



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/551/00878

AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO NO LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)

Ensaios de determinação de propriedades mecânicas e físicas de agregados

Estudo realizado por solicitação do Departamento
de Transportes do LNEC

Lisboa • Setembro de 2009

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 284/2009 – NQM

**Avaliação de Incertezas de Medição no
Laboratório de Ensaios de Materiais para Pavimentação (LNEC/PAVMAT):
Ensaios de Determinação de Propriedades Mecânicas e Físicas de Agregados**

Resumo

Este relatório descreve o processo de avaliação de incertezas de medição dos ensaios de determinação das propriedades mecânicas e físicas de agregados realizados pelo Laboratório de Ensaios de Materiais para a Pavimentação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/PAVMAT). O presente documento contém uma descrição sumária dos ensaios estudados (determinação da resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles, determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada e determinação dos vazios do filer seco compactado) apresentando, também, as respectivas tabelas de balanço de incertezas de medição obtidas com base na aplicação do método de cálculo apropriado.

**Evaluation of Measurement Uncertainties at the
Laboratório de Ensaios de Materiais para Pavimentação (LNEC/PAVMAT):
Tests for the Determination of Mechanical and Physical Properties of Aggregates**

Abstract

This report describes the measurement uncertainty evaluation procedure related with tests for the determination of mechanical and physical properties of aggregates performed at the Laboratório de Ensaios de Materiais para a Pavimentação of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/PAVMAT). The present document contains a brief description of the studied tests (determination of the fragmentation resistance by the Los Angeles method, determination of the water content by drying in a ventilated oven and determination of the voids of dry compacted filler) and also presents the corresponding measurement uncertainty budget tables obtained through the use of the appropriate calculation method.

**Évaluation des Incertudes de Mesure au
Laboratório de Ensaios de Materiais para Pavimentação (LNEC/PAVMAT):
Essais de Détermination des Propriétés Mécaniques et Physiques des Granulats**

Résumé

Ce rapport décrit la procédure d'évaluation des incertudes de mesure des essais de détermination des propriétés mécaniques et physiques des granulats réalisés au Laboratório de Ensaios de Materiais para a Pavimentação du Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/PAVMAT). Le présent document contient une brève description des essais étudiés (détermination de la résistance à la fragmentation par la méthode Los Angeles, détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée et détermination de la porosité du filler compacté) et présente, aussi, les respectifs tableaux du bilan des incertitudes de mesure basé sur l'application de la méthode appropriée.

Índice de matérias

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Fase de formulação	5
2.3 Fase de cálculo	7
2.3.1 Método GUM	7
2.3.2 Método de Monte Carlo.....	14
3. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FRAGMENTAÇÃO PELO MÉTODO DE LOS ANGELES	17
3.1 Descrição sumária do ensaio	17
3.2 Relação e diagrama funcional.....	19
3.3 Tabela de balanço de incertezas de medição.....	20
4. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE POR SECAGEM EM ESTUFA VENTILADA	24
4.1 Descrição sumária do ensaio	24
4.2 Relação e diagrama funcional.....	25
4.3 Tabela de balanço de incertezas de medição.....	26
4.3.1 Estágio inicial	26
4.3.2 Estágio intermédio.....	27
4.3.3 Estágio final.....	28
5. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DOS VAZIOS DO FÍLER SECO COMPACTADO	30
5.1 Descrição sumária do ensaio	30
5.2 Relações e diagramas funcionais.....	31
5.3 Tabelas de balanço de incertezas de medição	34
5.3.1 Ensaio de determinação da massa volúmica do filer	34
5.3.1.1 Estágio inicial.....	34
5.3.1.2 Estágio intermédio	35

5.3.1.3 Estágio final	36
5.3.2 Ensaio de determinação do volume de vazios do filer	38
5.3.2.1 Estágio inicial.....	38
5.3.2.2 Estágio intermédio	39
5.3.2.3 Estágio final	40
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

No Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) coexistem diversos laboratórios que desenvolvem uma significativa actividade experimental incorporando, nos ensaios desenvolvidos, a medição de grandezas mensuráveis e, conseqüentemente, requisitos de qualidade para a expressão dos resultados dessa medição (as suas estimativas e as respectivas incertezas associadas).

Estes ensaios têm, frequentemente, um elevado grau de complexidade resultante da diversidade de grandezas envolvidas e da natureza das relações funcionais que se estabelecem entre estas grandezas.

O Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM), inserido no Centro de Instrumentação Científica, é um sector do LNEC com competências apropriadas para promover estudos de caracterização metrológica, quer relacionados com a calibração e ensaio de instrumentação científica, quer com o desempenho de sistemas de medição.

No que respeita aos ensaios desenvolvidos por outros sectores do LNEC, a colaboração entre o NQM e esses sectores é traduzida na concretização de estudos de caracterização metrológica onde se insere, com particular destaque, a avaliação das incertezas de medição associadas às grandezas de saída. Este estudo, relacionado com os ensaios desenvolvidos pelo Laboratório de Ensaio de Materiais para Pavimentação (LNEC/PAVMAT), foi realizado por solicitação do Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC.

Atendendo a que este laboratório se encontra integrado no Sistema de Gestão da Qualidade do LNEC, este estudo permite, também, cumprir um requisito normativo importante que decorre da aplicação da norma de referência NP EN ISO/IEC 17025 [1], que indica o conjunto de requisitos gerais de competência que os laboratórios de calibração e de ensaio devem cumprir.

Em particular, a declaração da incerteza de medição constitui um dos requisitos normativos aplicáveis aos ensaios laboratoriais, correspondendo a um elemento de quantificação da qualidade das medições realizadas. Faz-se notar que este parâmetro adquire uma importância particular ao permitir a comparação entre medições obtidas em ensaios laboratoriais realizados por outras entidades.

Neste documento é descrito o processo de avaliação das incertezas de medição nos ensaios de determinação de propriedades mecânicas e físicas de agregados – determinação da resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles, determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada e determinação dos vazios do filer seco compactado – fundamentado na actividade laboratorial desenvolvida pelo LNEC/PAVMAT.

O capítulo 2 do presente documento contém uma descrição dos fundamentos dos métodos (método GUM e método de Monte Carlo) aplicados na elaboração das tabelas de balanço de incertezas de cada um dos ensaios laboratoriais estudados e cuja avaliação individual de incertezas de medição é apresentada em detalhe nos capítulos 3 a 5. Cada capítulo refere, também, os objectivos e métodos de ensaio aplicáveis. O capítulo 6 é dedicado às considerações finais.

2. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

2.1 Introdução

A evolução recente da Metrologia tem como uma das suas principais consequências a introdução do conceito de incerteza de medição como parâmetro inerente ao resultado da medição (associado ao valor da estimativa de uma grandeza mensurável), constituindo este o elemento indicativo do nível de exactidão da medição.

A avaliação de incertezas de medição aplicada a um processo descrito por um modelo matemático do tipo, $\hat{y} = f(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n)$, em que \hat{x}_i representa as estimativas das grandezas de entrada e \hat{y} a estimativa da grandeza de saída, pode ser interpretada, numa perspectiva da abordagem probabilística da medição, como a determinação da distribuição de valores da grandeza de saída como consequência da distribuição de valores das grandezas de entrada.

A concretização desta análise envolve, essencialmente, duas fases:

- a fase de formulação, onde se promove a identificação e a caracterização probabilística das diversas grandezas de entrada associadas ao modelo matemático representativo da medição em estudo;
- a fase de cálculo, traduzida na quantificação da incerteza de medição associada à estimativa da grandeza de saída e baseada nas distribuições de probabilidade das grandezas de entrada definidas na fase de formulação.

Esta última fase é suportada em métodos diferenciados com maior ou menor grau de complexidade e com diferentes campos de aplicação, destacando-se os seguintes:

- método analítico de convolução de funções de probabilidade;
- método analítico de determinação da matriz variância-covariância;
- método GUM baseado na aproximação por expansão em série de Taylor (1ª ordem ou de 2ª ordem);
- método de Monte Carlo (MMC) de natureza numérica.

Perante um problema concreto, uma dificuldade inerente à actividade metrológica consiste na selecção de uma das opções anteriores consciente dos condicionamentos e

limitações intrínsecas e assegurando um equilíbrio entre o grau de dificuldade e o esforço associados à aplicação de cada método e o nível de exactidão que cada qual permite atingir.

Por exemplo, a adopção do método analítico funcional conduz a soluções exactas, contudo, a sua concretização prática revela uma elevada complexidade tornando-o pouco atractivo ou até inexequível para a maioria dos problemas estudados na qual se inclui o presente estudo.

Por sua vez, o outro método analítico citado possui a vantagem da exactidão das soluções obtidas, estando dependente de se encontrarem soluções viáveis com base na axiomática desenvolvida no âmbito da Teoria das Probabilidades.

O método GUM, descrito no *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*¹[2], é baseado numa aproximação por expansão em série de Taylor (regra geral, de 1ª ordem) da relação funcional representativa do processo de medição da grandeza de saída com base nas grandezas de entrada, permitindo obter a Lei de Propagação de Incertezas (cuja designação abreviada é “LPI”). A sua utilização permite obter soluções exactas no caso de modelos matemáticos lineares, efectuando a caracterização probabilística da grandeza de saída mediante uma distribuição gaussiana ou uma distribuição-*t*.

O MMC constitui o método mais abrangente, cobrindo uma larga variedade de modelos matemáticos e possuindo um desempenho robusto e eficaz desde que se utilizem ferramentas numéricas devidamente validadas, permitindo obter soluções tendencialmente exactas quando aplicado a sistemas de medição lineares e não-lineares. Porém, é um método aproximado e, como tal, a sua aplicação deve ser ponderada quando, face a um caso concreto, se dispõe de métodos exactos e de fácil aplicação.

No contexto das mensurandas de interesse neste estudo, a aplicação do método GUM na avaliação de incertezas de medição nos ensaios de determinação da resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles e determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada, revela-se adequada e de fácil aplicação atendendo à linearidade ou não-linearidade reduzida dos modelos matemáticos representativos dos respectivos processos de medição.

¹ De acordo com a revisão do GUM em curso, envolvendo a introdução de alguns documentos suplementares, a nova sigla adoptada é “GUF” apontando o âmbito do Guia para um contexto mais alargado (Framework) englobando diversos métodos de avaliação de incertezas de medição.

Pelo contrário, a presença de modelos matemáticos significativamente não-lineares no ensaio de determinação dos vazios do filer seco compactado, justifica o recurso ao MMC como o método mais adequado ao cálculo das incertezas de medição de interesse visto que, a solução obtida pelo método GUM constitui apenas uma aproximação.

Com o intuito de facilitar a compreensão do processo de avaliação de incertezas de medição realizado para os ensaios laboratoriais analisados é descrita nas secções seguintes, por um lado, os aspectos fundamentais da fase de formulação e, por outro lado, os métodos aplicados (GUM e MMC) na fase de cálculo.

Para informação mais detalhada acerca destas matérias, é recomendada a consulta de elementos bibliográficos como o guia GUM [2], bem como, as recentes publicações do suplemento 1 do GUM [3] e o *Vocabulário Internacional de Metrologia* [4] editados pelo *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM), constituído pelas principais entidades metrológicas internacionais.

2.2 Fase de formulação

Esta fase contém como elemento fundamental o modelo matemático descritivo do problema metrológico, no qual se baseia a estimativa de uma grandeza mensurável e a incerteza de medição associada a essa estimativa.

Assim, o modelo matemático relaciona a grandeza de saída – a mensuranda – Y , com um conjunto de grandezas de entrada, X_i , através do que se designa por relação funcional:

$$Y = f(X_1, \dots, X_N). \quad (2.1)$$

Este modelo matemático possui uma tradução para a realidade experimental que é, necessariamente, imperfeita devido às limitações naturais da instrumentação, dos métodos e de outros factores, determinando a existência de um erro de medição. Da medição resultam observações e estimativas, \hat{x}_i , associadas a variáveis aleatórias do modelo matemático, conduzindo a uma estimativa da grandeza mensurável de saída, \hat{y} , cuja expressão é:

$$\hat{y} = f(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_N). \quad (2.2)$$

A definição de *erro (absoluto) da medição*, ε , diz-nos que este representa a *diferença entre o valor da estimativa ou observação (\hat{A}) e o valor verdadeiro da grandeza (\tilde{A})*. Sendo

este último, na perspectiva actual da medição, considerado inatingível, resulta a impossibilidade prática da sua quantificação

$$\varepsilon = \hat{A} - \tilde{A}. \quad (2.3)$$

Este facto, no entanto, não impede que seja possível identificar as fontes que contribuem para esse erro e distinguir, nestas, as componentes cuja contribuição é de natureza sistemática ou aleatória.

Em relação a estas contribuições, de acordo com o disposto no GUM [2], considera-se que o conhecimento das componentes sistemáticas do erro – de natureza determinística – impõe a sua correcção, enquanto que as contribuições aleatórias – de natureza estocástica – devem incorporar um intervalo de dispersão global, relativo à estimativa da mensuranda, no que se designa por incerteza de medição.

No que se refere à sua origem, estas *componentes aleatórias do erro* resultam de variações imprevisíveis de natureza espacial ou temporal, sendo provocadas por *grandezas de influência*, manifestando-se na variação das observações da grandeza mensurável no que se designa por *efeitos aleatórios*. O GUM [2] admite como fontes de incerteza as seguintes:

- *definição incompleta da mensuranda;*
- *realização imperfeita da definição da mensuranda;*
- *não-representatividade da amostra;*
- *conhecimento inadequado ou a medição imperfeita dos efeitos das condições ambientais na determinação da mensuranda;*
- *derivas na leitura efectuada por operadores de instrumentos com indicadores analógicos;*
- *resolução ou a discriminação finita dos instrumentos de medição;*
- *valores inexactos de padrões e de materiais de referência;*
- *valores inexactos de constantes e outros parâmetros obtidos mediante o recurso a fontes externas e usados em algoritmos computacionais;*
- *aproximações e os valores assumidos, os quais são incorporados no método e no procedimento de medição;*

- *variações obtidas em observações repetidas da mensuranda em condições aparentemente idênticas (próximas das condições ideais de repetibilidade).*

É do cômputo das contribuições aleatórias provenientes destas fontes que resulta, então, a quantificação da incerteza de medição, definida como [2]: “*parâmetro, associado ao resultado da medição, caracterizando a dispersão de valores que podem, razoavelmente, ser atribuídos à mensuranda*”. Desta definição, é admitido implicitamente que, em resultado da medição, não é possível atribuir um valor único – verdadeiro – da mensuranda mas, antes, um intervalo de valores prováveis.

2.3 Fase de cálculo

2.3.1 Método GUM

Posteriormente à fase de formulação, a aplicação do método GUM tem como finalidade obter a incerteza de medição expandida, sendo este objectivo atingido mediante a concretização de um conjunto de etapas. Estas contêm expressões e envolvem conceitos de cuja compreensão depende a sua aplicação.

Desde logo, é conveniente ter presente que as observações associadas às grandezas de entrada têm uma natureza aleatória e, como tal, possuem uma dispersão de valores que é determinada pelos parâmetros variância e desvio-padrão experimental.

Logo, a primeira etapa do método GUM [2] estabelece a necessidade de distinguir as componentes de incerteza consoante a origem da informação que lhes fornece os elementos para a determinação dos parâmetros referidos.

No GUM são admitidas duas vias para a obtenção dos parâmetros estatísticos: a amostra experimental; ou o conhecimento prévio do tipo de distribuição de probabilidade. No primeiro caso, diz-se que essa avaliação é feita de acordo com o “*método tipo A*” e no segundo caso, de acordo com o “*método tipo B*”.

Tendo em vista o objectivo de obter o parâmetro estimador dessa dispersão, o desvio-padrão experimental e sabendo que este se determina a partir da variância, $s^2(x_i)$, torna-se necessário, portanto, concretizar a quantificação deste último parâmetro.

No caso em que se adopta o método do tipo A, subentende-se que se determina a contribuição para a incerteza de medição a partir da estatística da variância de uma amostra experimental de observações (de acordo com uma perspectiva frequencista do problema).

No caso de adopção do método do tipo B, considerando apropriada a utilização de determinada função densidade de probabilidade, cujos limites se estabelecem com base em conhecimento previamente adquirido², é utilizada a expressão analítica da variância dessa distribuição para quantificar a pretendida contribuição para a incerteza de medição (neste caso, a abordagem segue a perspectiva bayesiana do problema).

Do ponto de vista prático, quando se recorre ao método do tipo A, é utilizada uma amostra experimental de uma grandeza de entrada Q , contendo observações q_i , obtendo-se o seu valor médio – utilizado na determinação da estimativa da grandeza de acordo com o modelo matemático (2.1) – cuja expressão é:

$$\hat{q} = \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i . \quad (2.4)$$

A variância experimental da média é determinada por

$$s^2(\bar{q}) = \frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 , \quad (2.5)$$

de onde se obtém o pretendido valor do desvio-padrão experimental da média

$$s(\bar{q}) = \sqrt{s^2(\bar{q})} . \quad (2.6)$$

Em alternativa, a utilização do método do tipo B, admite que se possui informação suficiente para se estipular qual a função densidade de probabilidade, os seus parâmetros e o grau de confiança dessa aceitação. Com base nesta informação, recorrendo às expressões analíticas, é possível determinar a variância e o respectivo desvio-padrão. Em Metrologia, os casos mais comuns de distribuições de probabilidade estão tipificados de acordo com o exposto no Quadro 2.1 que apresenta, igualmente, as expressões das variâncias.

Conhecendo-se a forma de determinar a dispersão das grandezas de entrada, x_i , independentemente de resultarem de abordagens de acordo com o método do tipo A ou do tipo B, a etapa seguinte consiste em estabelecer a forma como estas se combinam, conduzindo à determinação da incerteza de medição da grandeza de saída, y .

O método proposto no GUM tem como suporte teórico uma abordagem que recorre ao desenvolvimento em série de Taylor para obter a LPI.

² Por exemplo: dados relativos a medições anteriores; experiência ou conhecimento comum relativo ao comportamento e propriedades de materiais e instrumentos de medição; especificações de fabricantes e documentação de carácter técnico e científico; dados obtidos em calibrações, ensaios e certificados.

Considerando que o modelo matemático admite as estimativas x_i de N grandezas de entrada X_i , para as quais existem valores esperados (μ_1, \dots, μ_N) , o desenvolvimento em série de Taylor de 1ª ordem em torno de μ_i conduz a:

$$y = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot (x_i - \mu_i) + r_2(x_i) \quad (2.7)$$

sendo exacto apenas para modelos matemáticos lineares³. Na expressão anterior, $f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ representa o valor esperado μ_y , da mensuranda y e r_2 representa o resto de 2ª ordem do desenvolvimento em série de Taylor.

Quadro 2.1: Distribuições de probabilidade, limites de variação e expressões da variância.

Denominação do tipo	Função distribuição de probabilidade Configuração característica	Limites de variação	Expressão da variância
Uniforme (centrada)		$\pm a$	$\frac{a^2}{3}$
Triangular (centrada)		$\pm a$	$\frac{a^2}{6}$
Configuração U ou arcosseno (centrada)		$\pm a$	$\frac{a^2}{2}$
Gaussiana normalizada		$\pm s$	s^2

Sabendo que, $\mu_y = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$, a expressão anterior adquire a forma,

³ Modelos matemáticos que não sejam fortemente não-lineares podem admitir a aplicação desta expressão enquanto aproximação ou, em alternativa, poder-se-ão incorporar termos do desenvolvimento de ordem superior, notando-se que estes introduzem um aumento significativo do grau de complexidade.

$$y - \mu_y = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot (x_i - \mu_i) + r_2(x_i) \quad (2.8)$$

cujo primeiro termo é uma componente da definição de variância aplicado à grandeza de saída, y , permitindo estabelecer a relação seguinte:

$$s_y^2 = \hat{\sigma}_y^2 = E \left[(y - \mu_y)^2 \right] = E \left[\left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot (x_i - \mu_i) \right)^2 \right]. \quad (2.9)$$

Utilizando as propriedades do “valor esperado”, E , é obtida a expressão genérica da LPI:

$$s^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot E[(x_i - \mu_i)^2] + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot E[(x_i - \mu_i) \cdot (x_j - \mu_j)] \quad (2.10)$$

que, na sua formulação exposta no GUM [2], substitui os termos $s^2(y)$ por $u^2(y)$, reportando-se à incerteza de medição (“ u ” de “*uncertainty*”) e apresenta a simbologia convencional para representar as variâncias e covariâncias

$$u^2(y) = s^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot s_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot s_{ij}. \quad (2.11)$$

No GUM as derivadas parciais são designadas por “coeficientes de sensibilidade”, representando-os por c_i apresentando-se, por essa razão, uma expressão alternativa para a LPI, que é a mais conhecida,

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i \cdot c_j \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.12)$$

onde r_{ij} representa o coeficiente de correlação para o par de variáveis x_i e x_j .

A expressão anterior é simplificável quando não existe ou não é significativa a correlação entre os pares de grandezas de entrada, resultando:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y). \quad (2.13)$$

As expressões (2.12) e (2.13) determinam o valor da incerteza de medição padrão nas condições apresentadas.

O conhecimento do resultado da aplicação da LPI permite partir para a etapa seguinte da fase cálculo: a avaliação da incerteza de medição expandida. Esta avaliação parte do pressuposto (inerente ao GUM) de aplicabilidade do Teorema do Limite Central, determinando que a distribuição de probabilidade da grandeza de saída, y , possui uma configuração do tipo gaussiana. Sendo assim, a incerteza de medição expandida, $U_p(y)$, resulta do produto da *incerteza de medição padrão*, $u_c(y)$, por um *factor de expansão*, k_p , que é função do intervalo de confiança pretendido,

$$U_p(y) = k_p \cdot u_c(y). \quad (2.14)$$

Nos casos em que a dimensão da amostra permita, de facto, aceitar este pressuposto, então, a incerteza de medição padrão obtida usando a LPI equivale a um desvio-padrão experimental que, de acordo com esta distribuição, representa um intervalo de confiança da ordem de 68%. A sua expansão para um intervalo de confiança de 95 % implica que se multiplique este valor por um *factor de expansão* conhecido que é igual a 2,00,

$$U_{95}(y) = k_{95} \cdot u_c(y) = 2,00 \cdot u_c(y). \quad (2.15)$$

Contudo, grande parte das medições não dispõe de amostras com dimensão suficientemente grande para que se possa considerar apropriada a aplicação do Teorema do Limite Central. É, portanto, necessário recorrer a uma abordagem alternativa aplicável nestes casos (e igualmente recomendada num dos anexos do GUM⁴) baseada na distribuição de probabilidade *t-Student*.

Neste caso, a relação (2.14) é substituída por outra,

$$U_p(y) = t_p(v) \cdot u_c(y) \quad (2.16)$$

⁴ O GUM [2] refere que “reconhecendo a dificuldade de confirmar experimentalmente a presunção de aplicabilidade da distribuição normal aos casos reais, apontam-se circunstâncias em que esta adequação se pode assumir, designadamente, quando os casos de aplicação possuem, pelo menos, 3 componentes distintas de incerteza, com distribuições de probabilidade bem comportadas e provenientes de grandezas independentes, por exemplo, distribuições normais e distribuições uniformes, contribuindo para a estimativa da incerteza de medição padrão com quantidades comparáveis. Nessas circunstâncias (e considerando que as amostras que as suportam também o permitem), admite-se que se está no âmbito de validade do Teorema do Limite Central e, conseqüentemente, que a distribuição de probabilidade da grandeza de saída (mensuranda) é, com elevado grau de aproximação, do tipo normal. Do mesmo modo, considera-se que este critério é atingido se nenhuma das componentes de incerteza obtidas por um método do tipo A for baseada numa amostra inferior a 10 observações”.

em que o *factor de expansão* é, $t_p(\nu)$, sendo função do número de graus de liberdade efectivos, ν ou ν_{ef} , da grandeza de saída.

A obtenção deste factor resulta da aplicação da fórmula de Welch-Satterthwaite,

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}, \quad (2.17)$$

contendo no numerador uma potência de 4ª ordem da incerteza de medição padrão da grandeza de saída e no denominador os rácios das diversas potências de 4ª ordem das contribuições para a incerteza divididas pelos números de graus de liberdade respectivos.

Para completar a exposição acerca deste processo de avaliação da incerteza de medição expandida resta indicar a forma como se obtêm os elementos do denominador.

Relativamente às componentes contributivas da incerteza de medição, elas são determinadas conforme se descreveu na expressão (2.13) anterior,

$$u_i^2(y) = c_i^2 \cdot u^2(x_i). \quad (2.18)$$

Quanto ao número de graus de liberdade relativo a cada grandeza de entrada, determina-se consoante a componente de incerteza é obtida pelo método do tipo A ou pelo método do tipo B conforme se expõe a seguir:

- *no caso de componentes de incerteza do tipo A, essa avaliação é directa, uma vez que, sendo a dimensão da sua amostra constituída por n observações, o número de graus de liberdade, ν_i , corresponde a $(n-1)$ valores independentes (considerando que $n > 1$);*
- *no caso de componentes de incerteza do tipo B é utilizada uma expressão exposta no GUM que visa relacionar o número de graus de liberdade com o grau de fiabilidade da informação utilizada⁵:*

⁵ Considerando que se exprime o *grau de fiabilidade* por, R , então, $R=1-[\Delta u(x_i)/u(x_i)]$, onde $\Delta u(x_i)$ representa a estimativa da percentagem de “incerteza” inerente ao valor limite atribuído à incerteza de medição, $u(x_i)$. Um exemplo: considerando que o rácio $\Delta u(x_i)/u(x_i)$ é igual a 0,1 (i.e., 10%), o *grau de fiabilidade* da informação corresponde a 0,9 (ou seja, admite-se que se dispõe de um intervalo de confiança de 90% das possibilidades) e, conseqüentemente, $\nu_i = \frac{1}{2} \cdot [0,1]^{-2} = 50$ graus de liberdade.

$$v_i = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (2.19)$$

A relação estabelecida entre o número de graus de liberdade efectivos e o *factor de expansão t-Student* é apresentada sob a forma de Quadro, como o que se apresenta em seguida.

Quadro 2.2: Determinação do factor de expansão a partir do número de graus de liberdade efectivos (para um intervalo de confiança de 95%).

v_{ef}	k_p	v_{ef}	k_p	v_{ef}	k_p	v_{ef}	k_p
1	13,97	8	2,37	15	2,18	30	2,09
2	4,53	9	2,32	16	2,17	35	2,07
3	3,31	10	2,28	17	2,16	40	2,06
4	2,87	11	2,25	18	2,15	45	2,06
5	2,65	12	2,23	19	2,14	50	2,05
6	2,52	13	2,21	20	2,13	> 50	2,00
7	2,43	14	2,20	25	2,11		

O procedimento de avaliação de incertezas de medição descrito é sintetizado em Quadros designados por “*Tabelas de Balanço de Incertezas de Medição*”, de acordo com duas abordagens tipo: uma, aplicável quando é válida a aproximação gaussiana; outra, aplicável quando se utiliza a distribuição *t-Student*.

Na primeira, quando é válida a aplicação da distribuição gaussiana, a *Tabela de Balanço de Incertezas de Medição* tem a forma que se apresenta no Quadro 2.3. Neste caso, a incerteza de medição expandida é obtida usando a expressão (2.15).

Quadro 2.3: Tabela de balanço de incertezas de medição (distribuição gaussiana).

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas padrão	Coefficientes de sensibilidade	Contribuições para a incerteza de medição padrão
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$
...
X_N	x_N	$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$
Y	y			$u_c(y)$

Na segunda, quando é válida a aplicação da distribuição de probabilidade *t-Student*, sendo necessário incluir no Quadro anterior um conjunto de células adicionais, incluindo

uma coluna contendo o número de graus de liberdade relativos a cada componente de incerteza associada a grandezas de entrada e o acréscimo de informação requerido para se determinar o *factor de expansão*, resultando a *Tabela de Balanço de Incertezas de Medição* seguinte.

Quadro 2.4: Tabela de balanço de incertezas de medição (distribuição t-Student).

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas padrão	Coefficientes de sensibilidade	Contribuições para a incerteza de medição padrão	Graus de liberdade
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$	ν_i
X_1	x_1	$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$	ν_1
X_2	x_2	$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$	ν_2
...
X_N	x_N	$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$	ν_N
		Incerteza de medição padrão		$u_c(y)$	
		Graus de liberdade efectivos			ν_{ef}
Y	y	Factor de expansão			$t_p(\nu_{ef})$
		Incerteza de medição expandida		$U_p(y)$	

2.3.2 Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo (MMC) consiste, genericamente, na simulação numérica de fenómenos de natureza estocástica, permitindo a obtenção de informação probabilística relacionada com uma dada grandeza de saída mediante o conhecimento da informação probabilística das grandezas de entrada e da respectiva relação funcional. Este processo de simulação é traduzido na convolução das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada, de acordo com o modelo matemático em estudo, obtendo como resultado a função de distribuição de probabilidade da grandeza de saída (*vide* Figura 2.1).

Para esse efeito, o cálculo de incertezas de medição segundo o MMC requer um conjunto de recursos algorítmicos para a concretização das diferentes etapas que o constituem, conforme é possível observar na Figura 2.2.

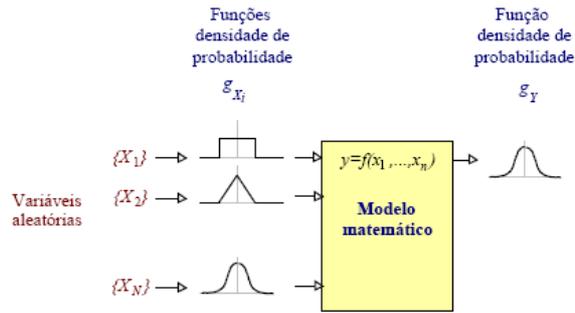


Figura 2.1: Conversão da informação de entrada em informação de saída através do modelo matemático representativo da medição [5].

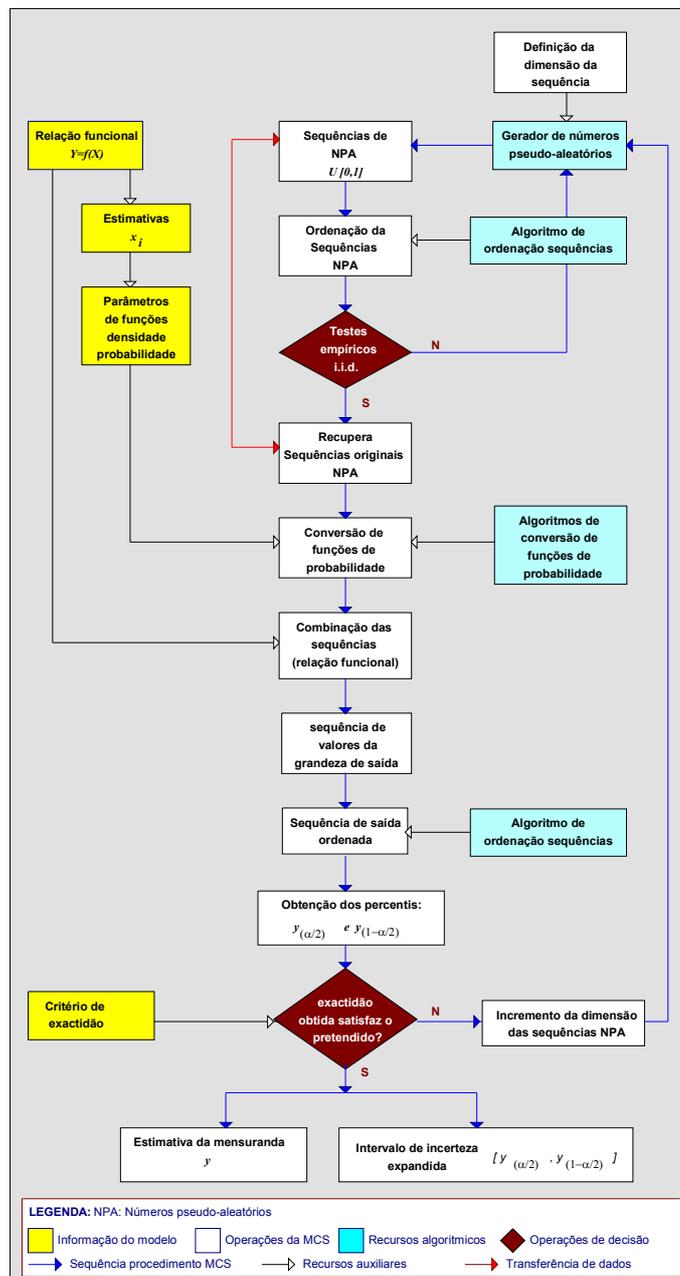


Figura 2.2: Diagrama ilustrativo do processo de simulação pelo MMC [5].

Nesta Figura, é possível destacar as seguintes etapas genéricas do MMC:

- a geração de sequências de números pseudo-aleatórios com distribuição de probabilidade uniforme;
- a conversão das sequências geradas para outras funções de distribuição de probabilidade de acordo com as especificidades próprias de cada grandeza de entrada;
- a combinação das sequências geradas de acordo com o modelo matemático, originando as sequências associadas às grandezas de saída;
- a ordenação de cada sequência de saída;
- a obtenção dos percentis e do nível de exactidão das simulações realizadas.

No âmbito do ensaio de determinação dos vazios do fíler seco compactado, o cálculo das incertezas de medição pelo MMC recorreu ao gerador de números pseudo-aleatórios Mersenne Twister [6] para a obtenção de sequências numéricas com uma dimensão típica de 10^6 , tendo sido utilizados algoritmos de conversão e ordenação descritos em [7]. O nível de exactidão das simulações numéricas foi obtido de acordo com o algoritmo descrito por Cox [8].

O procedimento de avaliação de incertezas de medição descrito é sintetizado, tal como no caso da aplicação do método GUM, em Quadros designados por *Tabelas de Balanço de Incertezas de Medição*, de acordo as especificidades próprias do MMC, conforme é possível constatar no Quadro 2.5.

Quadro 2.5: Tabela de balanço de incertezas de medição (método de Monte Carlo).

<i>Grandezas</i>	<i>Estimativas</i>	Incertezas de medição expandidas (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
X_1	x_1	$U(x_1)$	e_{r_1}	e_{s_1}
X_2	x_2	$U(x_2)$	e_{r_2}	e_{s_2}
...
X_N	x_N	$U(x_N)$	e_{r_N}	e_{s_N}
Y	y	$U(y)$	e_{r_y}	e_{s_y}

3. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FRAGMENTAÇÃO PELO MÉTODO DE LOS ANGELES

3.1 Descrição sumária do ensaio

O ensaio em avaliação no presente capítulo tem por objectivo a determinação da resistência à fragmentação de agregados segundo o método de Los Angeles, descrito como método de referência pela norma de ensaio aplicável NP EN 1097-2 [9] adoptada pelo LNEC/PAVMAT no contexto da sua actividade laboratorial de caracterização mecânica e física de agregados utilizados em pavimentação de infra-estruturas rodoviárias e aeroportuárias.

A realização deste ensaio de natureza mecânica é traduzida na quantificação da mensuranda *factor⁶ de Los Angeles* que consiste no valor percentual de massa do provete ensaiado que passa num peneiro normalizado com abertura de 1,6 mm, após submissão deste a uma acção abrasiva produzida pela sua movimentação rotativa no interior de um equipamento dedicado em presença de um conjunto de esferas de aço (*vide* Figuras 3.1 e 3.2). Note-se que ambos os elementos utilizados – esferas de aço e equipamento rotativo – estão sujeitos ao cumprimento de um conjunto de requisitos técnicos estipulados na norma vigente.



Figuras 3.1 e 3.2: Esferas de aço e equipamento rotativo utilizados no ensaio de determinação da resistência à fragmentação (método de Los Angeles).

⁶ A designação normativa desta grandeza corresponde a *coeficiente* de Los Angeles, o que se considera em desacordo com a norma ISO 31-0 (1992) [10] segundo a qual, o termo “coeficiente” apenas é aplicável a grandezas não-adimensionais obtidas por grandezas de entrada com diferentes dimensões. No presente caso a grandeza de interesse é adimensional, exprimindo o rácio entre duas massas.

A fase de preparação do provete de ensaio (ilustrada esquematicamente na Figura 3.3) é iniciada pela peneiração da amostra laboratorial, a qual deverá apresentar uma massa superior a 15 kg e uma fracção granulométrica⁷ de 10 mm/14 mm. Esta acção tem por objectivo a obtenção de duas fracções granulométricas, predefinidas pela norma vigente, as quais são posteriormente sujeitas a lavagem e secagem em estufa a uma temperatura de (110 ± 5) °C até *massa constante* (situação determinada pela realização de pesagens sucessivas com, no mínimo, uma hora de intervalo, que não revelem diferenças entre pesagens superiores a 0,1 %).

Após arrefecimento até à temperatura ambiente, as duas fracções granulométricas são misturadas com o intuito de obter uma amostra laboratorial modificada que cumpra os requisitos granulométricos definidos na norma de ensaio. Atendendo ao facto de a massa da amostra laboratorial modificada ser significativamente superior à massa do provete de ensaio que se pretende obter (deve estar compreendida entre 4995 g e 5005 g), a amostra é sujeita a um processo de redução mediante um dos métodos previstos na norma NP EN 932-2 [11] e referidos na Figura 3.3. A sub-amostra laboratorial obtida apresenta, regra geral, uma massa compreendida entre 5000 g e 7500 g pelo que é necessário remover a massa de agregado em excesso até se obter a massa pretendida para o provete de ensaio.

Finalizada a fase de preparação do provete, é possível proceder à realização do ensaio em estudo. O procedimento de ensaio adoptado pelo LNEC/PAVMAT é suportado na norma de ensaio vigente, sendo possível destacar a realização do seguinte conjunto de operações:

1. verificação da limpeza do tambor constituinte do equipamento rotativo;
2. colocação das esferas de aço e do provete de ensaio no interior do tambor;
3. imposição de 500 rotações completas, a uma velocidade compreendida entre 31 rotações/minuto e 33 rotações/minuto;
4. esvaziamento do conteúdo do tambor procurando evitar perdas de material;
5. realização de lavagem e peneiração do material recolhido num peneiro com abertura de 1,6 mm segundo o método preconizado na norma NP EN 933-1[12];
6. secagem da fracção retida no peneiro com abertura de 1,6 mm a uma temperatura de (110 ± 5) °C até a obtenção de massa constante.

⁷ Entende-se por fracção granulométrica, d/D , a fracção de um agregado que passa por um peneiro de maior abertura, D , e é retido pelo peneiro de menor abertura, d .

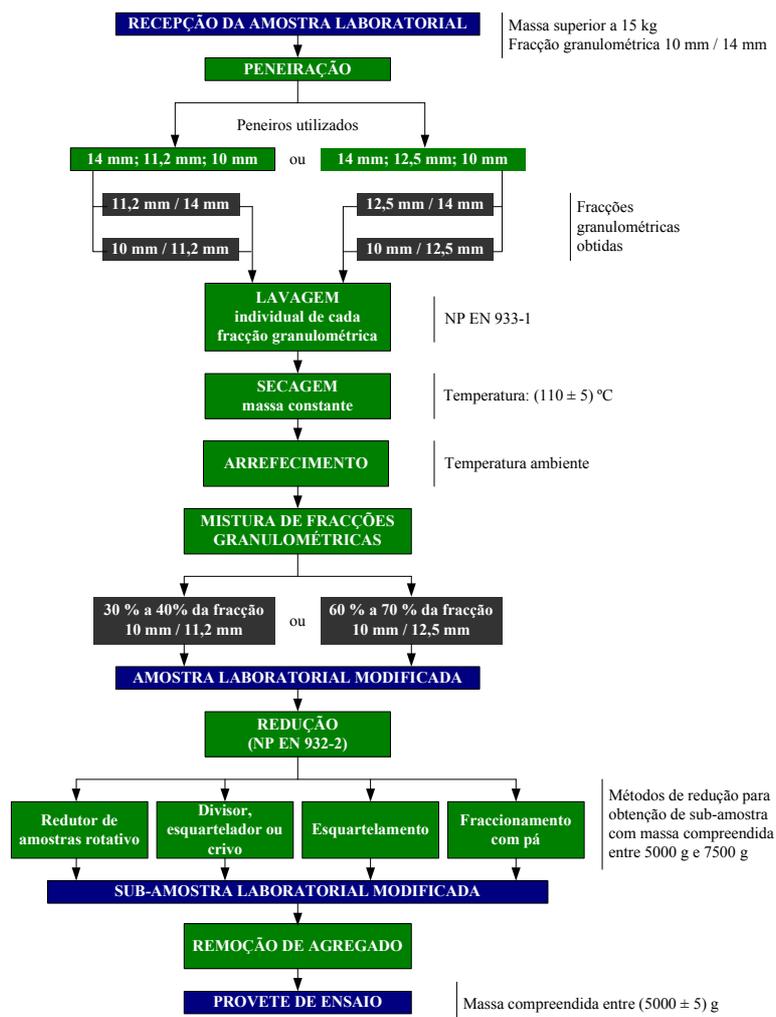


Figura 3.3: Representação esquemática da fase de preparação do provete de ensaio.

3.2 Relação e diagrama funcional

Dado que o material retido apresenta uma granulometria superior a 1,6 mm, sendo m a massa constante do provete após realização do ensaio e m_0 a massa constante inicial do provete sujeito a ensaio, a massa de agregado que passou no peneiro corresponde a $(m_0 - m)$ pelo que a grandeza factor de Los Angeles é obtida fazendo

$$LA = \left(\frac{m_0 - m}{m_0} \right) \times 100, \quad (3.1)$$

ou, simplificando,

$$LA = \left(1 - \frac{m}{m_0} \right) \times 100. \quad (3.2)$$

A definição da mensuranda de interesse apresentada permite concluir que, quanto maior a magnitude da estimativa do factor de Los Angeles obtida no ensaio, menor será a resistência à fragmentação do provete ensaiado quando sujeito a abrasão.

A Figura 3.4 representa o respectivo diagrama funcional aplicável à mensuranda em estudo.

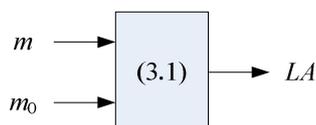


Figura 3.4: Diagrama funcional da grandeza factor de Los Angeles.

3.3 Tabela de balanço de incertezas de medição

Na realização do presente ensaio, o LNEC/PAVMAT dispõe de dois instrumentos de pesagem alternativos (referência interna EQ04.2 e EQ06.5) para a determinação da massa constante inicial e final do provete ensaiado, o que conduz à quantificação distinta (embora próxima) de componentes de incerteza na vertente instrumental. A este conjunto de componentes de incerteza de medição da grandeza massa são, também, adicionadas as relativas à vertente de método de medição adoptado, conforme é possível constatar nos Quadros 3.1 e 3.2.

No caso específico da medição da grandeza massa constante inicial do provete de ensaio, é necessário contabilizar uma componente de incerteza adicional relativa à adopção, por imposição normativa, de uma estimativa fixa da massa inicial do provete de ensaio (igual a 5 000 g) independentemente da estimativa obtida pelo processo de medição que deverá estar compreendida no intervalo $(5\ 000 \pm 5)$ g.

Por sua vez, a componente de incerteza relativa à estabilidade resulta da definição normativa da situação de massa constante que deverá ser observada para ambas as grandezas de entrada. Note-se que pesagens posteriores ao cumprimento do critério normativo podem evidenciar estimativas de massa diferentes.

Quadro 3.1: Caracterização probabilística das componentes de incerteza na medição da grandeza massa mediante a utilização do instrumento de pesagem EQ04.2 (alcance 20 kg, resolução 0,1 g).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
δm_{cal}	Calibração	$\pm 0,057$ g	Gaussiana	Certificado de calibração do instrumento de pesagem
δm_{rev}	Reversibilidade	$\pm 0,15$ g	Triangular	
δm_{exc}	Excentricidade	$\pm 1,1$ g	Triangular	
δm_{rep}	Repetibilidade	$\pm 0,1$ g	Gaussiana	Especificações técnicas do instrumento de pesagem
δm_{lin}	Linearidade	$\pm 0,2$ g	Uniforme	
δm_{der}	Deriva térmica*	$\pm (3 \cdot 10^{-6} \cdot m \cdot \Delta T)$ g	Uniforme	
δm_{tol}	Intervalo de tolerância**	± 5 g	Uniforme	Norma de ensaio
δm_{est}	Estabilidade	$\pm (0,005 \cdot m)$ g	Uniforme	
δm_{zero}	Zero	$\pm 0,05$ g	Uniforme	Procedimento de ensaio

* Considera-se que a sala laboratorial do LNEC/PAVMAT está sujeita a uma variação de temperatura igual a $\Delta T=10$ °C.

** Componente de incerteza apenas aplicável no caso da medição da massa inicial do provete de ensaio.

Quadro 3.2: Caracterização probabilística das componentes de incerteza na medição da grandeza massa mediante a utilização do instrumento de pesagem EQ06.5 (alcance 22 kg, resolução 0,1 g).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
δm_{cal}	Calibração	$\pm 0,05$ g	Gaussiana	Certificado de calibração do instrumento de pesagem
δm_{rev}	Reversibilidade	$\pm 0,05$ g	Triangular	
δm_{exc}	Excentricidade	$\pm 0,2$ g	Triangular	
δm_{rep}	Repetibilidade	$\pm 0,1$ g	Gaussiana	Especificações técnicas do instrumento de pesagem
δm_{lin}	Linearidade	$\pm 0,4$ g	Uniforme	
δm_{der}	Deriva térmica*	$\pm (3 \cdot 10^{-6} \cdot m \cdot \Delta T)$ g	Uniforme	
δm_{tol}	Intervalo de tolerância**	± 5 g	Uniforme	Norma de ensaio
δm_{est}	Estabilidade	$\pm (0,005 \cdot m)$ g	Uniforme	
δm_{zero}	Zero	$\pm 0,05$ g	Uniforme	Procedimento de ensaio

* Considera-se que a sala laboratorial do LNEC/PAVMAT está sujeita a uma variação de temperatura igual a $\Delta T=10$ °C.

** Componente de incerteza apenas aplicável no caso da medição da massa inicial do provete de ensaio.

A reduzida não-linearidade associada ao modelo matemático (3.2) permite a aplicação do método GUM, que preconiza a utilização da LPI, conduzindo à seguinte expressão:

$$u^2(LA) = c_m^2 \cdot u^2(m) + c_{m_0}^2 \cdot u^2(m_0) + 2 \cdot c_m \cdot c_{m_0} \cdot u(m) \cdot u(m_0) \cdot r(m, m_0), \quad (3.3)$$

em que $c_m = -\frac{100}{m_0}$ e $c_{m_0} = \frac{100 \cdot m}{m_0^2}$.

Note-se que o termo de correlação presente na expressão anterior (resultante da utilização do mesmo instrumento de pesagem na determinação das grandezas de entrada) pode ser considerado nulo numa perspectiva de majoração, atendendo ao seu sinal negativo e ao facto de a natureza similar das grandezas de entrada permitir afirmar que $0 \leq r(m, m_0) \leq 1$, resultando em

$$u^2(LA) = c_m^2 \cdot u^2(m) + c_{m_0}^2 \cdot u^2(m_0). \quad (3.4)$$

O Quadro 3.3 apresenta a tabela de balanço de incertezas da grandeza factor de Los Angeles construída com base na LPI dada pela expressão (3.4) e nas componentes de incertezas adicionais associadas ao arredondamento normativo e à repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio, ambas obtidas mediante a realização de estudos experimentais conduzidos pelo LNEC/PAVMAT.

Quadro 3.3: Tabela de balanço de incertezas da grandeza factor de Los Angeles.

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas padrão	Coefficientes de sensibilidade	Contribuições para a incerteza de medição padrão	Graus de liberdade
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$	ν_i
m	3654,7 g	± 11 g	-0,020 g ⁻¹ .%	± 0,22 %	58
m_0	5000 g	± 15 g	0,015 g ⁻¹ .%	± 0,23 %	54
LA_{arred}	0	± 0,29 %	1	± 0,29 %	50
LA_{repet}	0	± 0,62 %	1	± 0,62 %	15
LA_{repro}	0	± 0,92 %	1	± 0,92 %	15
		Incerteza de medição padrão		± 1,2 %	
		Graus de liberdade efectivos			35
LA	27 %	Factor de expansão			2,03
		Incerteza de medição expandida		± 2,4 %	
		(95 %)			

O Quadro apresentado é válido para ambos os instrumentos de pesagem utilizados pelo LNEC/PAVMAT visto que as componentes de incerteza na vertente instrumental apresentam uma magnitude bastante inferior às componentes de incerteza na vertente de método de ensaio.

O valor de incerteza de medição pode ser considerado como representativo da melhor incerteza de medição (ou capacidade metrológica) do LNEC/PAVMAT na realização do ensaio em estudo. A justificação para este facto resulta da reduzida contribuição – através de componentes de incerteza como a deriva térmica e a estabilidade – da estimativa da grandeza de entrada massa constante do provete após realização do ensaio⁸ para a incerteza de medição da grandeza de saída, comparativamente com as componentes de incerteza dominantes de repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio.

⁸ Note-se que, por imposição normativa, a estimativa da restante grandeza de entrada – massa constante inicial do provete – permanece igual em todos os ensaios realizados.

4. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE POR SECAGEM EM ESTUFA VENTILADA

4.1 Descrição sumária do ensaio

O ensaio de determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada tem por objectivo a quantificação da quantidade de água presente num provete de agregado (a nível superficial e interno) contribuindo, deste modo, para a caracterização física de agregados utilizados na pavimentação de infra-estruturas rodoviárias e aeroportuárias. Tendo em conta este objectivo, o LNEC/PAVMAT efectua a realização experimental deste ensaio segundo as orientações e requisitos técnicos presentes na norma EN 1097-5 [13].

O método de ensaio consiste na determinação da massa do provete de agregado húmido, o qual é posteriormente sujeito a secagem no interior de uma estufa ventilada a uma temperatura de (110 ± 5) °C, semelhante à apresentada na Figura 4.1.

Este processo é finalizado quando é verificada a condição de *massa constante*, isto é, pesagens sucessivas do provete de ensaio efectuadas, no mínimo, com uma hora de intervalo, revelam diferenças inferiores a 0,1 % traduzindo uma classificação de provete de agregado seco.

A fase de preparação do provete de ensaio visa a diminuição da massa inicial da amostra laboratorial mediante um método de redução previsto na norma NP EN 932-2 [11] como, por exemplo, mediante esquartelamento. A massa mínima do provete de ensaio produzido por esta via é definida de acordo com o valor superior, D , da sua fracção granulométrica⁹, conforme ilustrado no Quadro 4.1.



Figura 4.1: Estufa utilizada pelo LNEC/PAVMAT na secagem do provete de ensaio.

⁹ Entende-se por fracção granulométrica, d/D , a fracção de um agregado que passa por um peneiro de maior abertura, D , e é retido pelo peneiro de menor abertura, d .

Quadro 4.1: Massa mínima do provete de ensaio a obter do processo de redução [13].

Valor superior da fracção granulométrica do agregado, D	Massa mínima do provete de ensaio
$\geq 1,0$ mm	$(0,2 \cdot D)$ kg
$< 1,0$ mm	0,2 kg

O procedimento de ensaio adoptado pelo LNEC/PAVMAT, suportado na norma de ensaio vigente, inclui a realização das seguintes acções:

1. determinação da massa do recipiente utilizado para colocação do provete de ensaio;
2. adição do provete de agregado húmido ao recipiente;
3. determinação da massa do conjunto provete de agregado húmido e recipiente;
4. secagem do provete de agregado no interior da estufa ventilada a uma temperatura de (110 ± 5) °C até atingir a situação de *massa constante*.

4.2 Relação e diagrama funcional

A grandeza teor de humidade, ω , é definida pela diferença entre a massa do provete húmido e a massa do provete seco sendo expressa de forma percentual relativamente à massa do provete seco, isto é,

$$\omega = \left(\frac{m_1 - m_3}{m_3} \right) \times 100, \quad (4.1)$$

ou, simplificando,

$$\omega = \left(\frac{m_1}{m_3} - 1 \right) \times 100, \quad (4.2)$$

onde m_1 corresponde à massa do provete húmido e m_3 é a massa do provete seco.

Ambas as grandezas de entrada são determinadas por via indirecta em resultado da utilização do recipiente de pesagem pelo que

$$m_1 = m_1' - m_2, \quad (4.3)$$

$$m_3 = m_3' - m_2, \quad (4.4)$$

em que m_2 corresponde à massa do recipiente, m_1' e m_3' dizem respeito à massa do conjunto recipiente e provete de ensaio na condição húmida e seca, respectivamente.

As relações funcionais descritas permitem definir o diagrama funcional que se apresenta na Figura 4.2, no qual é possível identificar três estágios de propagação das incertezas de medição.

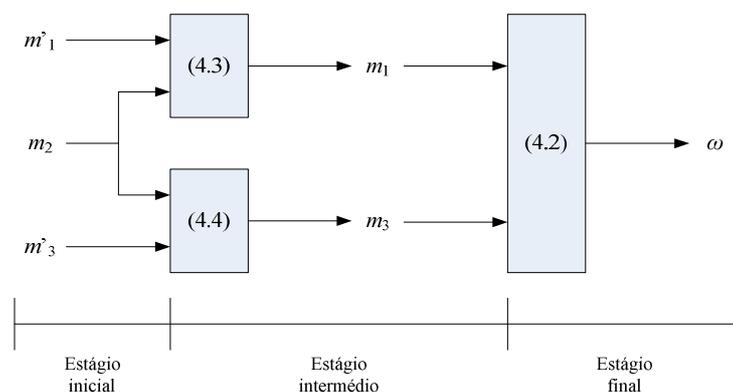


Figura 4.2: Diagrama funcional do ensaio de determinação do teor de humidade.

4.3 Tabelas de balanço de incertezas de medição

4.3.1 Estágio inicial

No que respeita às grandezas de entrada identificadas no diagrama funcional da Figura 4.2, a caracterização probabilística das suas componentes de incerteza é partilhada por todas as mensurandas em questão visto que o LNEC/PAVMAT recorre ao mesmo instrumento (referência interna EQ06.5) e método de pesagem para a sua determinação. A exceção ocorre para o caso da grandeza massa do conjunto recipiente e provete seco em que a verificação da situação de *massa constante* conduz à existência de uma componente de incerteza de estabilidade justificada pelo facto de, apesar de se assegurar o critério normativo, eventuais pesagens posteriores poderiam evidenciar estimativas de massa diferentes. O Quadro 4.2 resume a informação de natureza probabilística relativa às componentes de incerteza identificadas.

Quadro 4.2: Caracterização probabilística das componentes de incerteza na medição da grandeza massa mediante a utilização do instrumento de pesagem EQ06.5 (alcance 22 kg, resolução 0,1 g).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
δm_{cal}	Calibração	$\pm 0,05$ g	Gaussiana	Certificado de calibração do instrumento de pesagem
δm_{rev}	Reversibilidade	$\pm 0,05$ g	Triangular	
δm_{exc}	Excentricidade	$\pm 0,2$ g	Triangular	
δm_{rep}	Repetibilidade	$\pm 0,1$ g	Gaussiana	Especificações técnicas do instrumento de pesagem
δm_{lin}	Linearidade	$\pm 0,4$ g	Uniforme	
δm_{der}	Deriva térmica*	$\pm (3 \cdot 10^{-6} \cdot m \cdot \Delta T)$ g	Uniforme	
δm_{zero}	Zero	$\pm 0,05$ g	Uniforme	Procedimento de ensaio
δm_{est}	Estabilidade**	$\pm (0,000 5 \cdot m)$ g	Uniforme	

* Considera-se que a sala laboratorial do LNEC/PAVMAT está sujeita a uma variação de temperatura igual a $\Delta T=10$ °C.

** Componente de incerteza apenas aplicável à grandeza massa do conjunto recipiente e provete de ensaio seco.

4.3.2 Estágio intermédio

Tendo em conta a expressão (4.3) apresentada na secção 4.2, a aplicação da LPI permite escrever incerteza de medição da grandeza massa do provete húmido como

$$u^2(m_1) = c_{m_1}^2 \cdot u^2(m_1') + c_{m_2}^2 \cdot u^2(m_2) + 2 \cdot c_{m_1} \cdot c_{m_2} \cdot u(m_1') \cdot u(m_2) \cdot r(m_1', m_2), \quad (4.5)$$

em que $c_{m_1} = 1$ e $c_{m_2} = -1$.

No presente caso, o termo de correlação (resultante da utilização do mesmo instrumento de pesagem na determinação das duas grandezas) pode ser assumido como nulo, numa perspectiva de majoração de incerteza de medição, atendendo ao sinal negativo de c_{m_2} e à natureza similar das grandezas correlacionadas traduzida em $0 \leq r(m_1', m_2) \leq 1$.

Por este motivo, a expressão (4.5) é simplificada para

$$u^2(m_1) = c_{m_1}^2 \cdot u^2(m_1') + c_{m_2}^2 \cdot u^2(m_2), \quad (4.6)$$

igualmente como no caso da grandeza massa do provete seca,

$$u^2(m_3) = c_{m_3}^2 \cdot u^2(m_3') + c_{m_2}^2 \cdot u^2(m_2), \quad (4.7)$$

onde $c_{m_3} = 1$ e $c_{m_2} = -1$.

A informação que consta no Quadro 4.2 em conjunto com as expressões (4.6) e (4.7) permitem a elaboração das respectivas tabelas de balanço de incertezas de medição das grandezas presentes no estágio intermédio, conforme exemplificado nos Quadros 4.3 e 4.4.

Quadro 4.3: Tabela de balanço de incertezas de medição da grandeza massa do provete húmido.

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas padrão	Coefficientes de sensibilidade	Contribuições para a incerteza de medição padrão	Graus de liberdade
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$	ν_i
m'_1	3 574,4 g	± 0,26 g	1	± 0,26 g	79
m_2	653,3 g	± 0,25 g	-1	± 0,25 g	70
Incerteza de medição padrão				± 0,36 g	
Graus de liberdade efectivos					148
Factor de expansão					2,00
m_1	2 921,1 g	Incerteza de medição expandida		± 0,72 g	
				(95 %)	

Quadro 4.4: Tabela de balanço de incertezas da grandeza massa do provete seco.

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas padrão	Coefficientes de sensibilidade	Contribuições para a incerteza de medição padrão	Graus de liberdade
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$	ν_i
m'_3	3 388,6 g	± 1,0 g	1	± 1,0 g	57
m_2	653,3 g	± 0,25 g	-1	± 0,25 g	70
Incerteza de medição padrão				± 1,0 g	
Graus de liberdade efectivos					57
Factor de expansão					2,00
m_3	2 735,3 g	Incerteza de medição expandida		± 2,0 g	
				(95 %)	

4.3.3 Estágio final

No que respeita à grandeza de saída, a aplicação da LPI à expressão (4.1) permite afirmar que

$$u^2(\omega) = c_{m_1}^2 \cdot u^2(m_1) + c_{m_3}^2 \cdot u^2(m_3), \quad (4.8)$$

em que $c_{m_1} = \frac{100}{m_3}$ e $c_{m_3} = -\frac{100 \cdot m_1}{m_3^2}$.

Importa, também, referir como componentes de incerteza adicionais o arredondamento imposto pela norma de ensaio, a repetibilidade e a reprodutibilidade do ensaio evidenciadas por estudos dedicados realizados pelo LNEC/PAVMAT. O Quadro 4.5 exemplifica uma tabela de balanço de incertezas de medição da mensuranda de interesse.

Quadro 4.5: Tabela de balanço de incertezas de medição da grandeza teor de humidade.

<i>Grandezas de entrada</i>	<i>Estimativas</i>	<i>Incertezas padrão</i>	<i>Coefficientes de sensibilidade</i>	<i>Contribuições para a incerteza de medição padrão</i>	<i>Graus de liberdade</i>
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$	ν_i
m_1	2 921,1 g	± 0,36 g	0,037 %·g ⁻¹	± 0,013 %	148
m_3	2 735,3 g	± 1,0 g	-0,039 %·g ⁻¹	± 0,039 %	57
ω_{arred}	0 %	± 0,029 %	1	± 0,029 %	50
ω_{repet}	0 %	± 0,14 %	1	± 0,14 %	15
ω_{repro}	0 %	± 0,20 %	1	± 0,20 %	15
		Incerteza de medição padrão		± 0,24 %	
		Graus de liberdade efectivos			25
ω	6,8 %	Factor de expansão			2,06
		Incerteza de medição expandida		± 0,49 %	
				(95 %)	

O valor de incerteza de medição citado no quadro anterior para a grandeza teor de humidade pode ser considerado como representativo da melhor incerteza de medição (ou capacidade metrológica) do LNEC/PAVMAT na realização do ensaio em estudo.

De facto, é possível constatar que as componentes de incerteza dominantes correspondem à repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio, as quais não possuem uma influência directa das estimativas das grandezas de entrada. Por este motivo, a magnitude da incerteza de medição declarada para a mensuranda de interesse não sofre alterações significativas quando consideradas estimativas de grandezas de entrada distintas das apresentadas no Quadro 4.4, justificando deste modo a sua adopção como melhor incerteza de medição.

5. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DOS VAZIOS DO FÍLER SECO COMPACTADO

5.1 Descrição sumária do ensaio

Este ensaio tem por objectivo a determinação da mensuranda volume percentual de vazios num filer – agregado com dimensão granulométrica maioritariamente inferior a 0,063 mm e cuja adição em diversos materiais de construção permite uma melhoria das suas propriedades de interesse – sujeito a um processo de secagem e posterior compactação. A sua concretização no LNEC/PAVMAT é suportada nas indicações técnicas presentes na norma de ensaio vigente EN 1097-4 [14], contribuindo para a caracterização física de agregados utilizados na pavimentação de infra-estruturas rodoviárias e aeroportuárias.

O método de ensaio aí exposto consiste na realização de compactação do filer seco num equipamento dedicado normalizado (*vide* Figura 5.1), com particular destaque para o diâmetro interno do cilindro oco de compactação. O conhecimento desta grandeza, em conjunto com a determinação experimental de propriedades físicas e dimensionais do filer compactado (massa volúmica, massa e altura) permite a determinação indirecta da mensuranda de interesse mediante o modelo matemático descrito na secção 5.2.

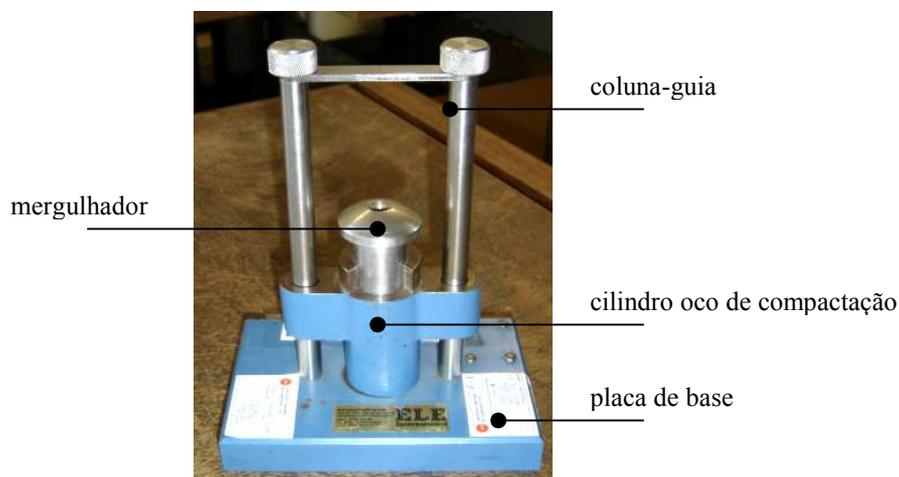


Figura 5.1: Equipamento de compactação utilizado pelo LNEC/PAVMAT.

Salienta-se que, a medição da massa volúmica do filer é efectuada de acordo com a norma EN 1097-7 [15] segundo o método do picnómetro. Este método de ensaio pressupõe a realização de um conjunto específico de pesagens envolvendo o picnómetro, o filer e o líquido utilizado no picnómetro cuja massa volúmica é conhecida para uma temperatura de 25 °C (água desmineralizada no caso do LNEC/PAVMAT). Atendendo tratar-se de uma grandeza de entrada para o cálculo do volume percentual de vazios do filer, a determinação

experimental da massa volúmica do filer constitui um requisito prévio fundamental para a realização do ensaio principal.

A fase de preparação dos provetes de ensaio, que antecede a realização do ensaio em estudo, inclui a realização redução das amostras laboratoriais mediante um dos métodos indicados na norma aplicável NP EN 932-2 [11], permitindo definir um provete de ensaio com uma massa mínima de 150 g, o qual é posteriormente sujeito a secagem a uma temperatura de (110 ± 5) °C até à situação de massa constante (determinada pela realização pesagens sucessivas com, pelo menos, uma hora de intervalo, que revelem diferenças inferiores a 0,1 %). O arrefecimento do provete de ensaio é efectuado num excicador até à temperatura ambiente. Segue-se a sua peneiração num peneiro com abertura de 0,125 mm.

No procedimento de ensaio adoptado pelo LNEC/PAVMAT, suportado na norma de ensaio vigente, é possível destacar as seguintes acções sequenciais:

1. determinação da massa do conjunto cilindro de compactação e papel de filtro a utilizar no ensaio;
2. determinação da profundidade do cilindro de compactação vazio;
3. colocação do filer no interior do cilindro de compactação e, em seguida, do papel de filtro e mergulhador do equipamento de compactação;
4. realização de 100 movimentos de compactação (com intervalos de um segundo entre si) consistindo na queda livre do conjunto móvel (formado pelo cilindro de compactação e mergulhador) a partir de uma altura fixa;
5. determinação da profundidade livre do cilindro contendo o filer compactado;
6. determinação da massa do conjunto cilindro, papel de filtro e filer compactado.

5.2 Relações e diagramas funcionais

A grandeza volume de vazios do filer, ν , é expressa em valor percentual relativamente ao seu volume total após compactação, sendo determinada de acordo com o seguinte modelo matemático:

$$\nu = \left(1 - \frac{4 \times 10^3 \cdot m_2}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho_f \cdot h} \right) \times 100, \quad (5.1)$$

onde m_2 corresponde à massa do filer compactado (expressa em g), α é o diâmetro interno do cilindro de compactação (expresso em mm), ρ_f representa a massa volúmica do filer (expressa em $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) e h é a altura do filer compactado (expressa em mm).

Com excepção da grandeza diâmetro interno do cilindro oco de compactação, cujo valor é conhecido pela realização de ensaio metrológico periódico visando a avaliação de conformidade dimensional e geométrica do equipamento de compactação, as restantes grandezas de entrada são obtidas por via indirecta.

A massa do filer compactado é determinada com base no conhecimento da massa do conjunto cilindro de compactação e papel de filtro a utilizar no ensaio, m_0 , e, da massa do mesmo conjunto contendo o filer compactado, m_1 , obtida no fim do ensaio, ou seja,

$$m_2 = m_1 - m_0. \quad (5.2)$$

Por sua vez, a altura de filer compactado é obtida mediante o recurso a um paquímetro que permite a medição prévia da profundidade do cilindro de compactação vazio, h_0 , e a medição da profundidade livre do mesmo cilindro após a compactação do filer, h_1 , permitindo escrever

$$h = h_0 - h_1. \quad (5.3)$$

No caso da grandeza massa volúmica do filer, a norma de ensaio [15] preconiza o recurso ao seguinte modelo matemático

$$\rho_f = \frac{m_1' - m_0'}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}}, \quad (5.4)$$

onde: m_0' corresponde à massa do picnómetro vazio com rolha (em g); m_1' é a massa do conjunto picnómetro e filer (expressa em g); m_2' diz respeito à massa do conjunto picnómetro, filer e água desmineralizada (em g); $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ é massa volúmica da água desmineralizada a uma temperatura de 25 °C (expressa em $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$); V corresponde ao volume do picnómetro (expresso em mL).

De acordo com a mesma norma [15], o volume do picnómetro é determinado experimentalmente mediante ensaio próprio no qual são efectuadas as seguintes medições directas:

- massa do picnómetro vazio com rolha, m'_0 , (em g);
- massa do picnómetro cheio de água desmineralizada, m'_3 , (em g).

A quantificação das mensurandas mencionadas, assim como, o conhecimento do valor da massa volúmica da água desmineralizada a uma temperatura de 25 °C (expressa em $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$, permitem determinar o volume do picnómetro através de

$$V = \frac{m'_3 - m'_0}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (5.5)$$

O conjunto de relações funcionais descritas na presente secção permitem definir o diagrama funcional aplicável ao ensaio de determinação do volume de vazios do filer, no qual é possível identificar os diversos estágios de propagação de incertezas de medição (*vide* Figura 5.2).

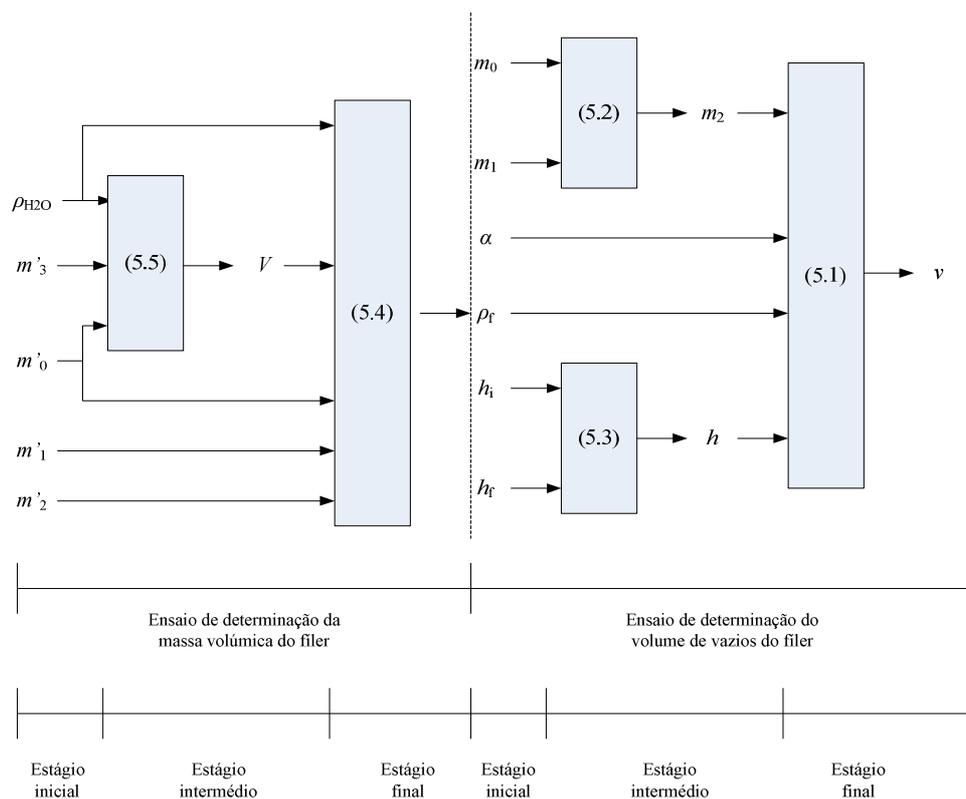


Figura 5.2: Diagrama funcional do ensaio de determinação do volume de vazios do filer.

5.3 Tabelas de balanço de incertezas de medição

5.3.1 Ensaio de determinação da massa volúmica do filer

5.3.1.1 Estágio inicial

No LNEC/PAVMAT, a medição directa da grandeza massa no ensaio de determinação da massa volúmica do filer decorre da utilização de instrumento de pesagem (referência interna EQ04.3) cuja consulta da documentação técnica (certificado de calibração e especificações técnicas) permitiu identificar as componentes de incerteza apresentadas no Quadro 5.1. Na vertente do método de medição é possível destacar, adicionalmente, a realização do zero do instrumento de pesagem previamente à realização da medição das mensurandas de interesse.

No que respeita à grandeza massa volúmica da água, a norma de ensaio [15] impõe como estimativa, para uma temperatura de 25 °C, o valor convencional de 0,997 07 Mg·m⁻³. Atendendo que o picnómetro utilizado está mergulhado em banho-maria a uma temperatura compreendida no intervalo (25,0 ± 0,1) °C, a incerteza de medição da referida estimativa de massa volúmica da água pode ser obtida com base no conhecimento dos valores convencionais estipulados para os limites de temperatura impostos e na adopção de uma função de densidade de probabilidade uniforme.

Quadro 5.1: Caracterização probabilística das componentes de incerteza na medição da grandeza massa no ensaio de determinação da massa volúmica do filer.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
δm_{cal}	Calibração	± 0,000 5 g	Gaussiana	Certificado de calibração do instrumento de pesagem
δm_{rev}	Reversibilidade	± 0,001 g	Triangular	
δm_{exc}	Excentricidade	± 0,001 g	Triangular	
δm_{rep}	Repetibilidade	± 0,001 g	Gaussiana	Especificações técnicas do instrumento de pesagem
δm_{lin}	Linearidade	± 0,002 g	Uniforme	
δm_{der}	Deriva térmica*	± (2·10 ⁻⁶ ·m·ΔT) g	Uniforme	
δm_{zero}	Zero	± 0,000 5 g	Uniforme	Procedimento de ensaio

* Considera-se que a sala laboratorial do LNEC/PAVMAT está sujeita a uma variação de temperatura igual a ΔT=10 °C.

O Quadro 5.2 reproduz os valores convencionais de massa volúmica da água para as temperaturas de 24 °C, 25 °C e 26 °C, conforme expostos em [16].

Quadro 5.2: Valores convencionais da massa volúmica da água [16].

Temperatura (°C)	Massa volúmica (Mg·m ⁻³)
24 °C	0,997 32
25 °C	0,997 07
26 °C	0,996 81

O estabelecimento de uma relação linear entre os valores acima mencionados permite concluir que os limites de variação da massa volúmica da água para as temperaturas de 24,9 °C e 25,1 °C correspondem, respectivamente, a 0,997 095 Mg·m⁻³ e 0,997 045 Mg·m⁻³, conforme referido no Quadro 5.3.

Quadro 5.3: Caracterização probabilística da incerteza na medição da grandeza massa volúmica da água a uma temperatura de 25 °C.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
$\delta\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	Temperatura de ensaio	$\pm 0,000\ 025\ \text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$	Uniforme	Norma de ensaio

5.3.1.2 Estágio intermédio

A determinação da incerteza de medição da grandeza volume do picnómetro pelo MMC, cujos resultados constam no Quadro 5.5, é baseada nos dados de entrada descritos no Quadro 5.4

Quadro 5.4: Dados de entrada da simulação numérica associada à grandeza volume do picnómetro.

Grandeza	Estimativa de entrada
m'_0	29,358 g
m'_3	77,205 g
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	0,997 07 Mg·m ⁻³

Quadro 5.5: Tabela de balanço de incertezas de medição da grandeza volume do picnómetro.

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas de medição expandidas (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
m'_0	29,358 0 g	$\pm 0,003 4$ g	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ g	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$ g
m'_3	77,205 0 g	$\pm 0,003 4$ g	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ g	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$ g
ρ_{H_2O}	0,997 07 Mg·m ⁻³	$\pm 0,000 24$ Mg·m ⁻³	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$ Mg·m ⁻³	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$ Mg·m ⁻³
V	47,988 mL	$\pm 0,013$ mL	$\pm 1 \cdot 10^{-4}$ g	$\pm 4 \cdot 10^{-5}$ g

5.3.1.3 Estágio final

Os resultados da aplicação do MMC na determinação da incerteza de medição associada à grandeza massa volúmica do filer constam no Quadro 5.7, tendo sido obtidos com base nos dados de entrada presentes no Quadro 5.6.

Quadro 5.6: Dados de entrada da simulação numérica associada à grandeza massa volúmica do filer.

Grandeza	Estimativa de entrada	Grandeza	Estimativa de entrada
m'_0	29,358 g	V	47,988 mL
m'_1	39,555 g	ρ_{H_2O}	0,997 07 Mg·m ⁻³
m'_2	83,972 g		

Quadro 5.7: Tabela de balanço de incertezas de medição da grandeza massa volúmica do filer.

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas de medição expandidas (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
m'_0	29,358 0 g	$\pm 0,003 4$ g	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ g	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$ g
m'_1	39,555 0 g	$\pm 0,003 4$ g	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ g	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$ g
m'_2	83,972 0 g	$\pm 0,003 4$ g	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ g	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$ g
ρ_{H_2O}	0,997 07 Mg·m ⁻³	$\pm 0,000 24$ Mg·m ⁻³	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$ Mg·m ⁻³	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$ Mg·m ⁻³
V	47,988 mL	$\pm 0,013$ mL	$\pm 1 \cdot 10^{-4}$ g	$\pm 4 \cdot 10^{-5}$ g
ρ_f	2,964 2 Mg·m ⁻³	$\pm 0,005 1$ Mg·m ⁻³	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$ Mg·m ⁻³	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$ Mg·m ⁻³

A norma de ensaio [15] prevê a realização consecutiva de três ensaios ($n=3$) pelo que o resultado final da mensuranda de interesse consiste na média aritmética das três determinações efectuadas sujeita a arredondamento de $0,01 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Deste modo, a incerteza de medição apresenta como componentes: a repetibilidade da medição expressa pelo desvio-padrão experimental da média; o método e o instrumento de medição utilizados na determinação individual da massa volúmica do filer; e o arredondamento normativo.

O Quadro 5.8 apresenta o balanço de incertezas de medição efectuado com base nas componentes de incerteza referidas anteriormente e mediante a aplicação da LPI, isto é,

$$u(\bar{\rho}_f) = \sqrt{\frac{s^2(\rho_{fi})}{n} + \frac{u^2(\rho_{fi})}{n} + \frac{u_{\text{arred}}^2(\bar{\rho}_f)}{3}}. \quad (5.6)$$

Quadro 5.8: Tabela de balanço de incertezas de medição do valor médio da massa volúmica do filer.

Ensaio	1	2	3
Estimativa ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2,964 2	2,968 1	2,950 8
Incerteza de medição padrão ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\pm 0,002 6$	$\pm 0,002 6$	$\pm 0,002 6$
Valor médio ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			
2,961 0			
Desvio-padrão experimental da média ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			
$\pm (0,0091/\sqrt{3}) = \pm 0,005 3$			
Incerteza de medição associada ao método e instrumento de medição ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			
$\pm (0,0026/\sqrt{3}) = \pm 0,001 5$			
Arredondamento normativo ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			
$\pm (0,005/\sqrt{3}) = \pm 0,002 9$			
Incerteza de medição padrão do valor médio da massa volúmica do filer ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			
$\pm 0,006 2$			

O resultado obtido para a incerteza de medição do valor médio da massa volúmico do filer será contabilizado na secção seguinte relativa à avaliação de incerteza de medição no ensaio de determinação do volume de vazios do filer.

5.3.2 Ensaio de determinação do volume de vazios do filer

5.3.2.1 Estágio inicial

Para além da grandeza massa volúmica do filer cuja análise consta na secção anterior, o estágio inicial de propagação de incertezas de medição do ensaio de determinação de volume de vazios do filer inclui grandezas de entrada no domínio da massa e comprimento.

No que respeita à grandeza massa, o Quadro 5.9 descreve a caracterização probabilística das componentes de incerteza de medição identificadas face ao instrumento (referência interna EQ06.2) e método de pesagem adoptados pelo LNEC/PAVMAT.

Por sua vez, o Quadro 5.10 contém as fontes de incerteza relativas à medição da grandeza profundidade do cilindro oco de compactação (na condição de vazio ou contendo o filer compactado) efectuada mediante o recurso a um paquímetro (referência interna EQ01.2). A sua parametrização é efectuada de acordo com a informação que consta no seu certificado de calibração.

Quadro 5.9: Caracterização probabilística das componentes de incerteza na medição da grandeza massa no ensaio de determinação do volume de vazios do filer.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
δm_{cal}	Calibração	$\pm 0,004$ g	Gaussiana	Certificado de calibração do instrumento de pesagem
δm_{rev}	Reversibilidade	$\pm 0,005$ g	Triangular	
δm_{rep}	Repetibilidade	$\pm 0,01$ g	Gaussiana	Especificações técnicas do instrumento de pesagem
δm_{lin}	Linearidade	$\pm 0,02$ g	Uniforme	
δm_{der}	Deriva térmica*	$\pm (2 \cdot 10^{-6} \cdot m \cdot \Delta T)$ g	Uniforme	
δm_{zero}	Zero	$\pm 0,005$ g	Uniforme	Procedimento de ensaio

* Considera-se que a sala laboratorial do LNEC/PAVMAT está sujeita a uma variação de temperatura igual a $\Delta T=10$ °C.

Quadro 5.10: Caracterização probabilística das componentes de incerteza na medição da grandeza profundidade do cilindro de compactação vazio ou contendo filer compactado.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
δh_{cal}	Calibração	$\pm 0,007$ mm	Gaussiana	Certificado de calibração
δh_{par}	Paralelismo das pontas de medição	$\pm 0,02$ mm	Triangular	
δh_{rep}	Repetibilidade	$\pm 0,004$ mm	Gaussiana	

A medição da grandeza diâmetro interno do cilindro oco de compactação resulta da realização de ensaio metrológico do equipamento de compactação visando a avaliação da conformidade dos requisitos de natureza dimensional exigidos pela norma de ensaio [14]. Este ensaio é realizado por entidade externa ao LNEC/PAVMAT e a consulta do respectivo certificado de ensaio emitido permite conhecer a respectiva incerteza de medição associada à mensuranda de interesse, conforme exposto no Quadro 5.11.

Quadro 5.11: Caracterização probabilística da incerteza na medição da grandeza diâmetro interno do cilindro de compactação.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Fonte de informação
$\delta\alpha$	Medição em ensaio metrológico	$\pm 0,002$ mm	Gaussiana	Certificado de ensaio metrológico

5.3.2.2 Estágio intermédio

A informação que consta no Quadro 5.9 da secção anterior permite a determinação da incerteza de medição da grandeza intermédia massa do filer compactado mediante o recurso ao MMC. As estimativas das grandezas de entrada utilizadas para este efeito constam no Quadro 5.12, enquanto que, no Quadro 5.13, são apresentados os respectivos resultados das simulações numéricas realizadas.

Quadro 5.12: Dados de entrada da simulação numérica associada à grandeza massa do filer compactado.

Grandeza	Estimativa de entrada
m_0	507,41 g
m_1	517,41 g

Quadro 5.13: Tabela de balanço de incertezas de medição da grandeza massa do filer compactado.

Grandezas de entrada	Estimativas x_i	Incertezas de medição expandidas (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
m_0	507,41 g	$\pm 0,033$ g	$\pm 0,005$ g	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$ g
m_1	517,41 g	$\pm 0,033$ g	$\pm 0,005$ g	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$ g
m_2	10,00 g	$\pm 0,048$ g	$\pm 0,005$ g	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$ g

Por sua vez, a determinação da incerteza de medição da grandeza altura do filer tem por base a informação de natureza probabilística expressa no Quadro 5.10, tendo sido utilizados na simulação numérica pelo MMC os dados de entrada apresentados no Quadro 5.14. Os resultados obtidos constam no Quadro 5.15.

Quadro 5.14: Dados de entrada da simulação numérica associada à grandeza altura do filer.

Grandeza	Estimativa de entrada
h_0	61,67 mm
h_1	49,74 mm

Quadro 5.15: Tabela de balanço de incertezas de medição da grandeza altura do filer compactado.

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas de medição expandidas (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
h_0	61,67 mm	$\pm 0,022$ mm	$\pm 0,005$ mm	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$ mm
h_1	49,74 mm	$\pm 0,022$ mm	$\pm 0,005$ mm	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$ mm
h	11,93 mm	$\pm 0,032$ mm	$\pm 0,005$ mm	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$ mm

5.3.2.3 Estágio final

Os resultados obtidos pelas simulações numéricas pelo MMC que constam na secção anterior, em conjunto com a informação probabilística das restantes mensurandas de interesse, permitem proceder à determinação da incerteza de medição da grandeza volume de vazios do filer. Salienta-se a existência de duas componentes de incerteza adicionais relativas à repetibilidade ($\pm 0,69$ %) e à reprodutibilidade ($\pm 1,83$ %) do ensaio quantificadas de acordo com os resultados obtidos por ensaios dedicados promovidos pelo LNEC/PAVMAT.

O Quadro 5.16 apresenta as estimativas de entrada utilizadas no âmbito da simulação numérica pelo MMC cujos resultados obtidos constam no Quadro 5.17.

Quadro 5.16: Dados de entrada da simulação numérica associada à grandeza volume de vazios do filer.

Grandeza	Estimativa de entrada
m_2	10,00 g
α	25 mm
ρ_f	2,961 0 Mg·m ⁻³
h	11,93 mm

Quadro 5.17: Tabela de balanço de incertezas de medição da grandeza volume de vazios do filer.

Grandezas de entrada	Estimativas	Incertezas de medição expandidas (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
m_2	10,00 g	± 0,048 g	± 0,005 g	± 3·10 ⁻⁴ g
α	25,0 mm	± 0,0039 mm	± 0,05 mm	± 3·10 ⁻⁵ mm
$\bar{\rho}_f$	2,961 0 Mg·m ⁻³	± 0,012 4 Mg·m ⁻³	± 5·10 ⁻³ Mg·m ⁻³	± 7·10 ⁻⁵ Mg·m ⁻³
h	11,93 mm	± 0,032 mm	± 0,005 mm	± 2·10 ⁻⁴ mm
v	42,3 %	± 3,9 %	± 0,05 %	± 0,02 %

De acordo com a norma de ensaio [14], o resultado final da mensuranda de interesse – volume de vazios no filer seco compactado – é obtido com base na realização consecutiva de três ensaios ($n=3$) permitindo a sua determinação com base no cálculo da média aritmética das três determinações efectuadas sujeita a arredondamento de 1 %. Com efeito, a incerteza de medição apresenta como componentes: a repetibilidade da medição expressa pelo desvio-padrão experimental da média; a incerteza de medição associada à determinação individual do volume de vazios; e o arredondamento normativo.

O Quadro 5.18 apresenta o balanço de incertezas de medição efectuado com base nas componentes de incerteza referidas anteriormente e mediante a aplicação da LPI, isto é,

$$u(\bar{v}) = \sqrt{\frac{s^2(v_i)}{n} + \frac{u^2(v_i)}{n} + \frac{u_{\text{arred}}^2(\bar{v})}{3}}. \quad (5.7)$$

Quadro 5.18: Tabela de balanço de incertezas de medição do valor médio do volume de vazios do filer.

Ensaio	1	2	3
Estimativa (%)	42,3	42,7	42,8
Incerteza de medição padrão (%)	± 2,0	± 2,0	± 1,9
Valor médio (%)			
	43		
Desvio-padrão experimental da média (%)	$\pm (0,15/\sqrt{3}) = \pm 0,087$		
Incerteza de medição associada ao método e instrumento de medição (%)	$\pm (2,0/\sqrt{3}) = \pm 1,2$		
Arredondamento normativo (%)	$\pm (0,5/\sqrt{3}) = \pm 0,29$		
Incerteza de medição padrão do valor médio do volume de vazios do filer (%)			
	± 1,2		

O valor de incerteza de medição obtido é igualmente aplicável a outras estimativas da grandeza de saída em virtude da reduzida influência das estimativas das grandezas de entrada na quantificação das componentes de incerteza identificadas podendo, desta forma, ser adoptado como melhor incerteza de medição do LNEC/PAVMAT na realização do ensaio de determinação dos vazios do filer seco compactado.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu efectuar a avaliação das incertezas de medição associadas às estimativas de grandezas de interesse nos ensaios de determinação de propriedades mecânicas e físicas de agregados realizados pelo LNEC/PAVMAT, mediante a caracterização probabilística das diversas grandezas envolvidas tendo em conta aspectos como os instrumentos de medição e os métodos de medição adoptados, bem como, a influência dos diferentes operadores na realização das medições (traduzida na componente de incerteza de reprodutibilidade do ensaio).

A utilização de métodos de cálculos diferenciados na propagação das incertezas de medição – o método GUM e o método de Monte Carlo – revelou-se adequada face à natureza distinta dos problemas metrológicos estudados, nomeadamente, no que se refere à linearidade ou não-linearidade associada aos modelos matemáticos representativos das respectivas medições.

O Quadro seguinte exprime as incertezas de medição expandidas (num intervalo de confiança de 95 %) obtidas para os diferentes ensaios de determinação de propriedades mecânicas e físicas de agregados realizados pelo LNEC/PAVMAT no contexto da sua acreditação no Sistema Português da Qualidade evidenciando, deste modo, o grau de qualidade das medições efectuadas.

Quadro 6: Síntese das incertezas de medição nos ensaios de determinação de propriedades mecânicas e físicas de agregados.

Grandeza de interesse	Incerteza de medição expandida (95 %)
Factor de Los Angeles	$\pm 2,4 \%$
Teor de humidade	$\pm 0,49 \%$
Volume de vazios	$\pm 2,4 \%$

Independentemente do ensaio estudado, as componentes de incerteza de repetibilidade e reprodutibilidade evidenciaram uma significativa contribuição para o resultado final da incerteza de medição da mensuranda de interesse pelo que, uma melhoria relevante do nível de exactidão de um ensaio passará, necessariamente, por uma análise detalhada dos ensaios experimentais que conduziram à sua quantificação.

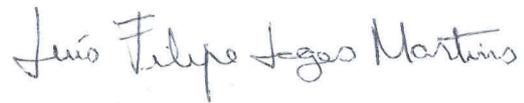
VISTOS

O Director do CIC,



Carlos Oliveira Costa

AUTORIA



Luís Filipe Lages Martins

Lic.º em Engenharia Mecânica
Bolsheiro de Iniciação à Investigação Científica



Álvaro Silva Ribeiro

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

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN ISO/IEC 17025:2005 – Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração. Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Dezembro de 2005.
- [2] *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. Genève (Suíça): International Organization for Standardization (ISO), 1995.
- [3] *Evaluation of measurement data – supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 1st edition. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008.
- [4] *Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)*, 3^a edição. Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Novembro de 2008.
- [5] Ribeiro, A., *Avaliação de incertezas de medição em sistemas complexos lineares e não-lineares*, Coleção Teses e Programas de Investigação LNEC. Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2007.
- [6] Matsumoto, M., Nishimura, T., “Mersenne Twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator” in *ACM Transactions on Modelling and Computer Simulations*, vol. 8, no. 1, p. 3-30, January 1998.
- [7] Press, W., Flannery, S., Teukolsky, S., Vetterling, W., *Numerical recipes – the art of scientific computing*, Cambridge University Press, 1986.
- [8] Cox, M., Dainton, M., Harris, P., *Software specifications for uncertainty calculation and associated statistical analysis*, National Physical Laboratory (NPL) report CMSC 10/01. Teddington (Reino Unido): National Physical Laboratory (NPL), March 2001.
- [9] NP EN 1097-2:2002 – Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: métodos para a determinação da resistência à fragmentação. Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Novembro de 2002.
- [10] ISO 31-0:1992 – Quantities and units. Part 0: general principles. Genève (Suíça): International Organization for Standardization (ISO), 1992.
- [11] NP EN 932-2:2002 – Ensaios das propriedades gerais de agregados. Parte 2: métodos de redução de amostras laboratoriais. Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.

- [12] NP EN 933-1:2000 – Ensaios das propriedades geométricas de agregados. Parte 1: análise granulométrica – método da peneiração. Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Novembro de 2000.
- [13] EN 1097-5:2008 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 5: determination of the water content by drying in a ventilated oven. Brussels (Bélgica): European Committee for Standardization (CEN), March 2008.
- [14] EN 1097-4:2008 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 4: determination of the voids of dry compacted filler. Brussels (Bélgica): European Committee for Standardization (CEN), March 2008.
- [15] EN 1097-7:2008 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 7: determination of the particle density of filler – pycnometer method. Brussels (Bélgica): European Committee for Standardization (CEN), March 2008.
- [16] EN 12697-6:2003+A1:2007 – Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 6: determination of bulk density of bituminous specimens. Brussels (Bélgica): European Committee for Standardization (CEN), July 2007.

