensaios.

3.3.3 Apoios de provetes

No caso dos apoios de provetes constituintes do equipamento pendular em estudo enumeram-se, em seguida, as características metrológicas dimensionais e geométricas mais relevantes neste contexto e que constam nas figuras 12 a 14:

- raio de curvatura, R_2 ;
- ângulo θ_2 ;
- ângulo θ_3 ;
- ângulo θ_4 ;
- ângulo de perpendicularidade, β ;
- distância entre o plano de simetria dos apoios e o mecanismo auxiliar de alinhamento.



Figuras 12, 13 e 14: Representações esquemáticas dos apoios de provete e respectivas características metrológicas.

Do conjunto de grandezas citadas destaca-se o ângulo de perpendicularidade, β , cujo método de ensaio descrito na norma vigente [3] prevê a marcação da aresta de choque na superfície de um provete. Com efeito, na realização do ensaio metrológico é efectuado o revestimento da superfície de um provete normalizado com papel branco e, no caso da aresta de choque, o revestimento é realizado com papel químico, permitindo que a face contendo a substância de marcação fique voltada para o exterior da aresta. A marcação é efectuada afastando ligeiramente o pêndulo da sua

posição de repouso promovendo, em seguida, a sua libertação e conseqüente choque com o provete sem provocar a sua fractura.

Frequentemente, os apoios do equipamento pendular possuem um mecanismo que visa a materialização do plano de simetria entre apoios permitindo, deste modo, o correcto posicionamento do provete ensaio, em particular, o alinhamento do entalhe do provete com o referido plano de simetria. A inevitável imperfeição na materialização do plano de simetria constitui uma característica metrológica que importa avaliar.

Para tal, é necessário determinar o respectivo ponto médio entre apoios e proceder à medição da sua distância ao mecanismo auxiliar de alinhamento. A posterior avaliação da sua adequação tem em conta as tolerâncias referidas em [3]. No entanto, considera-se que esta caracterização só deve ser incluída no ensaio metrológico de equipamentos com apoios de provetes não-ajustáveis, conforme justificado anteriormente em 3.3.1.

3.4 Caracterização metrológica do instrumento de medição de deslocamento angular

O equipamento pendular possui um instrumento de medição de deslocamento angular (analógico ou digital), associado ao movimento do pêndulo de choque, que permite a determinação das estimativas do ângulo inicial de libertação do pêndulo e do ângulo de subida após o choque com o provete em ensaio, grandezas fundamentais no contexto do ensaio de choque Charpy.

Neste tipo de instrumentos de medição, a resolução corresponde, frequentemente, à característica metrológica dominante sendo relevante salientar, também, os erros de paralaxe, a espessura e o atrito do ponteiro, no caso de instrumentos analógicos, e a estabilidade no caso de instrumentos digitais.

De acordo com [3], o ensaio metrológico do equipamento pendular deve incluir a calibração do instrumento de medição de deslocamento angular o que torna possível avaliar o nível de exactidão da indicação da cadeia de medição e a respectiva fiabilidade no desempenho das suas funções enquanto elemento constituinte do equipamento pendular. Adicionalmente, é assegurada a sua ligação à cadeia de rastreabilidade do LNEC e, conseqüentemente, a sua integração no Sistema Internacional (SI) no domínio do Comprimento.

De referir ainda que, segundo [3], a calibração efectuada deve conter pelo menos cinco patamares correspondendo, aproximadamente, a 10 %, 20 %, 30 %, 50 % e 70 % da gama de medição do instrumento ensaiado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo apresenta a caracterização metrológica de equipamentos pendulares utilizados em ensaios de choque Charpy de materiais plásticos visando a correcta avaliação da sua adequação ao ensaio pretendido.

No presente documento são enumeradas as características metrológicas mais relevantes neste tipo de equipamentos de ensaio tendo em conta o contexto normativo aplicável e a sua concretização prática mediante a realização de ensaio metrológico dedicado.

A caracterização efectuada abrange aspectos de natureza mecânica, dimensional, geométrica e, ainda, o instrumento de medição de deslocamento angular, os quais contribuem de forma significativa para o nível de exactidão atribuído à mensuranda de interesse num ensaio de choque Charpy: a energia absorvida.

A realização de estudos de caracterização metrológica no NQM, em resultado de solicitações de outros sectores do LNEC, evidência uma crescente motivação para a garantia da qualidade metrológica dos equipamentos de ensaio e instrumentos de medição utilizados nas actividades laboratoriais que efectuam, em particular, no contexto do Sistema Português da Qualidade. Adicionalmente, este tipo de estudos constitui um importante elemento bibliográfico de apoio à definição de métodos e procedimentos adoptados pelo LCAM/LNEC, no âmbito da sua actividade de calibração e ensaio metrológico de instrumentação científica com aplicação na Engenharia Civil.

VISTOS

O Director do CIC,



Carlos Oliveira Costa

AUTORIA



Luís Filipe Lages Martins

Eng.º Mecânico
Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica



Álvaro Silva Ribeiro

Lic.º em Física Tecnológica, Doutor
Investigador Auxiliar, Chefe do NQM

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Silva Ribeiro, A. e Lages Martins, L., *Procedimento de ensaio metrológico de equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos*, Relatório 6/2009–NQM, Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Janeiro de 2009.
- [2] EN ISO 179-1 – *Plastics. Determination of Charpy impact properties. Part 1: Non-instrumented impact test*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica (Portugal), 2000.
- [3] EN ISO 13802 – *Plastics. Verification of pendulum impact-testing machines. Charpy, Izod and tensile impact-testing*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica (Portugal), 2006.
- [4] Rabinovich, S. G., *Measurement Errors and Uncertainties – Theory and Practice*, 2nd edition, New York (EUA): AIP Press, 2000.
- [5] Alonso, M. e Finn, E., *Física – um curso universitário*, Volume I – Mecânica, São Paulo (Brasil): Editora Edgard Blücher, 1972.

ANEXO 1 – RELAÇÕES CINEMÁTICAS E ENERGÉTICAS ASSOCIADAS AO MOVIMENTO DE UM PÊNDULO

O movimento harmónico simples de um pêndulo constituído por uma partícula de massa m e um fio de comprimento L_p (com massa nula e garantindo a conexão a um ponto de rotação O), resulta do afastamento da partícula desde a sua posição vertical de repouso até à posição B, correspondente ao ângulo α_0 , e da sua conseqüente libertação originando, deste modo, um movimento oscilatório entre a posição B e a posição B', conforme ilustrado na figura A1.

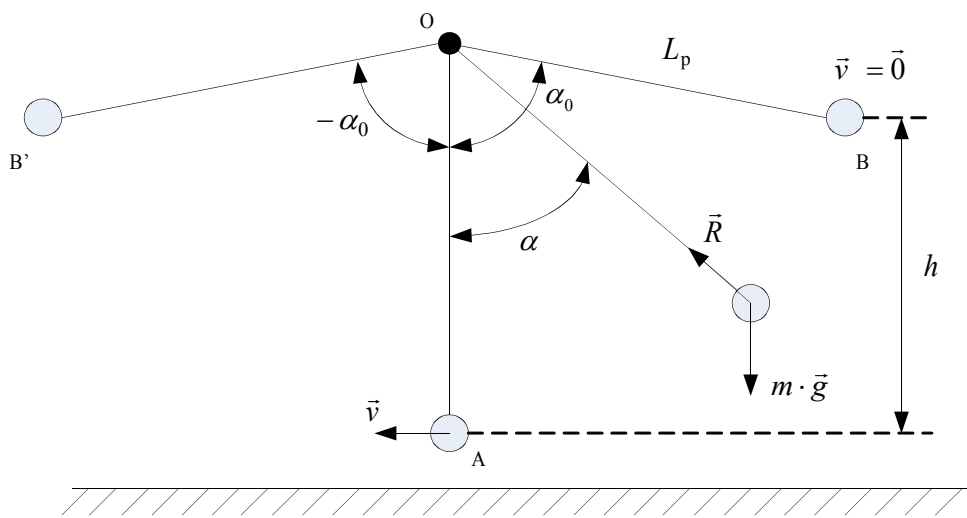


Figura A1: Representação esquemática do movimento oscilatório de um pêndulo.

Nestas condições, a força resultante, F_t , originada pelo peso da partícula e pela força de reacção do fio, corresponde a

$$F_t = -m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (\text{A1})$$

onde g é a aceleração gravítica local.

Pela segunda Lei de Newton é possível escrever

$$m \cdot L_p \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (\text{A2})$$

ou seja,

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{g}{L_p} \cdot \sin \alpha = 0. \quad (\text{A3})$$

No caso de oscilações de reduzida amplitude, é possível considerar que $\sin \alpha \sim \alpha$ pelo que a expressão anterior passa a ser escrita como

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{L_p}\alpha = 0 \quad . \quad (A4)$$

Esta equação diferencial em ordem a α possui como solução analítica uma expressão do tipo

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \quad , \quad (A5)$$

que define o movimento harmónico simples da partícula com amplitude máxima do movimento oscilatório, α_0 , em relação à origem, fase inicial ϕ e frequência angular ω igual a

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L_p}} \quad . \quad (A6)$$

Com efeito, o período de oscilação do pêndulo, T_p , é dado por

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{L_p}{g}} \quad . \quad (A7)$$

Deste modo, conhecida a estimativa do período de oscilação do pêndulo, a expressão apresentada permite determinar o comprimento do pêndulo mediante

$$L_p = \frac{g \cdot T_p^2}{4\pi^2} \quad . \quad (A8)$$

Numa perspectiva ideal, é considerada válida a conservação da energia da partícula durante o seu movimento oscilatório pelo que, a variação da sua energia potencial gravítica entre a posição B (onde a velocidade da partícula é nula) e a posição A (onde a velocidade da partícula é máxima) é igual à variação da sua energia cinética, ou seja,

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h \quad . \quad (A9)$$

Nestas condições, a velocidade da partícula na posição A é dada por

$$v = \sqrt{(2g \cdot h)} \quad , \quad (A10)$$

em que

$$h = L_p (1 - \cos \alpha_0) \quad . \quad (A11)$$

ANEXO 2 – REQUISITOS NORMATIVOS RELATIVOS À MASSA E À RIGIDEZ DO EQUIPAMENTO PENDULAR

Atendendo à influência que as grandezas massa do pêndulo, massa da estrutura de apoio e rigidez do equipamento pendular possuem no contexto das irreversibilidades de origem dinâmica, existe um conjunto de requisitos normativos cuja relevância justifica a sua descrição no presente anexo, embora a sua avaliação prática esteja atribuída ao fabricante do equipamento, conforme justificado anteriormente na página 10.

No que respeita à grandeza massa, a norma vigente refere que o rácio entre a massa da estrutura de apoio, m_f , e a massa atribuída ao pêndulo utilizado, m_p , deverá ser, pelo menos, igual a 40, caso contrário a estrutura de apoio será obrigatoriamente fixa a um banco de ensaio rígido.

Segundo [3], o valor do rácio acima apresentado garante que as medições de energia absorvida, W , realizadas no equipamento pendular até 70 % do valor de energia potencial do pêndulo, E , sejam efectuadas de modo a que a energia absorvida pela estrutura, W_f , (por efeito dinâmico) seja inferior a 0,5 % do valor de E .

A relação entre as grandezas acima citadas é dada por

$$\frac{m_f}{m_p} = \left[1 - \sqrt{\frac{1 - (W + W_f)}{E}} \right]^2 \frac{E}{W_f}, \quad (\text{A12})$$

e cuja dedução consta do anexo B de [3], tendo por fundamento o princípio da conservação do momento linear e o princípio da conservação da energia aplicados ao caso do choque entre o pêndulo e a estrutura de apoio.

Por sua vez, a rigidez associada ao equipamento pendular na sua totalidade, s_f , deverá satisfazer, de acordo com [3], a seguinte inequação

$$s_f \geq \frac{7,7 \times 10^4 m_p}{T_p^2}, \quad (\text{A13})$$

em que m_p e T_p correspondem, respectivamente, à massa e ao período de oscilação do pêndulo.

É, portanto, necessário obter experimentalmente uma estimativa da grandeza s_f para avaliar o requisito normativo acima mencionado. Do conjunto de métodos de ensaio disponíveis, a norma vigente refere a medição de um deslocamento s provocado pela aplicação de uma força horizontal, F_f , na estrutura de apoio e segundo a direcção de choque. Nestas condições, a rigidez do

equipamento pendular é dada pela expressão

$$s_f = \frac{F_f}{S} . \quad (\text{A14})$$

Alternativamente, é possível proceder à determinação experimental do período de oscilação da estrutura de apoio, T_f , mediante a aplicação de solicitações dinâmicas na direcção de choque e com período de oscilação conhecido. A resposta de excitação da estrutura de apoio permite avaliar a sua proximidade ao fenómeno da ressonância (a amplitude de vibração forçada da estrutura atinge o seu valor máximo), o qual ocorre quando T_f iguala o período de oscilação imposto. De acordo com a norma vigente, o valor obtido de T_f deverá satisfazer a seguinte inequação:

$$T_f \leq \frac{T_p}{7} . \quad (\text{A15})$$

