



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/11/16134

PROCEDIMENTO DE ENSAIO METROLÓGICO DE EQUIPAMENTO PENDULAR PARA ENSAIOS DE CHOQUE CHARPY DE MATERIAIS PLÁSTICOS

Estudo realizado no âmbito do Projecto de Investigação
“Reforço das Capacidades Metrológicas nos Domínios das
Grandezas Comprimento, Massa, Pressão e Temperatura”

Lisboa • Janeiro de 2009

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 6/2009 – NQM

Procedimento de Ensaio Metrológico de Equipamento Pendular para Ensaios de Choque Charpy de Materiais Plásticos

Resumo

O presente relatório apresenta um procedimento para o ensaio metrológico de equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos, elaborado no LCAM/LNEC.

Metrological Testing Procedure of Pendulum Equipment used for Charpy Impact Tests of Plastic Materials

Abstract

This report presents a procedure for the metrological testing of pendulum equipment used for Charpy impact tests of plastic materials, developed at LCAM/LNEC.

Procédure d'Éssai Métrologique d'Équipement Pendulaire utilisé dans les Essais de Choc Charpy sur Matériaux Plastiques

Résumé

Ce rapport présente une procédure pour l'essai métrologique d'équipement pendulaire utilisé dans les essais de choc Charpy sur matériaux plastiques, élaborée au LCAM/LNEC.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. CONTEÚDO DO RELATÓRIO	3
Anexo 1 Procedimento de Ensaio Metrológico de Equipamento Pendular para Ensaios de Choque Charpy de Materiais Plásticos	5

PROCEDIMENTO DE ENSAIO METROLÓGICO DE EQUIPAMENTO PENDULAR PARA ENSAIOS DE CHOQUE CHARPY DE MATERIAIS PLÁSTICOS

1 INTRODUÇÃO

No âmbito do processo “Reforço das Capacidades Metrológicas nos domínios das grandezas Comprimento, Massa, Pressão e Temperatura” o Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica tem promovido, entre outros estudos, a elaboração de procedimentos aplicáveis à calibração de instrumentos de medição e ao ensaio de equipamentos laboratoriais.

Esta actividade, considerada de significativo interesse para o Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM/LNEC), inserido no NQM, está orientada, principalmente, para a satisfação das necessidades dos laboratórios de ensaio do LNEC ou de clientes externos.

Os referidos procedimentos, embora baseados, sempre que tal seja possível, em normas portuguesas, estrangeiras ou internacionais, têm, em regra, uma componente específica estudada em função das capacidades metrológicas do LCAM/LNEC e das tipologias dos instrumentos ou equipamentos a calibrar ou ensaiar.

Neste contexto, foram até agora preparados e revistos em versões melhoradas cerca de 40 procedimentos diferentes, contendo indicações pormenorizadas, tais como a descrição do equipamento de referência a utilizar, a descrição dos ensaios a realizar, a identificação dos resultados e dos desvios de calibração a quantificar e o conteúdo dos certificados a emitir.

O interesse da publicação periódica deste tipo de documentos resulta da introdução de novos procedimentos, situação que ocorre neste caso, ou da necessidade de introdução de revisões periódicas destes documentos ditada pela evolução dos processos operativos e pela adopção de normas mais exigentes, encontrando-se associados ao âmbito de acreditação do LCAM/LNEC no quadro do Sistema Português da Qualidade.

O objectivo desta iniciativa é divulgar a informação actualizada, ainda que de uma forma reservada, aos clientes do LCAM/LNEC, que assim poderão interpretar melhor os resultados das calibrações ou ensaios realizados.

2 CONTEÚDO DO RELATÓRIO

No presente relatório é divulgado, em anexo, o Procedimento E2.20 designado por “Procedimento de Ensaio Metrológico de Equipamento Pendular para Ensaios de Choque Charpy de Materiais Plásticos” (Versão 01), o qual foi elaborado visando a verificação de um conjunto de requisitos normativos estabelecidos na norma de referência EN ISO 13802 (2006) – *Plastics. Verification of pendulum impact-testing machines. Charpy, Izod and tensile impact-testing.*

Este procedimento engloba um conjunto de ensaios que visam avaliar um conjunto de características metrológicas e o desempenho do sistema de medição no que se refere a grandezas de influência no ensaio de choque Charpy e, subsequentemente, verificar a sua conformidade com os requisitos normativos aplicáveis. O conjunto de ensaios que é objecto de avaliação é enumerado em seguida:

- a) determinação do comprimento do pêndulo;
- b) determinação do comprimento de choque;
- c) determinação da energia potencial gravítica do pêndulo e da velocidade de choque;
- d) verificação dimensional e geométrica da aresta de choque do pêndulo;
- e) verificação dimensional e geométrica dos apoios de provete;
- f) verificação da exactidão da escala angular;
- g) determinação da variação de energia por atrito.

A concretização destes ensaios é desenvolvida nas instalações do LCAM/LNEC com recurso a padrões de referência do laboratório rastreados aos padrões primários das grandezas mensuráveis em causa, garantindo a necessária rastreabilidade e assegurando o cumprimento dos requisitos normativos aplicáveis.

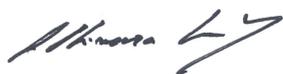
Parte do processo de medição e de aquisição de dados foi efectuado com recurso a uma aplicação computacional dedicada à medição de grandezas dimensionais e geométricas no espaço tridimensional, encontrando no procedimento descrito os elementos necessários à sua inicialização e operação. Este sistema (máquina de medição de coordenadas e aplicação computacional) está inserido no âmbito de acreditação do Laboratório Central de Apoio Metrológico do LNEC e os resultados obtidos são enquadráveis nesse contexto.

Finalmente, refira-se que o documento enumera, adicionalmente, as tolerâncias aplicáveis, as particularidades dos resultados obtidos nos ensaios desenvolvidos e indica a informação a inserir nos certificados de ensaio metrológico.

LNEC, Lisboa, Janeiro de 2009

VISTOS

O Director do CIC,



Carlos Oliveira Costa

AUTORIA



Álvaro Silva Ribeiro

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



Luís Filipe Lages Martins

Eng.º Mecânico
Bolsheiro de Iniciação à Investigação Científica



João Onofre Benevente

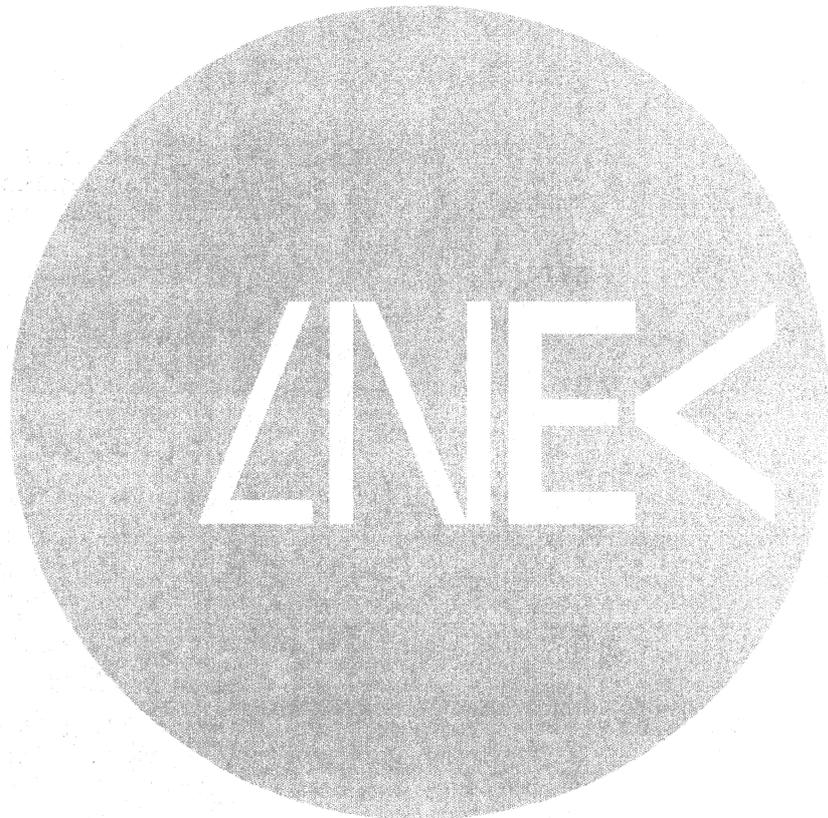
Eng.º Técnico
Técnico Especialista Principal

ANEXO 1

Procedimento para Ensaio Metrológico de Equipamento Pendular para Ensaio de Choque Charpy de Materiais Plásticos



Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Centro de Instrumentação Científica
Laboratório Central de Apoio Metrológico



Procedimento LCAM/LNEC E2.20 – V.01

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

INDICE

1 – ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA	3
2 - PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO	3
3 - MÉTODOS DE ENSAIO.....	3
4 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO METROLÓGICO	5
4.1 - INTRODUÇÃO.....	5
4.2 - CAPACIDADE DO LCAM/LNEC PARA REALIZAR O ENSAIO METROLÓGICO DE EQUIPAMENTOS PENDULARES PARA ENSAIOS DE CHOQUE CHARPY DE MATERIAIS PLÁSTICOS.....	5
4.3 - PREPARAÇÃO DO ENSAIO	5
4.4 – INSPECÇÃO VISUAL	6
4.5 – ENSAIO METROLÓGICO	6
4.6 – DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	19
4.7 – CERTIFICADO DE ENSAIO METROLÓGICO	19
5 – DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA.....	20
ANEXO 1 – BREVE DESCRIÇÃO FUNCIONAL DA APLICAÇÃO COMPUTACIONAL METROLOG XG®	21

1 – ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA

O Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM/LNEC) realiza o ensaio metrológico de equipamentos pendulares para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos (com indicação digital), de forma a avaliar a sua conformidade relativamente aos requisitos metrológicos especificados na norma EN ISO 13802:2006 [1].

Este documento descreve os princípios, os métodos e os procedimentos associados à medição das grandezas mecânicas (nomeadamente, dimensionais e geométricas) que caracterizam o equipamento de ensaio em causa e asseguram a sua adequação à utilização pretendida.

Para realizar o ensaio referido, o LCAM/LNEC dispõe do seguinte equipamento de referência para as diversas grandezas (rastreado aos padrões primários respectivos):

- grandeza tempo: *cronómetro digital (n.º inf. LNEC 5.10)*;
- grandezas dimensionais e geométricas: *máquina de medição de coordenadas tridimensional (n.º inf. LNEC 203.01)*;
- grandeza força: *célula de carga (n.º inf. LMF EQ01) e respectiva ponte de medição associada (n.º inf. LMF EQ34)*; *transdutor de força (n.º inf. 33.08)*.

2 - PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO

O princípio de medição associado às grandezas dimensionais e geométricas de interesse consiste na determinação de coordenadas num espaço tridimensional e no desenvolvimento matemático de elementos geométricos (linhas, circunferências, planos, entre outros) em suporte computacional.

No que respeita às restantes grandezas mecânicas, o seu princípio de medição é fundamentado na acção gravítica que é exercida no pêndulo de choque enquanto elemento constitutivo do equipamento de ensaio.

3 - MÉTODOS DE ENSAIO

O método de ensaio associado à grandeza comprimento do pêndulo consiste na medição directa da grandeza período de oscilação mediante a determinação do intervalo de tempo que o pêndulo de choque demora a efectuar um número específico de

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

oscilações consecutivas, por acção gravítica, após a sua libertação de um ângulo inicial relativamente à sua posição de repouso.

O método de ensaio para medição de grandezas dimensionais e geométricas (comprimento de choque, parâmetros dimensionais e geométricos da aresta de choque e dos apoios de provete) baseia-se na medição de coordenadas num espaço tridimensional permitindo a construção de elementos geométricos em suporte computacional e a sua consequente medição.

Por sua vez, o método de ensaio para determinação da energia potencial gravítica do pêndulo consiste na medição do momento de rotação do pêndulo de choque na posição horizontal (situada a 90° relativamente à sua posição de repouso) e na medição do ângulo inicial de ensaio. A determinação do momento de rotação é obtida de forma indirecta mediante a medição da força vertical exercida sobre o pêndulo na posição horizontal e na medição da respectiva distância entre o seu ponto de aplicação e o eixo de rotação.

No que se refere à velocidade de choque, esta é obtida por medição indirecta mediante o conhecimento do valor da aceleração gravítica local, do comprimento de choque do pêndulo e do ângulo estabelecido entre a sua posição inicial de ensaio e a sua posição de repouso.

No que respeita à grandeza variação de energia por atrito¹, o método de ensaio aplicado consiste na libertação do pêndulo da sua posição inicial de ensaio (situada, aproximadamente, a 150° relativamente à sua posição de repouso) com ausência de qualquer elemento impeditivo do seu deslocamento, nomeadamente, de um provete de ensaio na zona de choque. Com efeito, a estimativa desta grandeza resulta da medição indirecta do valor de energia absorvida (indicado pela cadeia de medição do equipamento pendular) cuja origem se atribui, maioritariamente, à perda de energia resultante do efeito do atrito existente ao nível dos apoios do eixo de rotação e da reacção provocada pelo deslocamento do pêndulo no meio envolvente.

As estimativas das grandezas obtidas pelos métodos de ensaio acima mencionados são comparáveis com os intervalos de tolerância definidos na norma de referência adoptada [1] permitindo, dessa forma, proceder à avaliação da sua conformidade.

¹ Tradução livre da designação normativa *energy losses due to friction*.

4 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO METROLÓGICO

4.1 - Introdução

Apresenta-se, em seguida, o procedimento para ensaio metrológico de equipamentos pendulares para ensaio de choque Charpy de materiais plásticos, elaborado pelo LCAM/LNEC.

4.2 - Capacidade do LCAM/LNEC para realizar o ensaio metrológico de equipamentos pendulares para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

Quando solicitado para efectuar o ensaio metrológico de equipamentos pendulares para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos, o LCAM/LNEC avaliará a sua capacidade para efectuar esta operação tendo em conta as dimensões do equipamento em causa, as mensurandas, os níveis de exactidão requeridos e o tipo de indicador da escala (analógico ou digital).

4.3 - Preparação do ensaio

Efectuar a limpeza do equipamento a ensaiar, incluindo pêndulo(s) de choque e apoios de provete, utilizando um pano macio e álcool.

Remover painéis de protecção contra projecção de provetes ensaiados, caso seja aplicável.

Inicializar a aplicação *Metrolog XG*[®] (adiante designada por “aplicação computacional”) associada à operação da máquina de medição de coordenadas tridimensional. Efectuar a determinação da posição e do valor do raio da ponteira (com base no valor de referência da esfera-padrão) para as várias posições de medição, extensões e ponteiras a utilizar durante o ensaio.

Colocar o equipamento a ensaiar na mesa-plano da máquina de medição de coordenadas tridimensional pelo menos 12 horas antes de executar o ensaio e efectuar as correspondentes ligações eléctricas e pneumáticas (caso seja aplicável). A orientação do equipamento deverá ser adequada à movimentação da cabeça de medição da máquina de medição de coordenadas tridimensional.

Ligar os equipamentos envolvidos no ensaio metrológico, pelo menos, uma hora antes da execução do ensaio metrológico e efectuar o ajuste de zero, caso seja aplicável.

4.4 – Inspeção visual

Observar o aspecto do equipamento a ensaiar, em particular, as superfícies onde se pretende efectuar as medições e anotar eventuais sinais de degradação, riscas superficiais, efeitos de oxidação e deformações plásticas em faces e arestas.

4.5 – Ensaio metrológico

O ensaio metrológico de equipamentos pendulares para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos consta de sete partes enumeradas em seguida:

- a) determinação do comprimento do pêndulo;
- b) determinação do comprimento de choque;
- c) determinação da energia potencial gravítica do pêndulo e da velocidade de choque;
- d) verificação dimensional e geométrica da aresta de choque do pêndulo;
- e) verificação dimensional e geométrica dos apoios de provete;
- f) verificação da exactidão da escala angular;
- g) determinação da variação de energia por atrito.

A – Ensaio de determinação do comprimento do pêndulo

- a. Efectuar a montagem do pêndulo de choque a ensaiar no eixo de rotação do equipamento pendular;*
- b. Colocar o pêndulo de choque na posição angular de 5° relativamente à sua posição vertical de repouso;*
- c. Libertar o pêndulo de choque e iniciar a medição do intervalo de tempo decorrido até que se cumpram 50 oscilações completas consecutivas;*
- d. Calcular o período de oscilação do pêndulo, T_p , definido como o quociente entre o intervalo de tempo determinado em c. e o número de oscilações completas consecutivas mencionado, também, no ponto anterior;*
- e. Repetir b., c. e d. três vezes e calcular o valor médio do período de oscilação do pêndulo, \bar{T}_p , e o correspondente desvio-padrão experimental da média que quantifica a repetibilidade do ensaio realizado; este último parâmetro deverá ser*

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

inferior a 0,2 % do valor obtido para \bar{T}_p , caso contrário será necessário repetir os pontos b., c., d. e e. até ser cumprido este requisito;

- f. Utilizar os valores da aceleração gravítica local, g , (no caso, das instalações do LCAM/LNEC) e do valor médio do período de oscilação, \bar{T}_p , obtido no ponto anterior, para determinar o comprimento do pêndulo, L_p , mediante a seguinte expressão:

$$L_p = \frac{g \bar{T}_p^2}{4 \pi^2}; \quad (1)$$

- g. Repetir as operações anteriores para quaisquer outros pêndulos de choque associados ao equipamento em ensaio.

B – Ensaio de determinação do comprimento de choque

- a. Efectuar a montagem do pêndulo de choque a ensaiar no eixo de rotação do equipamento pendular;
- b. Fixar o pêndulo de choque na sua posição vertical de repouso mediante o recurso a elementos auxiliares de fixação adequados para este efeito;
- c. Com recurso à aplicação computacional, efectuar a construção geométrica do eixo de rotação do equipamento e do eixo da haste do pêndulo com base na definição de quatro circunferências (de acordo com o disposto na figura 1) mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos, aproximadamente, equidistantes em cada circunferência;
- d. Determinar o ponto de intersecção dos dois eixos criados em c. e definir como sistema de referência um sistema de eixos XYZ com origem no ponto de intersecção mencionado, cujo eixo Z encontrar-se-á alinhado segundo o eixo da haste do pêndulo e cujo eixo Y encontrar-se-á alinhado com o eixo de rotação;
- e. Construir as linhas 1 e 2, representadas na figura 2, com base na determinação das coordenadas espaciais de pontos situados ao longo do plano XZ, e determinar os correspondentes pontos de intersecção das linhas criadas com o eixo Z;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

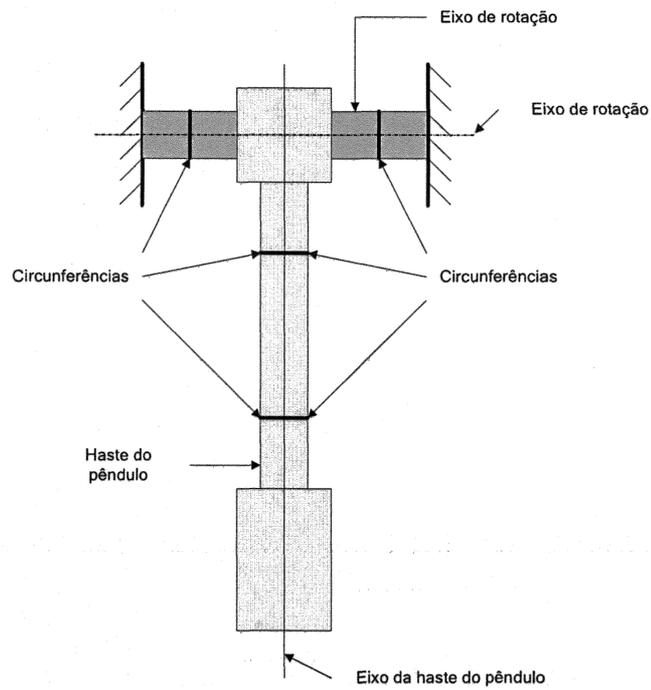


Figura 1 – Representação esquemática da localização das circunferências.

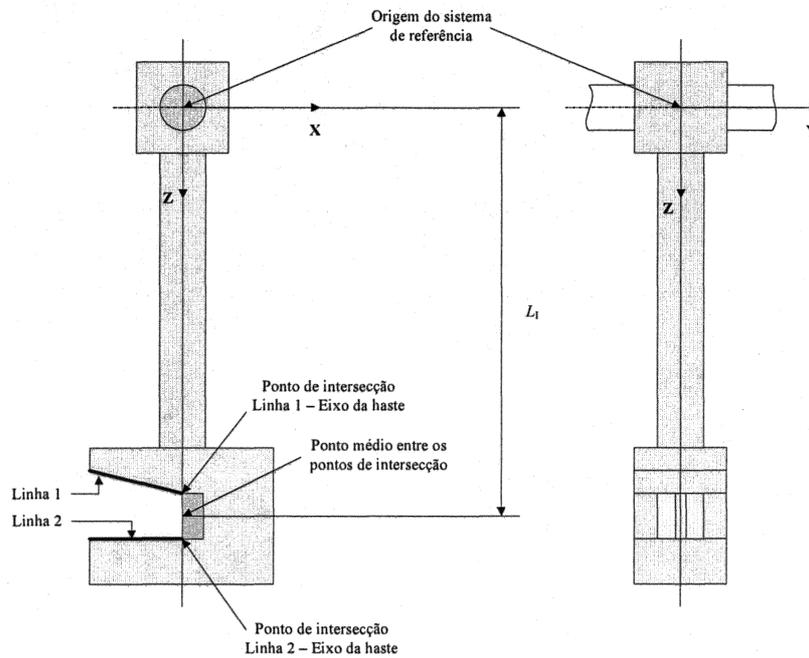


Figura 2 – Representação esquemática dos elementos geométricos necessários à determinação do comprimento de choque.

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

- f. Determinar o ponto médio situado entre os pontos de intersecção obtidos em e. e medir a distância entre este e o ponto de origem do sistema de referência projectada no eixo Z, ou seja, o comprimento de choque L_1 ;
- g. Avaliar a conformidade do requisito da norma de ensaio que estabelece que $0,99 \cdot L_p \leq L_1 \leq 1,01 \cdot L_p$, onde L_p corresponde ao comprimento do pêndulo determinado no ensaio A;
- h. Repetir as operações anteriores caso existam outros pêndulos de choque associados ao equipamento em ensaio.

C – Ensaio de determinação da energia potencial gravítica do pêndulo e da velocidade de choque

- a. Efectuar a montagem do pêndulo de choque a ensaiar no eixo de rotação do equipamento pendular;
- b. Fixar o pêndulo de choque na sua posição vertical de repouso mediante o recurso a elementos auxiliares de fixação adequados para este efeito;
- c. Com recurso à aplicação computacional, efectuar a construção de um sistema de referência conforme exposto nos pontos c. e d. do ensaio B para determinação do comprimento de choque;
- d. Deslocar o pêndulo de choque para uma posição, aproximadamente, horizontal e impedir o seu movimento por acção gravítica mediante a interposição de uma célula de carga entre o pêndulo e uma coluna vertical ajustável, conforme ilustrado na figura 3 (note-se que a superfície superior da célula de carga deve estar totalmente em contacto com a superfície do pêndulo);
- e. Efectuar a construção geométrica do eixo horizontal da haste do pêndulo com base na definição de duas circunferências (conforme constam na figura 3) usando a aplicação computacional, mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos, aproximadamente, equidistantes por cada circunferência e determinar o ângulo estabelecido entre os eixos horizontal e vertical da haste do pêndulo no plano XZ;
- f. Proceder ao ajuste da posição horizontal do pêndulo (mediante o recurso à coluna vertical) e consequente medição do ângulo entre os eixos até que este corresponda a $(90,00 \pm 0,05)^\circ$;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

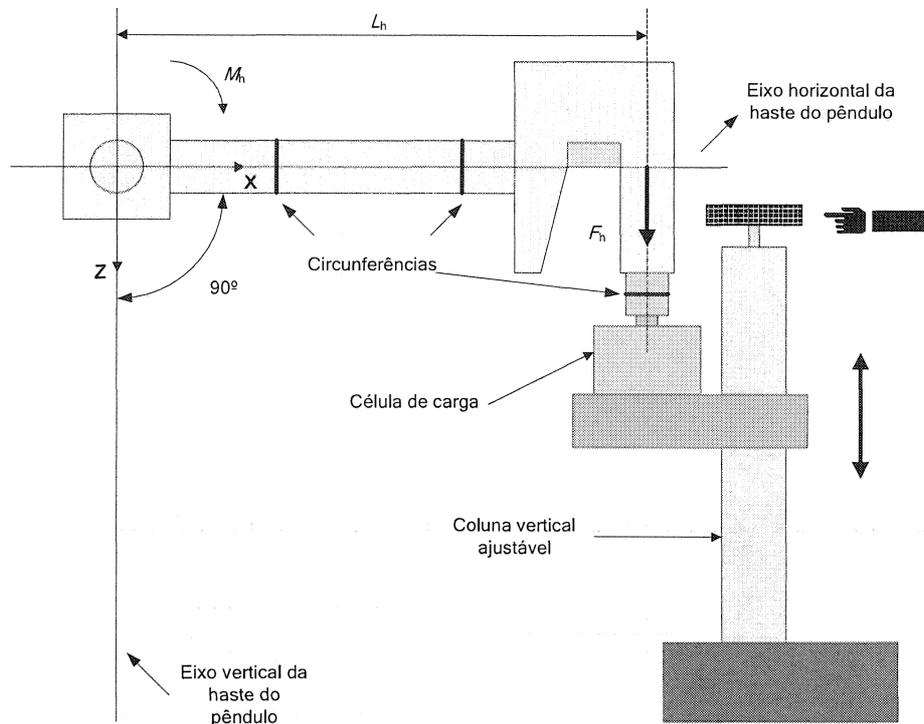


Figura 3 – Representação esquemática da montagem experimental para a determinação da energia potencial gravítica do pêndulo de choque.

- g. Determinar o centro geométrico de uma circunferência na célula de carga (vide figura 3) mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos; o ponto obtido deverá encontrar-se situado no eixo de aplicação da força vertical F_h ;
- h. Obter a distância L_h mediante a medição da projecção no eixo X da distância entre o ponto determinado em g. e a origem do sistema de referência; medir o valor da força vertical F_h aplicada na célula de carga;
- i. Repetir três vezes as operações descritas em g. e h. e determinar os valores médios de F_h e L_h e os respectivos desvios-padrão experimentais de cada uma das médias; os valores de dispersão obtidos constituem uma estimativa da repetibilidade das medições efectuadas a qual deverá se encontrar compreendida entre $\pm 0,2 \%$ dos valores médios \bar{F}_h e \bar{L}_h , no caso contrário será necessário repetir as operações de f., a i.;
- j. Deslocar o pêndulo de choque para a posição inicial de ensaio e assegurar a sua fixação nessa posição;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

- k. Efectuar a construção geométrica do eixo da haste do pêndulo na posição definida em j., usando a aplicação computacional, tendo como base a definição de duas elipses mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos por cada elipse; medir o ângulo inicial, α_0 , no plano XZ entre os eixos da haste do pêndulo na posição inicial de ensaio e na posição vertical de repouso;
- l. Repetir três vezes a operação descrita em k. e determinar o valor médio $\bar{\alpha}_0$ e o respectivo desvio-padrão experimental da média; o valor de dispersão obtido constitui uma estimativa da repetibilidade das medições angulares efectuadas a qual deverá cumprir o requisito de se encontrar compreendida no intervalo definido pela norma de ensaio ($\pm 0,39^\circ$ para $\alpha_0 \approx 140^\circ$; $\pm 0,54^\circ$ para $\alpha_0 \approx 150^\circ$; $\pm 0,81^\circ$ para $\alpha_0 \approx 160^\circ$), caso contrário será necessário repetir os pontos k. e l.;
- m. Calcular o momento M_h do pêndulo em torno do eixo de rotação através da expressão

$$M_h = \bar{F}_h \cdot \bar{L}_h, \quad (2)$$

determinar a energia potencial gravítica do pêndulo, E ,

$$E = M_h (1 - \cos \bar{\alpha}_0), \quad (3)$$

e a velocidade de choque, v_1 ,

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot L_1 (1 - \cos \bar{\alpha}_0)}, \quad (4)$$

- n. Avaliar a conformidade dos valores obtidos de E e v_1 face às tolerâncias estabelecidas na norma de ensaio e apresentadas na tabela 1;
- o. Repetir as operações anteriores para quaisquer outros pêndulos de choque associados ao equipamento em ensaio.

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

Tabela 1 – Tolerâncias normativas relativas à energia potencial gravítica e à velocidade de choque do pêndulo [1].

Energia potencial gravítica nominal	Intervalo de tolerância da estimativa de energia potencial gravítica, E	Intervalo de tolerância da estimativa de velocidade de choque, v_1
0,5 J	$0,495 \text{ J} \leq E \leq 0,505 \text{ J}$	2,61 m/s $\leq v_1 \leq$ 3,19 m/s
1,0 J	$0,990 \text{ J} \leq E \leq 1,010 \text{ J}$	
2,0 J	$1,980 \text{ J} \leq E \leq 2,20 \text{ J}$	
4,0 J	$3,960 \text{ J} \leq E \leq 4,040 \text{ J}$	
5,0 J	$4,950 \text{ J} \leq E \leq 5,050 \text{ J}$	
7,5 J	$7,425 \text{ J} \leq E \leq 7,575 \text{ J}$	3,42 m/s $\leq v_1 \leq$ 4,18 m/s
15 J	$14,850 \text{ J} \leq E \leq 15,150 \text{ J}$	
25 J	$24,750 \text{ J} \leq E \leq 25,250 \text{ J}$	
50 J	$49,500 \text{ J} \leq E \leq 50,500 \text{ J}$	

D – Ensaio de verificação dimensional e geométrica da aresta de choque do pêndulo

- a. Efectuar a montagem do pêndulo de choque a ensaiar no eixo de rotação do equipamento pendular;*
- b. Fixar o pêndulo de choque na sua posição vertical de repouso mediante o recurso a elementos auxiliares de fixação adequados para este efeito;*
- c. Efectuar a construção de um sistema de referência conforme exposto nos pontos c. e d. do ensaio B para determinação do comprimento de choque usando a aplicação computacional;*
- d. Efectuar a construção de dois planos representativos das superfícies laterais da aresta de choque do pêndulo mediante a determinação das coordenadas espaciais*

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

de cinco pontos por cada plano; medir o ângulo θ_1 tridimensional entre ambos (vide figura 4);

- e. Com base na medição de cinco pontos a meia-altura sobre a aresta de choque (conforme exposto na figura 4), definir uma circunferência e determinar o correspondente raio R_1 ;

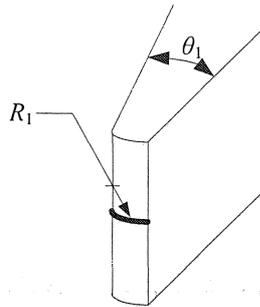


Figura 4 – Representação esquemática das medições a efectuar na aresta de choque.

- f. Determinar a projecção no eixo X da distância entre o centro da circunferência criada no ponto anterior e a origem do sistema de referência; caso o valor da distância projectada no eixo X seja negativo, a distância D_1 (definida como a diferença absoluta entre a aresta de choque e o centro de gravidade do pêndulo) é obtida adicionando o correspondente valor do raio R_1 determinado no ponto anterior à distância projectada obtida (vide figura 5-a); no caso oposto (distância projectada no eixo X positiva), procede-se à subtracção de R_1 (vide figura 5-b);
- g. Efectuar a montagem do apoio de provetes adequado ao pêndulo do equipamento pendular em ensaio;
- h. Revestir a superfície de choque de um provete normalizado com papel branco e promover o seu posicionamento e fixação no respectivo apoio do equipamento pendular;
- i. Revestir a aresta de choque do pêndulo com papel químico permitindo que a face contendo a substância de marcação fique voltada para o exterior da aresta;
- j. Afastar ligeiramente o pêndulo da sua posição de repouso promovendo em seguida a sua libertação originando, desta forma, a marcação da aresta de choque na superfície do provete sem provocar a sua fractura;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

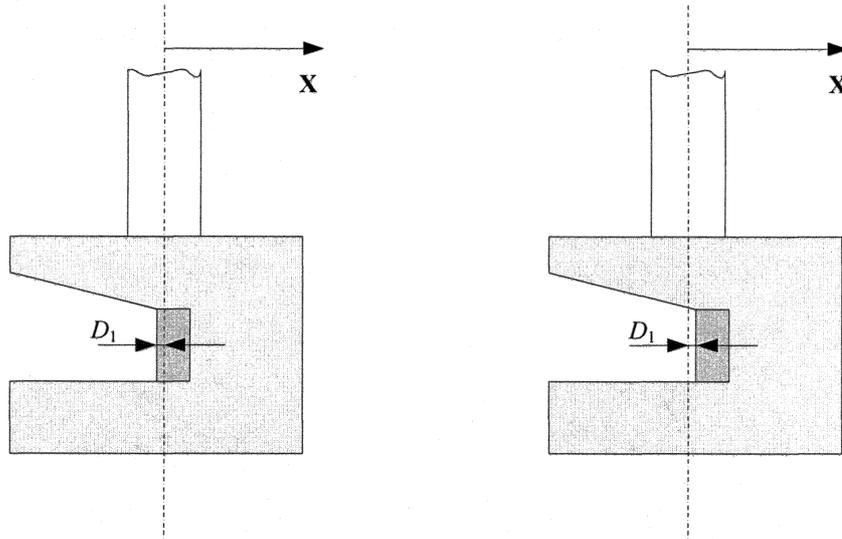


Figura 5 – Representação esquemática da medição de D_1 : a) distância projectada no eixo X negativa; b) distância projectada no eixo X positiva.

- k. Efectuar a construção da linha de marcação da aresta de choque no provete, usando a aplicação computacional, mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos da linha de marcação real; criar um plano representativo da superfície horizontal de apoio do provete mediante a determinação das coordenadas espaciais de dez pontos localizados nessa superfície (cinco na superfície à esquerda e cinco na superfície à direita);
- l. Medir, no plano YZ, o ângulo, β , compreendido entre a linha de marcação e o plano horizontal criado em k., conforme exposto na figura 6.

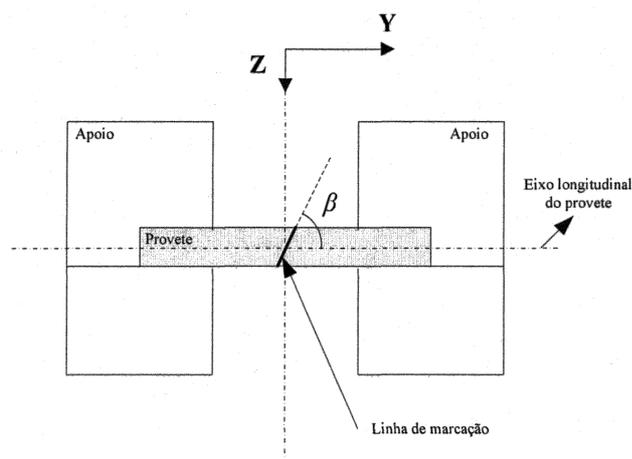


Figura 6 – Representação esquemática da medição da perpendicularidade da aresta de choque.

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

m. Avaliar a conformidade dos valores dimensionais e geométricos obtidos face às tolerâncias estabelecidas na norma de ensaio e apresentadas na tabela 2;

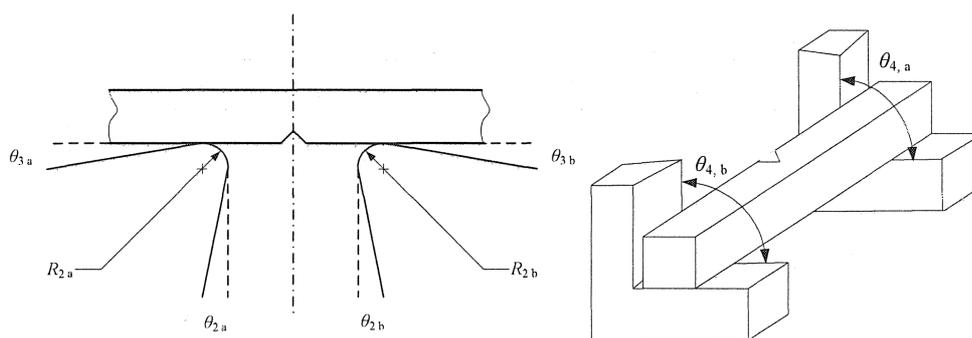
Tabela 2 – Tolerâncias normativas dimensionais e geométricas associadas à aresta de choque [1].

Grandeza	Intervalo de tolerância
θ_1	$(30 \pm 1)^\circ$
R_1	$(2,0 \pm 0,5) \text{ mm}$
D_1	$\pm 0,5 \text{ mm}$
β	$(90 \pm 2)^\circ$

n. Repetir as operações anteriores para quaisquer outros pêndulos de choque associados ao equipamento em ensaio.

E – Ensaio de verificação dimensional e geométrica dos apoios de provete

- a. Efectuar a montagem dos apoios de provete a ensaiar no equipamento pendular;
- b. Efectuar a construção geométrica do raio de concordância $R_{2,a}$ (vide figura 7), usando a aplicação computacional, com base na definição de uma circunferência mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos a meia-altura; obter o valor do raio da circunferência criada;



Figuras 7 e 8 – Representação esquemática dos elementos dimensionais e geométricos a verificar nos apoios de provete.

c. Repetir a operação descrita em b. para obter o raio de concordância $R_{2,b}$;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

- d. Proceder à construção geométrica dos planos representativos das superfícies dos apoios de provete em análise (conforme exposto nas figuras 7 e 8) mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos por cada plano criado;
- e. Determinar a intersecção dos planos representativos das superfícies de interesse e medir o respectivo ângulo tridimensional entre ambos;
- f. Avaliar a conformidade dos valores dimensionais e geométricos obtidos face às tolerâncias estabelecidas na norma de ensaio e apresentadas na tabela 3;

Tabela 3 – Tolerâncias normativas dimensionais e geométricas associadas aos apoios de provete [1].

Grandeza	Intervalo de tolerância
θ_2	$(10 \pm 1)^\circ$
θ_3	$(5 \pm 1)^\circ$
θ_4	$(90,0 \pm 0,1)^\circ$
R_2	$(1,0 \pm 0,1) \text{ mm}$

- g. Repetir as operações anteriores caso existam outros apoios de provete associados ao equipamento pendular.

F – Ensaio de verificação da escala angular

- a. Efectuar a montagem do pêndulo de choque a ensaiar no eixo de rotação do equipamento pendular;
- b. Fixar o pêndulo de choque na sua posição vertical de repouso mediante o recurso a elementos auxiliares de fixação adequados para este efeito;
- c. Efectuar a construção de um sistema de referência conforme exposto nos pontos c. e d. do ensaio B para determinação do comprimento de choque usando a aplicação computacional;
- d. Deslocar o pêndulo de choque para a posição inicial de ensaio e assegurar a sua fixação nessa posição;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

- e. Libertar o pêndulo de choque da sua posição inicial de ensaio, após confirmação visual de que não existem elementos impeditivos ao seu deslocamento;
- f. Registrar o valor do ângulo de subida, $\alpha_{R,1}$, indicado pelo equipamento de ensaio;
- g. Com base nos valores de energia potencial gravítica e momento de rotação do pêndulo, determinados anteriormente no ensaio C, calcular os ângulos de subida, $\alpha_{R,i}$, sujeitos a verificação, através da expressão

$$\alpha_{R,i} = \arccos\left(\frac{x_i \cdot E}{M_h} + \cos \alpha_{R,1}\right), \quad (5)$$

onde $i=1, \dots, 5$ e $x_1=0,1$, $x_2=0,2$, $x_3=0,3$, $x_4=0,5$ e $x_5=0,7$ (definidos de forma a abranger 10 %, 20 %, 30 %, 50 % e 70 % da gama de medição angular do equipamento a ensaio);

- h. Tendo em conta o menor ângulo de subida obtido no ponto anterior, deslocar o pêndulo para a correspondente posição (atendendo ao valor do ângulo de subida indicado pelo equipamento) e promover a sua fixação com auxílio da coluna vertical ajustável;
- i. Efectuar, na aplicação computacional, a construção geométrica do eixo da haste do pêndulo na posição referida em h., com base na definição de duas elipses mediante a determinação das coordenadas espaciais de cinco pontos por cada elipse; medir no plano XZ o ângulo entre os eixos da haste do pêndulo na posição de subida e na posição vertical de repouso;
- j. Proceder ao cálculo da energia absorvida, W_i , através da seguinte expressão

$$W_i = M_h (\cos \alpha_{R,i} - \cos \alpha_{R,1}), \quad (6)$$

- k. Repetir as operações h. e j., por ordem crescente de amplitude, para os restantes quatro ângulos de subida determinados em g;
- l. Repetir h., i., j. e k. duas vezes e determinar, para cada posição angular de subida considerada, o valor médio da energia absorvida \bar{W}_i ;
- m. Avaliar a conformidade dos valores obtidos para \bar{W}_i , de acordo com os limites máximos estipulados pela norma de ensaio: diferença entre os valores individuais e o correspondente valor médio inferior a 1% do valor indicado ou do valor máximo da gama de medição;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

n. Repetir os pontos anteriores caso existam outros pêndulos de choque associados ao equipamento em ensaio.

G – Ensaio de determinação da variação de energia por atrito

- a. Efectuar a montagem do pêndulo de choque a ensaiar no eixo de rotação do equipamento pendular;
- b. Definir os parâmetros operacionais do equipamento pendular (energia potencial gravítica do pêndulo, velocidade de choque, variação de energia por atrito² e ângulo inicial) através do seu programador, caso seja aplicável;
- c. Deslocar o pêndulo de choque para a posição inicial de ensaio e assegurar a sua fixação nessa posição;
- d. Libertar o pêndulo de choque da sua posição inicial de ensaio, após confirmação visual de que não existem elementos impeditivos ao seu deslocamento;
- e. Registrar o valor de energia absorvida indicado pelo equipamento de ensaio;
- f. Repetir três vezes as operações c., d. e e. e determinar o valor médio da energia absorvida, \bar{W}_f , (que quantifica a variação de energia por atrito associada ao movimento do pêndulo);
- g. Avaliar a conformidade do valor obtido de \bar{W}_f face às tolerâncias estabelecidas na norma de ensaio e apresentadas na tabela 4;
- h. Repetir os pontos anteriores para quaisquer outros pêndulos de choque associados ao equipamento em ensaio.

² Atendendo ao objectivo de realização do presente ensaio, o parâmetro operacional do equipamento pendular variação de energia por atrito deverá adoptar um valor igual a zero.

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

Tabela 4 – Tolerâncias normativas relativas à variação de energia por atrito admissível [1].

Energia potencial gravítica nominal	Variação de energia por atrito admissível
0,5 J	0,020 J
1,0 J	
2,0 J	
4,0 J	
5,0 J	0,025 J
7,5 J	0,038 J
15 J	0,075 J
25 J	0,125 J
50 J	0,250 J

4.6 – Determinação da incerteza de medição

A incerteza de medição expandida apresentada está associada à medição de coordenadas espaciais mediante a utilização da máquina de medição de coordenadas tridimensional, sendo declarada para um intervalo de confiança calculado de acordo com [2] e [3].

4.7 – Certificado de ensaio metrológico

Preencher o certificado de ensaio metrológico de acordo com [4] referindo:

- *a identificação do cliente;*
- *a identificação do equipamento ensaiado;*
- *a identificação dos equipamentos de referência utilizados;*
- *os dados complementares (data e local de ensaio, condições ambientais, procedimento e norma adoptados);*

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

- *as observações (inspeção visual e observações gerais);*
- *os valores que compõe o quadro de resultados;*
- *a conformidade ou não-conformidade com a norma de referência;*
- *a incerteza de medição expandida para um intervalo de confiança de 95 %.*

5 – DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- [1] EN ISO 13802: *Plastics. Verification of pendulum impact-testing machines. Charpy, Izod and tensile impact-testing*, Bruxelles (Bélgica): Comité Européen de Normalisation (CEN), 2006.
- [2] *Guide for the expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, Genève (Suiça): International Organization for Standardization (ISO), 1993 (re-editado em 1995).
- [3] *Guia para a expressão da incerteza de medição nos laboratórios de calibração*, Lisboa (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1996.
- [4] *International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM)*, Sèvres (França): Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2008.

2. Ajuste de zero das escalas de medição nos eixos XYZ da máquina de medição tridimensional

O ajuste de zero das escalas de medição da máquina de medição de coordenadas (MMC) é efectuado através da seguinte instrução: menu *CMM > Reset scales*.

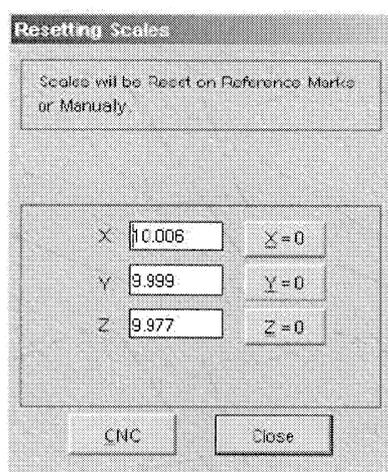


Figura A2.1 – Janela *Resetting Scales* da aplicação computacional.

Existem três formas de efectuar o ajuste de zero das escalas dos eixos de medição da máquina de medição de coordenadas:

- manualmente para a posição pretendida – deslocar a cabeça de apalpação para a posição pretendida e seleccionar na janela *Resetting Scales* os botões $X=0$, $Y=0$ e $Z=0$;
- manualmente para a origem das escalas – deslocar a cabeça de apalpação em cada um dos três eixos até atingir as marcas de referências das escalas;
- automaticamente – seleccionar na janela *Resetting Scales* o botão *CNC* para deslocação automática da cabeça de apalpação em cada um dos três eixos até atingir as marcas de referências das escalas.

3. Apalpadores

3.1 Definição

A operação de “definição” de apalpadores tem por objectivo a atribuição de uma designação ao apalpador que se pretende utilizar assegurando o seu correcto posicionamento e calibração. Esta operação pode ser efectuada por via do menu *Probes > Define* ou com recurso à selecção do correspondente ícone na *toolbar* da aplicação computacional. Em ambos os casos mencionados, a parametrização associada à definição do apalpador é efectuada na janela ilustrada na figura A3.1.1.

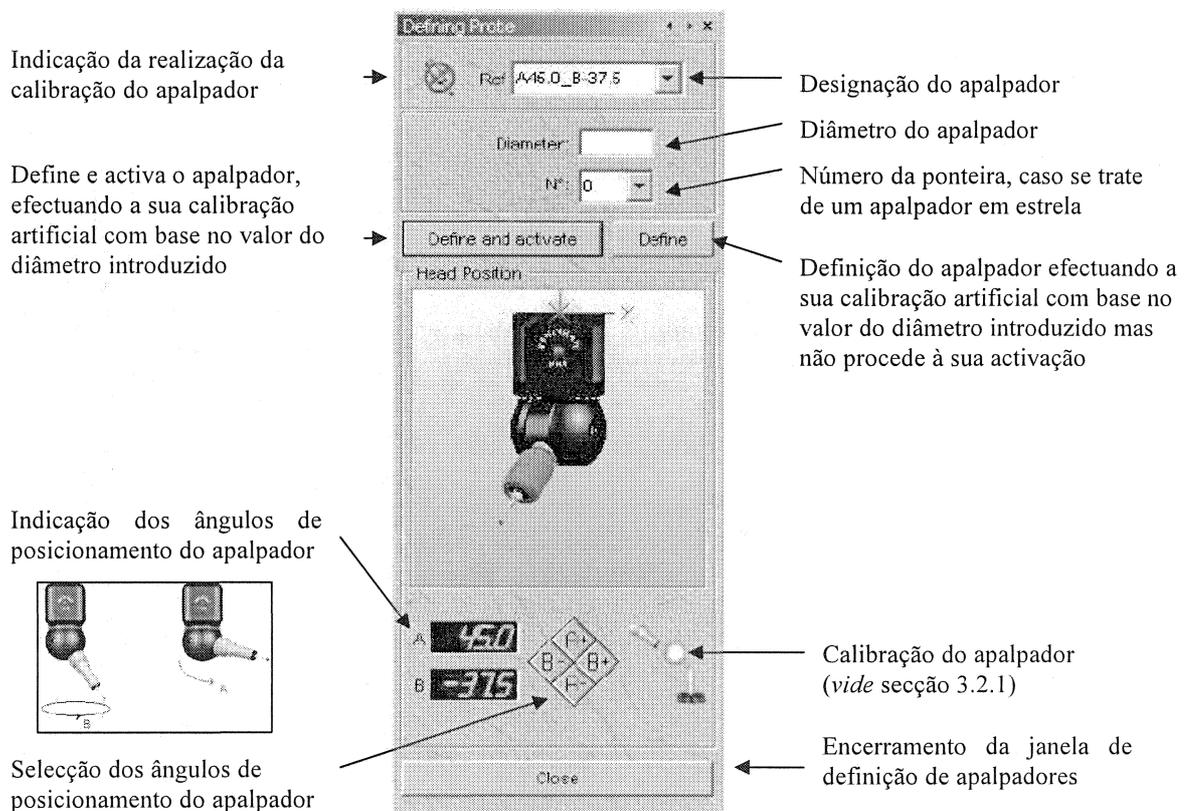


Figura A3.1.1 – Janela de definição de apalpadores da aplicação computacional.

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

3.2 Calibração

3.2.1 Modo manual ou semi-automático

A calibração de apalpadores em modo manual ou a calibração em modo semi-automático têm por objectivo a determinação do diâmetro da ponteira do apalpador e do seu posicionamento em relação à esfera-padrão, sendo executada através do menu *Probes* da aplicação computacional mediante a janela apresentada na figura A3.2.1. Na realização da calibração manual é necessário proceder à determinação manual de, pelo menos, cinco da esfera-padrão. Por sua vez, na calibração semi-automática apenas é necessário determinar um ponto de forma manual (no zénite da esfera-padrão) sendo os restantes pontos determinados de forma automática.

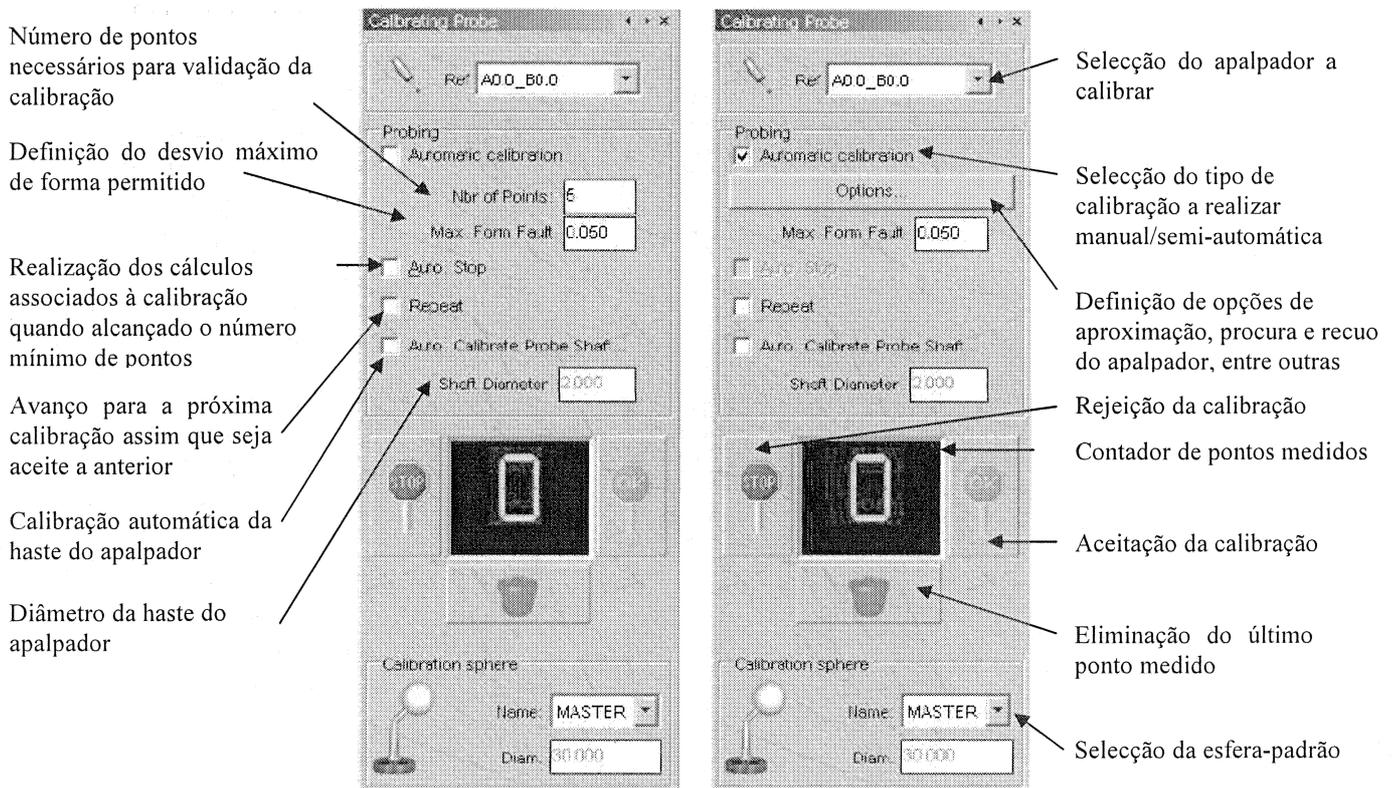


Figura A3.2.1 – Janela de calibração manual (à esquerda) e semi-automática (à direita) da aplicação computacional.

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

3.2.2 Modo automático

A realização da calibração de apalpadores em modo automático requer a realização prévia da qualificação da cabeça de apalpação, permitindo a determinação da sua posição, dimensão e orientação em relação à MMC. Esta operação é efectuada através da janela apresentada na figura A3.2.2.1, acessida através do menu **Probes** da aplicação computacional, implicando a existência de um número mínimo de apalpadores previamente calibrados (nas posições indicadas no topo da janela de qualificação). Caso seja cumprido este requisito, basta proceder à sua selecção e executar a qualificação.

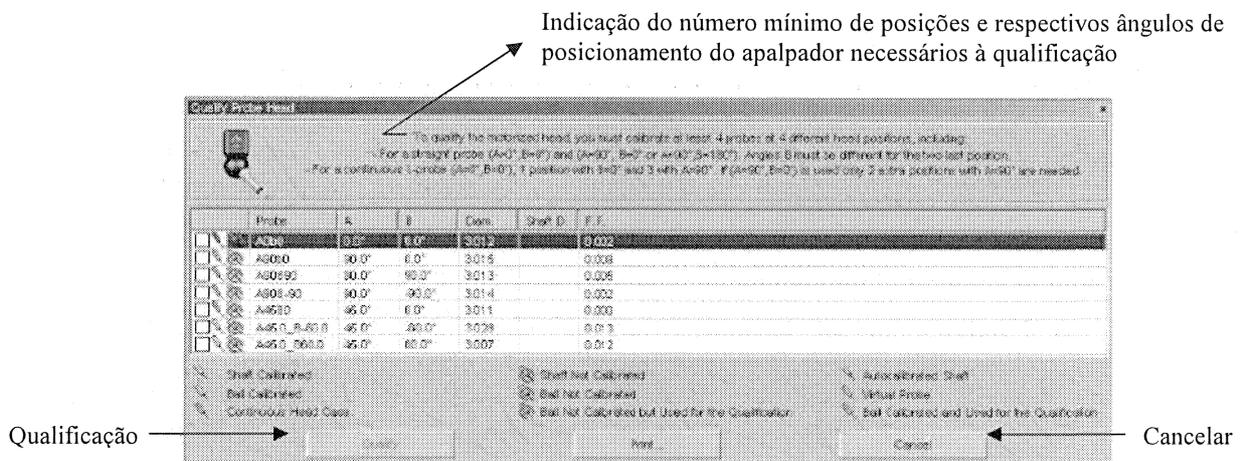


Figura A3.2.2.1 – Janela para qualificação da cabeça de apalpação na aplicação computacional.

Finalizada a operação de qualificação, é possível aceder à janela para calibração dos apalpadores em modo automático (*vide* figura A.3.2.2.2) através do menu **Probes**. Nesta janela é possível observar uma matriz cujas linhas e colunas correspondem, respectivamente, ao ângulo *A* e ao ângulo *B* para posicionamento do apalpador e mediante a qual é possível seleccionar os apalpadores sujeitos a calibração. A condição de calibração é sinalizada por uma cor cujo significado é o seguinte:

- vermelho – posição calibrada que permitiu a operação de qualificação;
- castanho – posição cujo prazo de calibração se encontra fora de validade;
- verde – posição a calibrar em modo automático;

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

- amarelo – posição calibrada em modo artificial (com base no valor nominal do diâmetro da ponteira);
- cinzento – posição não seleccionada para calibração em modo automático.

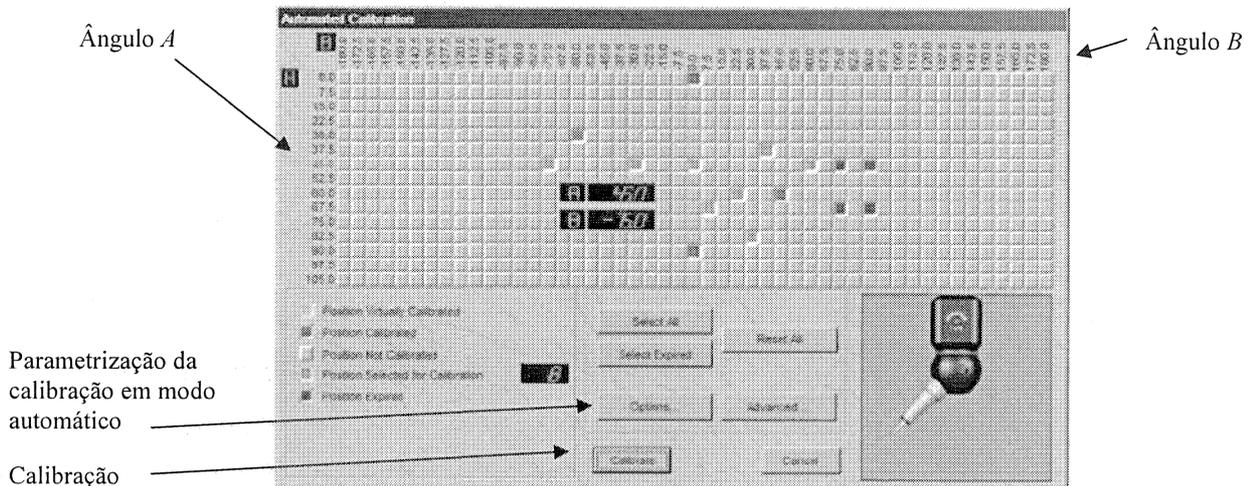


Figura A3.2.2.2 – Janela de calibração automática na aplicação computacional.

3.3 Activação

A operação de activação permite a selecção do apalpador, previamente definido ou calibrado, com vista à sua posterior utilização. Para tal, basta aceder à respectiva janela de activação mediante a selecção do apalpador pretendido em *Probes*, conforme ilustrado na figura A.3.3.

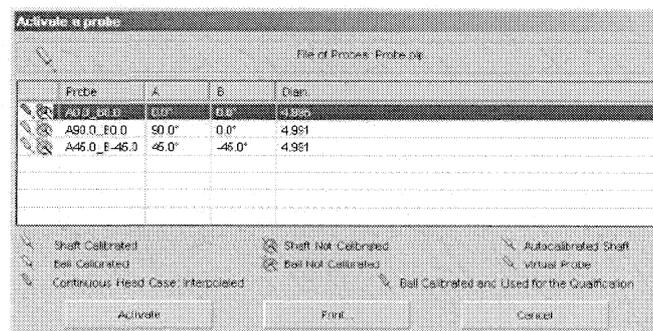


Figura A3.3 – Janela de activação de apaladores na aplicação computacional.

3.4 Localização da esfera-padrão

Esta operação tem por objectivo a definição da posição da esfera utilizada como padrão de referência durante a calibração de apalpadores. O acesso à respectiva janela de configuração, apresentada na figura A3.4.1, é efectuado através do menu *Probes*.

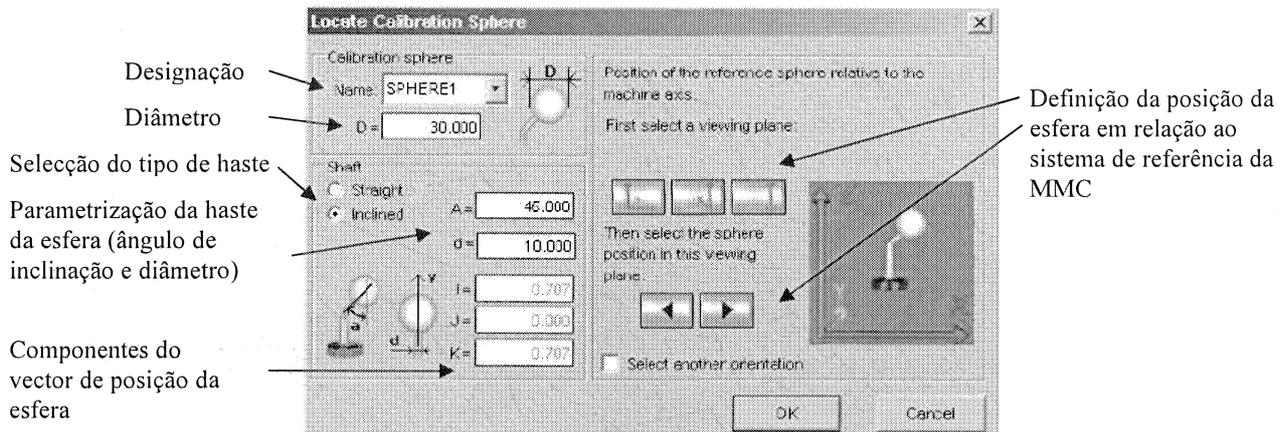


Figura A3.4.1 – Janela de definição da localização da esfera-padrão na aplicação computacional.

Após a edição dos diversos campos da janela de interface, a selecção da opção *OK* permite efectuar, posteriormente, a escolha do apalpador a utilizar na medição da esfera-padrão na posição pretendida, sendo realizada de forma similar à calibração manual de um apalpador (*vide* secção 3.2.1).

4. Definição, medição e construção de elementos

A definição, medição e construção de elementos é realizada directamente através da opção *Feature bar*, apresentada na figura A4.0, ou indirectamente mediante o menu *Feature* da aplicação computacional.

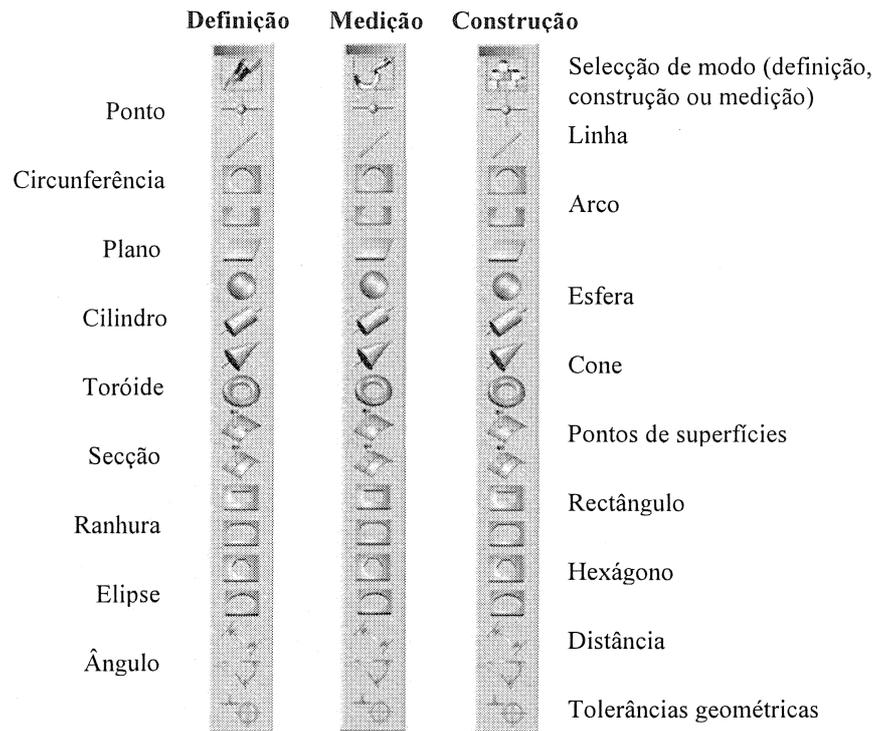


Figura A4.0 – *Feature bar* da aplicação computacional para definição, medição e construção de elementos e respectivas opções.

A definição de elementos consiste na criação virtual de elementos com base em dimensões, posições e orientações nominais enquanto que a medição de elementos é baseada em medições reais executadas com a MMC. Por sua vez, a construção de elementos permite, também, a criação de elementos mediante a existência prévia de elementos definidos ou obtidos por medição.

As secções seguintes ilustram, respectivamente, os aspectos mais significativos da medição e construção de elementos através da aplicação computacional.

Equipamento pendular para ensaios de choque Charpy de materiais plásticos

4.1 Medição de elementos

A medição de elementos é efectuada através da opção *Features > Measure Feature* ou da selecção na barra de opções *Feature bar*.

A figura A.4.1 representa a janela associada à medição manual de uma circunferência, a qual apresenta um formato similar às janelas para medição de outro tipo de elementos (pontos, linhas, planos, elipses, entre outros).

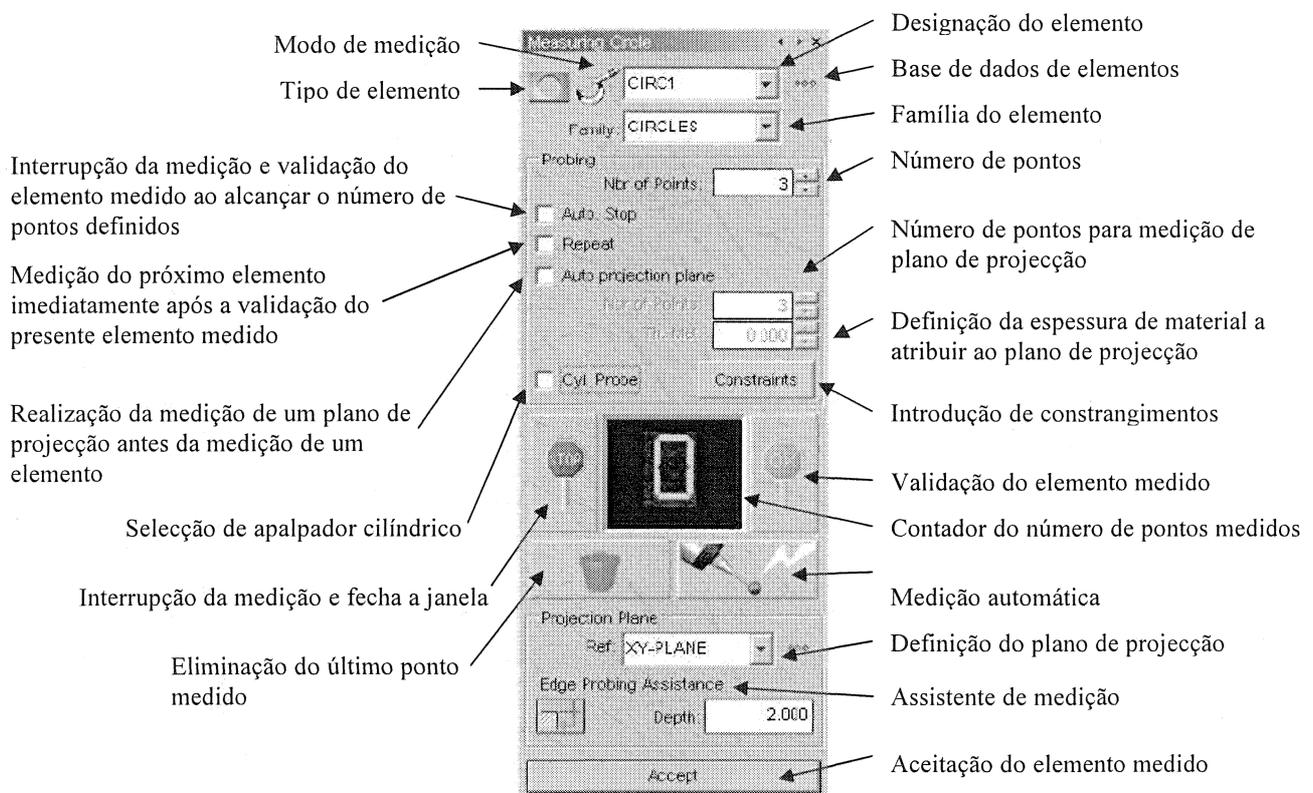


Figura A4.1 – Janela *Measuring circle* da aplicação computacional.

4.2 Construção de elementos

A construção de elementos a partir de elementos nominais e elementos medidos é efectuada mediante a selecção da opção **Features > Construct Feature** ou através da barra de opções *Feature bar*.

Do conjunto de construções disponíveis destacam-se:

- *best fit through features* – na qual é efectuada a selecção de elementos presentes na respectiva base de dados e a construção efectuada resulta da melhor aproximação possível aos elementos seleccionados;
- *by intersection* – na qual a construção do elemento resulta da intersecção dos elementos seleccionados da respectiva base de dados;
- *the median feature* – na qual o elemento construído corresponde ao elemento médio dos elementos seleccionados da base de dados.

A figura A4.2 ilustra uma janela associada à construção de uma linha mediante a intersecção de dois planos.

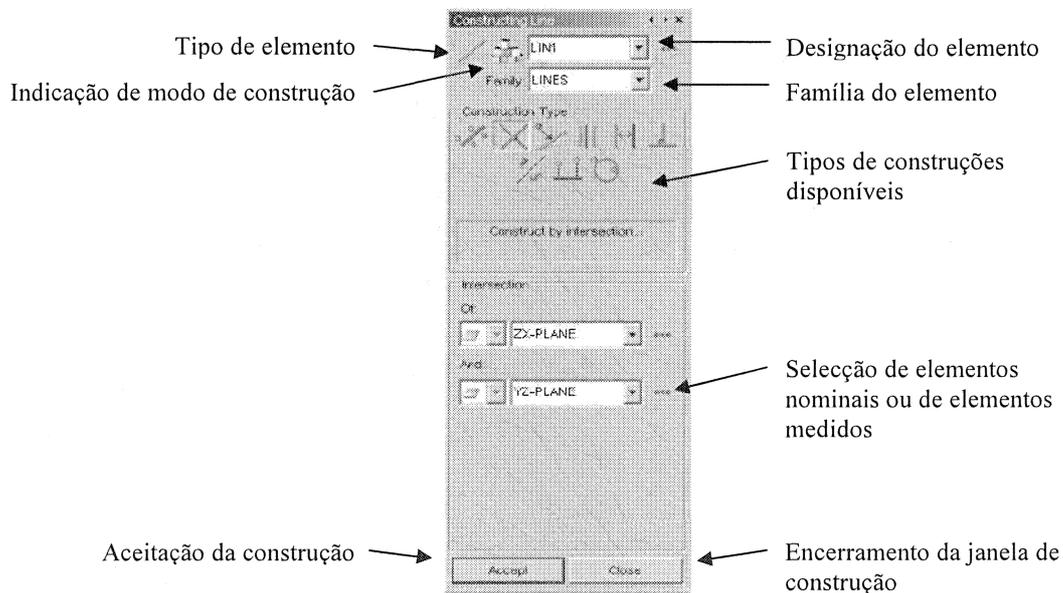


Figura A4.2 – Exemplo de janela de construção de elementos na aplicação computacional.

5. Alinhamentos

5.1. Alinhamento modelo 3-2-1

Este tipo de alinhamento é efectuado com base na medição de seis pontos em superfícies visando a criação de um sistema de referência. Os primeiros três pontos são obtidos na primeira superfície de referência e bloqueiam duas rotações e uma translação. Os dois pontos seguintes são medidos na segunda superfície de referência e bloqueiam a última rotação possível e uma translação. O último ponto medido na terceira superfície de referência bloqueia a última translação possível. O acesso a esta funcionalidade é realizado através do menu *Alignments > Aligning Model 3-2-1*, obtendo-se a janela ilustrada na figura A5.1.

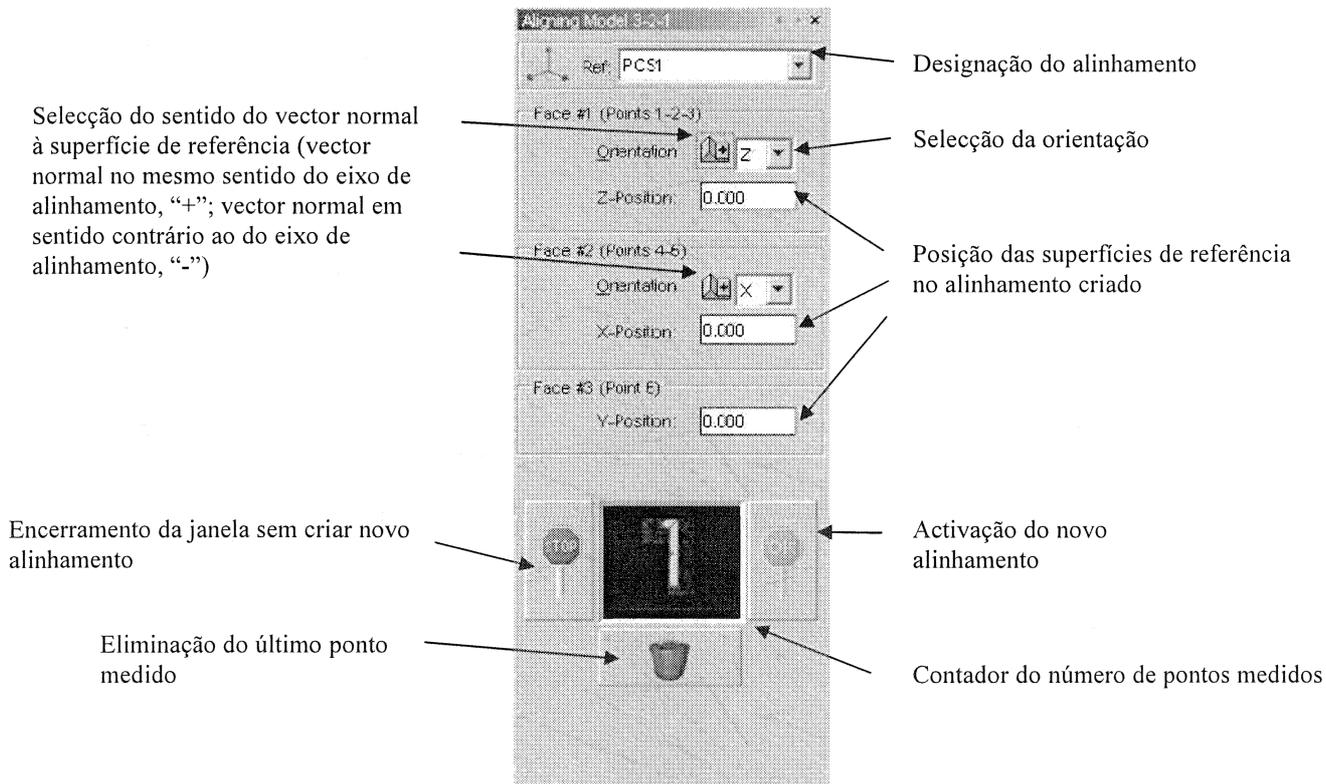


Figura A5.1 – Janela *Aligning Model 3-2-1* da aplicação computacional.

5.2 Alinhamento geométrico

Este tipo de alinhamento é efectuado com base em elementos medidos ou construídos previamente. São necessários pelo menos dois elementos (plano, linha, eixo, ponto de uma superfície) e um ponto ou uma esfera ou três planos representativos da origem do sistema de referência a criar. O primeiro elemento determina o eixo primário enquanto que o segundo elemento determina o eixo secundário e ambos representam uma dada direcção (X, Y ou Z). O acesso a esta funcionalidade é realizado através da opção *Alignments > Aligning Geometrically*, obtendo-se a janela ilustrada na figura A5.2.

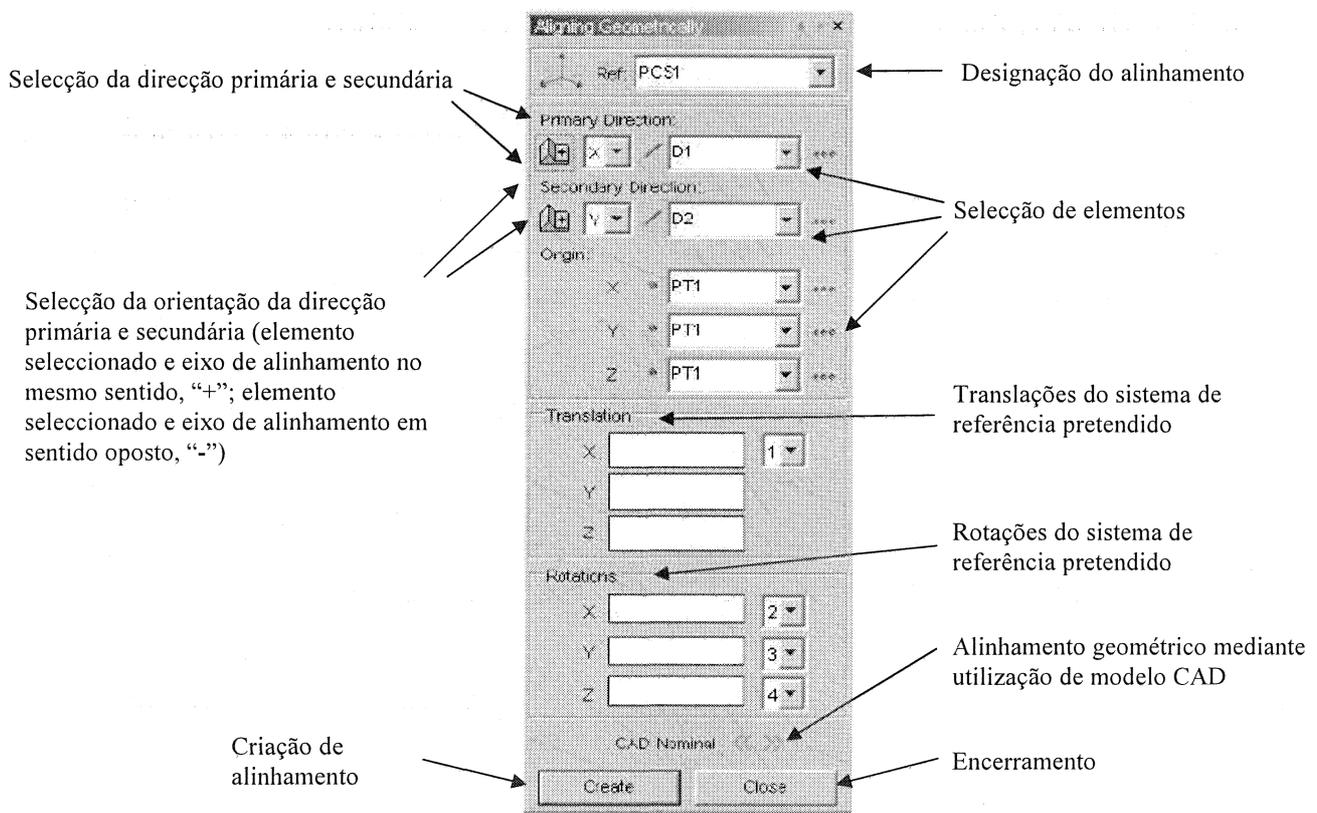


Figura A5.2 – Janela *Aligning Geometrically* da aplicação computacional.

5.3. Activar alinhamento

A activação de um alinhamento é efectuada através da opção *Alignments > Activate*, a qual permite obter a janela apresentada na figura A5.3.

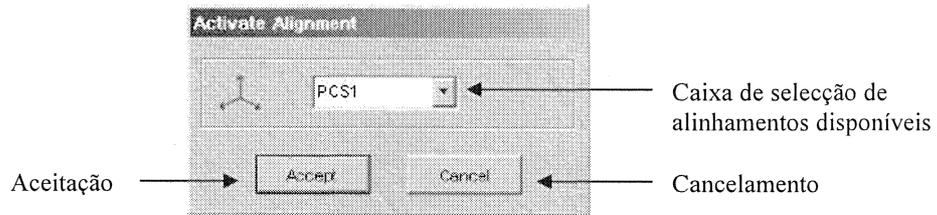


Figura A5.3 – Janela *Activate Alignment* da aplicação computacional.

