



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/532/00660

CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA E AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS NO LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE REACÇÃO AO FOGO (LNEC/LERF)

Ensaio de incombustibilidade

Trabalho realizado por solicitação do Departamento
de Edifícios do LNEC

Lisboa • Julho de 2008

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 280/2008 – NQM

Caracterização Metrológica e Avaliação de Incertezas no Laboratório de Ensaio de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF): Ensaio de Incombustibilidade

Resumo

Este relatório apresenta a caracterização metrológica e a avaliação de incertezas de medição do *Ensaio de Incombustibilidade* realizado no Laboratório de Ensaio de Reacção ao Fogo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/LERF). O presente documento contém uma descrição do ensaio em estudo e descreve o processo de avaliação de incertezas de medição das grandezas aumento de temperatura, perda de massa e duração de chamas persistentes.

Metrological Characterization and Uncertainty Evaluation in the Laboratório de Ensaio de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF): Non-combustibility Test

Abstract

This report presents the metrological characterization and the measurement uncertainty evaluation related with the *Non-combustibility Test* carried out by the Laboratório de Ensaio de Reacção ao Fogo of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/LERF). This document includes a description of the studied test and describes the measurement uncertainty evaluation of the temperature rise, mass loss and duration of sustained flaming quantities.

Caractérisation Métrologique et Évaluation des Incertitudes dans le Laboratório de Ensaio de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF): Essai d'Incombustibilité

Résumé

Ce rapport présente la caractérisation métrologique et l'évaluation des incertitudes de mesurage de l'*Essai d'Incombustibilité* réalisé par le Laboratório de Ensaio de Reacção ao Fogo du Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/LERF). Le présent document contient une description de l'essai en étude et décrit le procès d'évaluation des incertitudes de mesurage des grandeurs hausse de température, perte de masse et durée des flammes persistantes.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE INCOMBUSTIBILIDADE.....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Metodologia de ensaio e mensurandas de interesse.....	3
2.3 Montagem experimental.....	6
2.4 Ensaio e operações preliminares.....	8
2.5 Procedimento de ensaio.....	11
3 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	13
3.1 Introdução.....	13
3.2 Componentes de incerteza.....	15
3.2.1 Temperatura do forno.....	15
3.2.2 Massa da amostra.....	17
3.2.3 Duração de chamas persistentes.....	18
3.3 Avaliação da incerteza de medição das grandeza aumento de temperatura e duração de chamas persistentes pelo método GUM.....	19
3.3.1 Aumento de temperatura.....	19
3.3.2 Duração de chamas persistentes.....	20
3.4 Avaliação da incerteza de medição da grandeza perda de massa pelo método de Monte Carlo.....	20
4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

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 quer pela diversidade de grandezas envolvidas quer pela natureza das relações funcionais que se estabelecem entre estas.

O Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM), inserido no Centro de Instrumentação Científica, é um sector do LNEC com competências para promover estudos de caracterização metrológica quer relacionados com a calibração 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 pode traduzir-se na concretização de estudos de caracterização metrológica onde se insere, com particular destaque, a avaliação das incertezas de medição associadas às grandezas mensuráveis. Este estudo, relacionado com os ensaios desenvolvidos pelo Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF), foi realizado por solicitação do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios.

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 efectua-se a caracterização metrológica e a avaliação das incertezas de medição associadas à realização do **Ensaio de Incombustibilidade**, fundamentada na actividade laboratorial desenvolvida no LNEC/LERF.

No que respeita ao conteúdo deste documento, refira-se que, no capítulo 2 se efectua uma descrição do presente ensaio mencionando os aspectos mais significativos relacionados com a metodologia de ensaio, as mensurandas de interesse, a montagem experimental, os ensaios e as operações preliminares e o procedimento de ensaio adoptado.

No capítulo 3 encontram-se descritas as componentes de incerteza das mensurandas de interesse neste estudo: o aumento de temperatura, a perda de massa e a duração de chamas persistentes. Neste capítulo são, também, apresentados os resultados obtidos pelas avaliações de incertezas de medição efectuadas.

No caso das grandezas aumento de temperatura e duração de chamas persistentes recorre-se ao método GUM em virtude da linearidade dos modelos matemáticos representativos das suas medições. Pelo contrário, no caso da grandeza perda de massa, a sua relação funcional não-linear com as respectivas grandezas de entrada determina a utilização do método de Monte Carlo como a metodologia adequada a aplicar permitindo a determinação da incerteza de medição desta grandeza com um nível de exactidão superior ao método GUM.

Finalmente, no capítulo 4, procede-se à apresentação das conclusões obtidas com a realização deste estudo.

2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE INCOMBUSTIBILIDADE

2.1 Introdução

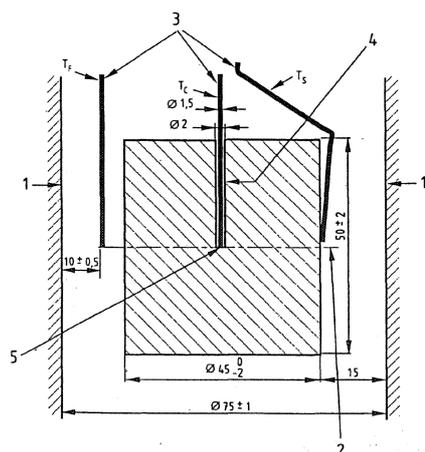
O ensaio de incombustibilidade tem por objectivo a avaliação da combustibilidade de materiais de construção homogéneos ou de componentes de materiais heterogéneos quando expostos a temperaturas elevadas (próximas de 750 °C). Esta avaliação decorre da medição de três grandezas distintas – o **aumento de temperatura**, a **perda de massa** e a **duração de chamas persistentes** – as quais, de acordo com a norma EN 13501-1 [2], constituem critérios classificativos no que respeita à reacção ao fogo de materiais de construção.

Este ensaio é baseado na norma ISO 1182 [3] que determina o recurso a um forno eléctrico (com especificações técnicas normativas próprias) que permite a exposição das amostras ensaiadas a um campo térmico controlado e previamente conhecido. O aumento de temperatura no interior deste forno em resultado da combustão da amostra ensaiada, constitui uma das mensurandas de interesse deste ensaio podendo, opcionalmente e sem efeitos classificativos, promover-se a medição do aumento de temperatura no centro e na superfície lateral da amostra sujeita a ensaio.

2.2 Metodologia de ensaio e mensurandas de interesse

O ensaio de incombustibilidade consiste na exposição de amostras de materiais de construção a elevadas temperaturas similares às que se fazem sentir num incêndio pretendendo-se, desta forma, determinar o comportamento de reacção do material ensaiado no que respeita à sua combustibilidade avaliando-se, conseqüentemente, a sua contribuição para a deflagração e propagação de um incêndio.

Neste ensaio, o aumento de temperatura constitui uma das mensurandas mais relevantes na caracterização do comportamento de reacção ao fogo do material ensaiado face ao campo térmico a que está sujeito no interior de um forno eléctrico. Com efeito, o recurso a um termopar posicionado na região central do forno permite conhecer, nesta posição, a evolução da temperatura ao longo do ensaio, podendo este conhecimento ser complementado, opcionalmente, por medições de temperatura no interior e na superfície lateral da amostra ensaiada conforme ilustrado na figura 1.



Legenda:

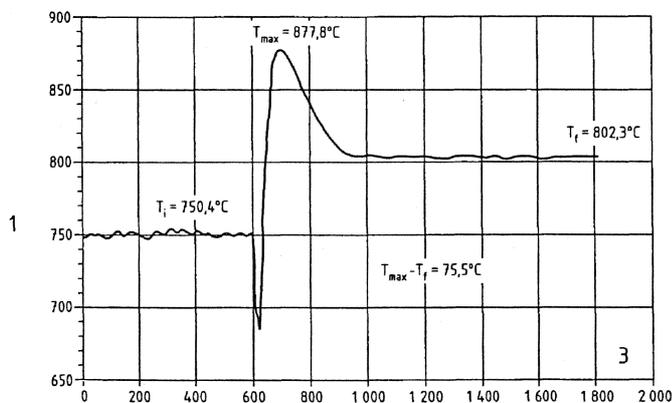
- 1 – Superfície lateral do forno.
- 2 – Nível de medição a meia altura do forno.
- 3 – Termopares.
- 4 – Furo na região central da amostra.
- 5 – Ponto de contacto termopar-amostra.
- T_F – Termopar do forno.
- T_C – Termopar no centro da amostra.
- T_S – Termopar na superfície lateral da amostra.

Figura 1: Localização esquemática dos termopares no ensaio de incombustibilidade [3].

A grandeza aumento de temperatura no forno, ΔT , é definida como a diferença entre a temperatura máxima registada ao longo do período de ensaio, $T_{\text{máx}}$, e a temperatura média final durante o último minuto do período de ensaio, \overline{T}_f , ou seja,

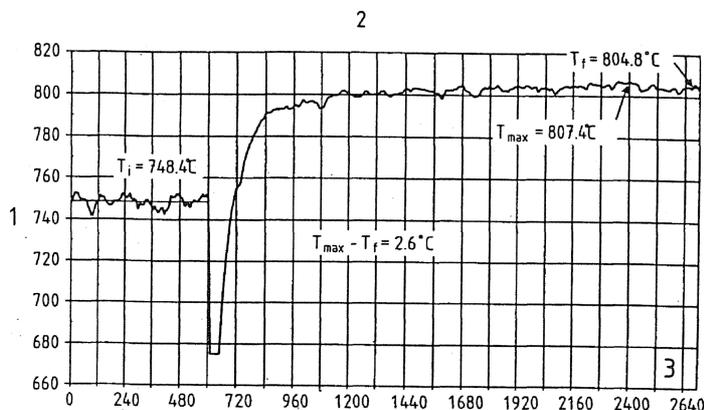
$$\Delta T = T_{\text{máx}} - \overline{T}_f \quad (1)$$

As figuras 2 e 3 ilustram os registos habituais de temperatura do interior do forno obtidos com a realização do ensaio de incombustibilidade.



Legenda:

- 1 – Temperatura (°C)
- 2 – Tempo (s)
- 3 – Fim do ensaio = 30 min



Legenda:

- 1 – Temperatura (°C)
- 2 – Tempo (s)
- 3 – Fim do ensaio = 45 min

Figuras 2 e 3: Registos de temperatura no interior do forno [3].

A perda de massa observada na amostra ensaiada constitui outra mensuranda de interesse no ensaio de incombustibilidade, contribuindo para o conhecimento do comportamento de reacção ao fogo do material ensaiado. As medições da massa da amostra ensaiada antes e após a realização do ensaio representadas, respectivamente, por m_i e m_f permitem definir a grandeza perda de massa, Δm (expressa em valor percentual) como

$$\Delta m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad . \quad (2)$$

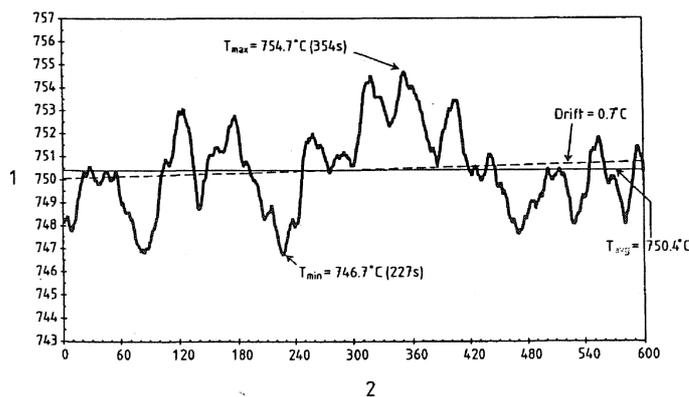
Por último, menciona-se como mensuranda de interesse a duração de chamas persistentes na amostra ensaiada. Segundo a norma de ensaio, uma chama é considerada persistente quando apresenta uma duração individual superior a cinco segundos em qualquer parte visível da amostra ensaiada durante o período de ensaio. Salienta-se que, a realização do ensaio de incombustibilidade implica o estabelecimento de condições iniciais e finais de estabilidade térmica no interior do forno eléctrico destacando-se, neste contexto, a relevância do controlador de potência eléctrica utilizado.

A norma de ensaio define o cumprimento das seguintes condições iniciais de estabilidade térmica durante um período de tempo mínimo de 10 minutos:

- a manutenção da temperatura no intervalo (750 ± 5) °C;
- uma deriva inferior a 2 °C (obtida mediante a realização de uma regressão linear);
- um desvio absoluto máximo de temperatura relativamente à temperatura média inferior ou igual a 10 °C.

No que respeita à condição final de estabilidade térmica, a norma de ensaio estabelece como critério de finalização do ensaio de incombustibilidade, a observação de uma deriva inferior a 2 °C num período de 10 minutos, calculada em intervalos de tempo de cinco minutos mediante a realização de uma regressão linear.

As figuras 4 e 5 exemplificam, respectivamente, os registos de temperatura do forno associados à fase de avaliação da estabilidade térmica inicial e final do ensaio de incombustibilidade.

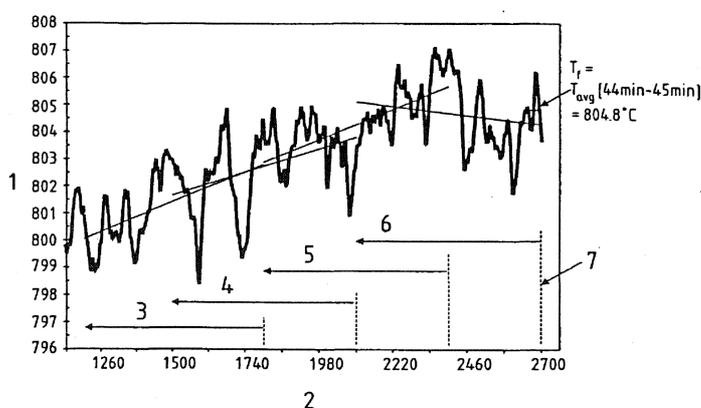


Legenda:

1 – Temperatura (°C)

2 – Tempo (s)

Figura 4: Registo de temperatura do forno para avaliação da estabilidade térmica inicial [3].



Legenda:

1 – Temperatura (°C)

2 – Tempo (s)

3 - Deriva (20 min – 30 min) = 2,76 °C

4 - Deriva (25 min – 35 min) = 2,15 °C

5 - Deriva (30 min – 40 min) = 2,80 °C

6 - Deriva (35 min – 45 min) = 0,84 °C

7 - Fim do ensaio = 45 min

Figura 5: Registo de temperatura do forno para avaliação da estabilidade térmica final [3].

2.3 Montagem experimental

A montagem experimental utilizada no ensaio centra-se no recurso a um forno eléctrico (*Fire Testing Technology*, modelo *ISO 1182 Furnace*) responsável pela criação de um campo térmico controlado, ao qual, são expostas as amostras ensaiadas.

Este forno apresenta como principais elementos constituintes (*vide* figuras 6 e 8) :

- o tubo refractário, cuja superfície interna delimita o volume de ar sujeito a aquecimento;
- a bobine de aquecimento, situada em torno da superfície externa do tubo refractário;
- o isolante térmico, que envolve a bobine de aquecimento, com o objectivo de reduzir as trocas térmicas com o meio envolvente;
- o estabilizador cónico do escoamento de entrada de ar no interior do forno;
- o escudo de protecção contra escoamentos de ar indesejáveis na zona interior do

forno.

Outros elementos a destacar são:

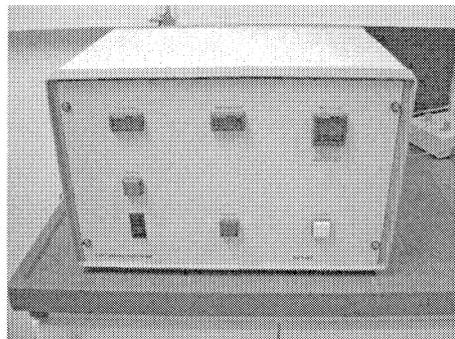
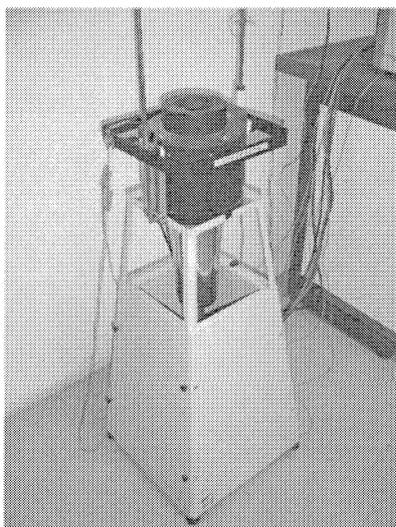
- a estrutura de suporte do forno eléctrico;
- o dispositivo de alojamento e inserção da amostra no interior do forno;
- o controlador de potência eléctrica associada à bobine de aquecimento (*vide* figura 7);
- o espelho para observação indirecta da amostra no interior do forno.

No que respeita à instrumentação de medição utilizada no ensaio, o LNEC/LERF recorre a:

- cinco termopares *Omega*, modelo 219-4365, do tipo K e classe de tolerância 1 (*vide* norma EN 60584);
- um sensor térmico constituído por um termopar instalado num corpo cilíndrico em cobre, utilizado no ensaio preliminar para determinação da temperatura do forno ao longo do seu eixo central;
- uma balança digital *Sartorius*, modelo BL 6100.

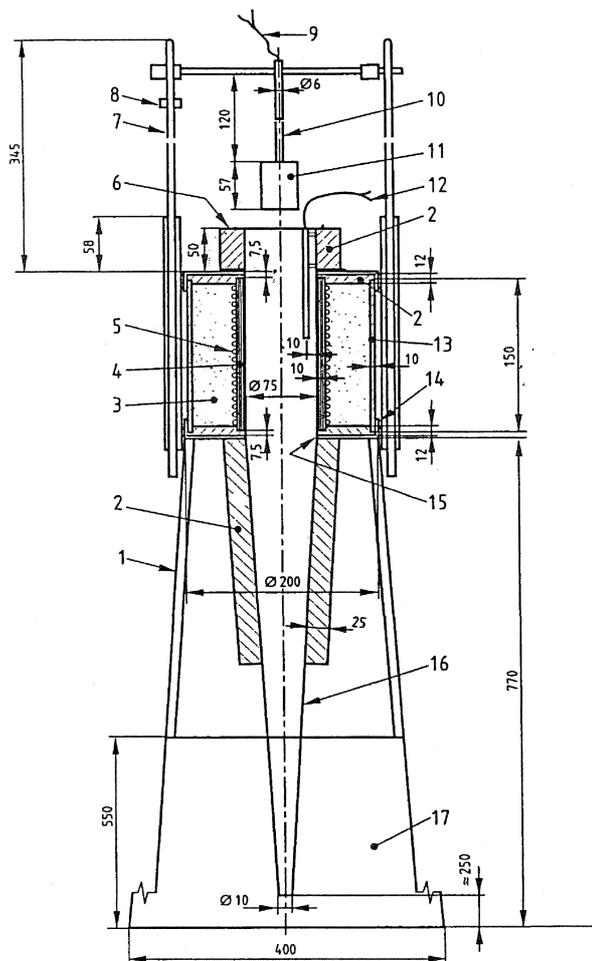
A aquisição e o processamento de dados é suportada por:

- uma placa de interface analógica/digital PCI-DAS-TC (*Measurement Computing*);
- uma aplicação computacional *FTT NonComb Software*.



Figuras 6 e 7: Forno eléctrico e controlador de potência utilizados no LNEC/LERF.

A figura seguinte ilustra detalhadamente os diversos elementos constituintes da montagem experimental anteriormente apresentados .



Legenda:

- 1 – Estrutura de suporte.
- 2 – Isolante térmico.
- 3 – Óxido de magnésio.
- 4 – Tubo refractário.
- 5 – Bobine de aquecimento.
- 6 – Escudo.
- 7 – Dispositivo de inserção.
- 8 – Batente.
- 9 – Termopares para colocação na amostra.
- 10 – Tubo exterior.
- 11 – Estrutura de alojamento da amostra.
- 12 – Termopar do forno.
- 13 – Parede externa de isolamento.
- 14 – Isolante térmico.
- 15 – Selagem.
- 16 – Estabilizador cónico.
- 17 – Revestimento de chapa metálica.

Figura 8: Representação esquemática da montagem experimental [3].

2.4 Ensaios e operações preliminares

A norma do ensaio de incombustibilidade prevê a realização de dois ensaios preliminares visando a determinação do gradiente espacial de temperatura ao nível da superfície lateral e do eixo central do forno eléctrico, sendo efectuados previamente à sua primeira utilização ou após a eventual substituição de um dos seus componentes principais (tubo refractário, bobine de aquecimento, isolamento térmico ou fonte de alimentação).

Salienta-se que, a concretização destes ensaios pressupõe o cumprimento das condições iniciais de estabilidade térmica (citadas em 2.2) de forma idêntica à realização de um ensaio principal de incombustibilidade.

O ensaio de determinação do gradiente espacial de temperatura na superfície lateral do forno consiste na realização de medições ao longo de três eixos verticais, garantindo-se um posicionamento equidistante entre eixos, sendo efectuadas três medições por eixo: na posição a meia altura do tubo do forno e nas posições a uma distância de 30 mm, superior e

inferior à posição a meia altura e no eixo respectivo. As nove medições efectuadas permitem estimar:

- a temperatura média da parede do forno;
- a temperatura média da superfície lateral do forno em cada eixo de medição;
- o desvio absoluto percentual da temperatura média da superfície lateral do forno em cada eixo relativamente à sua temperatura média;
- o valor médio dos desvios absolutos percentuais dos três eixos;
- a temperatura média da superfície lateral do forno em cada um dos três níveis de medição;
- o desvio absoluto percentual da temperatura média da superfície lateral do forno em cada nível de medição relativamente à sua temperatura média;
- o valor médio dos desvios absolutos percentuais dos três níveis de medição.

A norma de ensaio impõe valores máximos para as estimativas de valores médios dos desvios absolutos percentuais referentes aos eixos e aos níveis de medição considerados, devendo também ser verificada uma temperatura média do nível superior mais baixa comparativamente com a temperatura média do nível inferior.

Por sua vez, o ensaio preliminar para determinação da temperatura do forno ao longo do seu eixo central é realizado mediante o recurso a um sensor térmico (*vide* a secção 2.3), sendo este elemento correctamente posicionado no interior do forno através de um dispositivo próprio.

Assegurado o cumprimento das condições iniciais de estabilidade térmica, as medições de temperatura são efectuadas em posições distintas com um afastamento máximo de 10 mm, sendo iniciadas na posição a meia altura do tubo do forno.

Este ensaio deve garantir a obtenção de duas estimativas de temperatura por cada posição do eixo central do forno mediante a realização de medições no sentido ascendente e no sentido descendente. Os valores de temperatura média obtidos para cada posição de medição devem estar em conformidade com as tolerâncias especificadas na norma de ensaio, expostas na tabela 1 e na figura 9.

Tabela 1: Tolerâncias normativas do gradiente de temperatura ao longo do eixo central do forno [3].

Altura do forno (mm)	Temperatura (°C)	
	Limite inferior	Limite superior
145	639	671
135	664	698
125	683	716
115	698	729
105	709	737
95	717	743
85	722	746
75	723	747
65	720	746
55	712	743
45	699	736
35	679	724
25	652	705
15	616	678
5	570	639

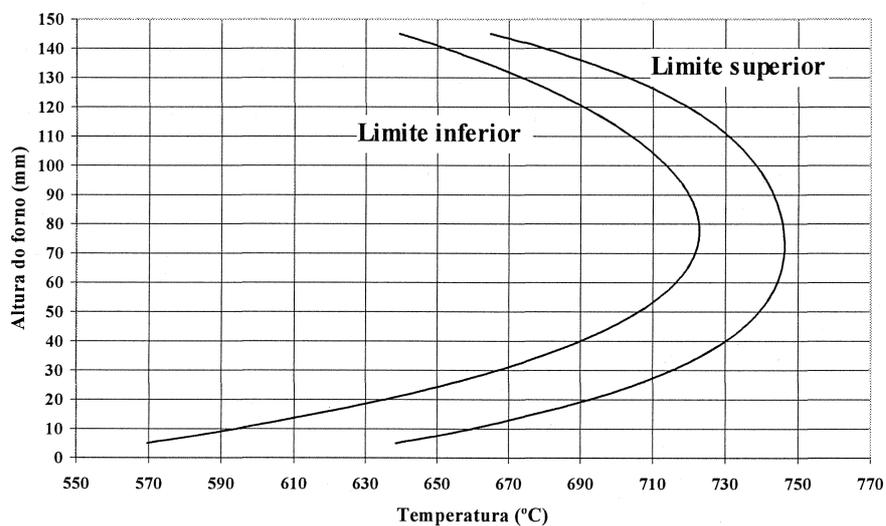


Figura 9: Representação gráfica das tolerâncias normativas do gradiente de temperatura ao longo do eixo central do forno.

Para a concretização do ensaio principal procede-se à preparação de cinco amostras representativas de um dado material de construção homogéneo ou de um elemento constituinte de um material de construção heterogéneo. Estas amostras apresentam uma forma geométrica cilíndrica sendo as suas dimensões definidas pela norma de ensaio vigente.

Posteriormente à fase de preparação, é realizado o seu condicionamento ambiental de acordo com a norma EN 13238, seguindo-se a sua secagem a uma temperatura controlada de (60 ± 5) °C durante um período de 20 a 24 horas. Finalizado este período de tempo, o arrefecimento das amostras para a temperatura ambiente é efectuado num excicador.

2.5 Procedimento de ensaio

Assegurado o cumprimento das condições iniciais de estabilização térmica (conforme expostas na secção 2.2), o ensaio de incombustibilidade é inicializado pela colocação da amostra no forno. Note-se que, a massa inicial da amostra foi previamente determinada com recurso a uma balança digital. O presente ensaio decorre numa sala laboratorial cuja temperatura ambiente não deve sofrer uma alteração superior a 5 °C durante o seu período de realização.

Ao longo do ensaio é promovido o registo temporal das estimativas associadas à grandeza temperatura do forno e a observação contínua da amostra ensaiada de forma a constatar a eventual ocorrência de chamas persistentes e o conseqüente registo da sua duração.

O ensaio apresenta uma duração mínima de 30 minutos estando a sua finalização dependente do cumprimento da condição final de estabilidade térmica – deriva da temperatura do forno no período de tempo definido pelos últimos 10 minutos de realização do ensaio inferior a 2 °C – conforme mencionado na secção 2.2. Caso esta condição de finalização não seja cumprida, o ensaio continua a decorrer até que seja alcançada em intervalos de tempos de cinco minutos ou a duração total do ensaio ultrapasse um período de tempo de 60 minutos.

Por fim, é efectuada a determinação da massa final da amostra ensaiada que inclui a massa dos resíduos de combustão depositados na região inferior do forno resultantes da degradação da amostra durante o ensaio [4].

3 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

3.1 Introdução

Num processo de avaliação da incerteza de medição associada a uma determinada grandeza é possível identificar 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 análise;
- 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.

Face à abordagem probabilística do conceito de medição adoptada neste processo, a concretização da fase de cálculo pode ser suportada em diferentes métodos com maior ou menor grau de complexidade e com diferentes campos de aplicação, destacando-se os seguintes:

- método analítico funcional de convolução de funções de probabilidade;
- método analítico probabilístico de determinação da matriz de variância-covariância;
- métodos numéricos, como por exemplo, o método de Monte Carlo;
- método GUM baseado na aproximação por expansão em série de Taylor (de 1ª ordem ou de 2ª ordem).

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 às soluções exactas, contudo, a sua concretização prática revela uma elevada complexidade tornando-o pouco atractivo ou até exequível para a maioria dos problemas estudados na qual se inclui o presente estudo.

Por sua vez, o método probabilístico citado tem uma aplicação de natureza analítica e, como tal, possui a vantagem da exactidão das soluções obtidas, encontrando-se dependente de se encontrar soluções viáveis com base na axiomática desenvolvida no âmbito da Teoria das Probabilidades.

O método de Monte Carlo (MMC) constitui a metodologia 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 não-lineares ou de linearidade reduzida [5]. É, no entanto, 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.

O método GUM é baseado numa aproximação por expansão em série de Taylor (em regra geral, de 1ª ordem) da relação funcional f representativa do processo de medição da grandeza de saída y com base nas grandezas de entrada x_i , ou seja,

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3)$$

permitindo obter a Lei da Propagação de Incertezas [6], segundo a qual a incerteza-padrão de medição da grandeza de saída, $u(y)$, é expressa por

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} \quad (4)$$

onde $u(x_i)$ correspondem às incertezas-padrão das grandezas de entrada e $u(x_i, x_j)$ exprime a covariância existente entre as grandezas de entrada. 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 .

No contexto das mensurandas de interesse neste estudo, a aplicação do método GUM na avaliação das incertezas de medição associadas às grandezas aumento de temperatura e duração de chamadas persistentes revela-se adequada e de fácil aplicação atendendo à linearidade dos modelos matemáticos representativos dos respectivos processos de medição. No entanto, no caso da grandeza perda de massa (obtida mediante o recurso a uma relação funcional não-linear), a solução obtida por este método constitui apenas uma aproximação. Deste modo, justifica-se o recurso ao MMC como a metodologia mais adequada ao cálculo da incerteza de medição associada a esta grandeza.

Na secção seguinte, concretiza-se a formulação das componentes de incerteza associadas às diversas mensurandas de interesse no ensaio em estudo.

3.2 Componentes de incerteza

3.2.1 Temperatura no forno

A determinação da dispersão de valores atribuídos à grandeza de saída aumento de temperatura implica a formulação das componentes de incerteza associadas à mensuranda temperatura do forno com base no método de ensaio e no instrumento de medição utilizados, conforme é possível constatar pela observação da tabela 2 (página 17).

Neste contexto, destaca-se a realização de um ensaio experimental visando avaliar a estabilidade da temperatura do forno em virtude do escoamento turbulento de ar, originado pelo gradiente térmico espacial estabelecido entre o interior do forno e o meio envolvente. Neste ensaio promoveu-se a manutenção do forno à temperatura nominal de 750 °C (na ausência de qualquer amostra no seu interior) durante um período de 30 minutos e o consequente registo dos valores de temperatura obtidos pelo termopar colocado no seu interior (*vide* figura 1, página 4). A figura seguinte ilustra os resultados obtidos com a realização deste ensaio.

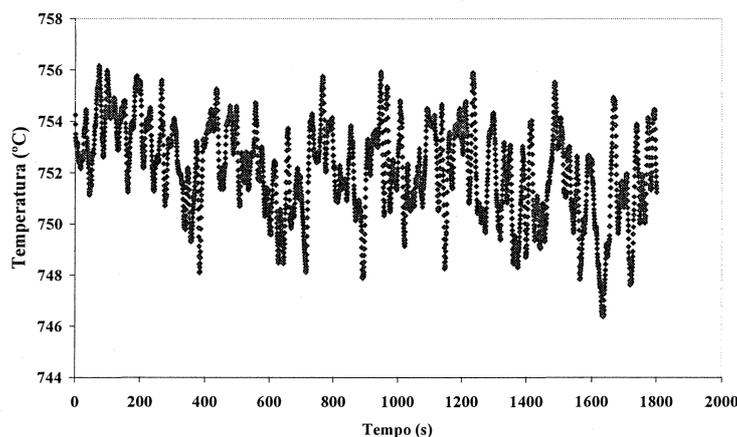


Figura 10: Dispersão das estimativas da temperatura do forno durante o ensaio experimental.

De acordo com os resultados obtidos, a componente de incerteza de estabilidade é estimada mediante a diferença máxima entre os valores de temperatura registados durante o ensaio (aproximadamente 10 °C) considerando uma distribuição rectangular centrada cuja amplitude é definida pela diferença de temperatura citada.

O ensaio realizado evidencia, também, a existência de uma deriva de curto prazo atribuída à transferência de calor por condução ao nível da bainha metálica do termopar utilizado em resultado do gradiente térmico existente no interior do forno. A quantificação desta componente de incerteza baseia-se na realização de uma regressão linear dos dados experimentais recolhidos e na determinação da diferença absoluta entre a temperatura inicial

e a temperatura final estimadas a partir da recta de regressão estimada.

Salienta-se também que, a consulta do registo histórico do LNEC/LERF relativo aos ensaios preliminares realizados no contexto do ensaio em estudo permitiu constatar a existência de um significativo gradiente térmico de distribuição assimétrica no interior do forno eléctrico, em particular, ao nível da secção a meia altura do forno onde é efectuada a medição da temperatura do forno. De acordo com a norma de ensaio, esta medição deve ser efectuada a uma distância nominal de 10 mm de afastamento em relação à parede lateral do forno, conforme representado na figura seguinte.

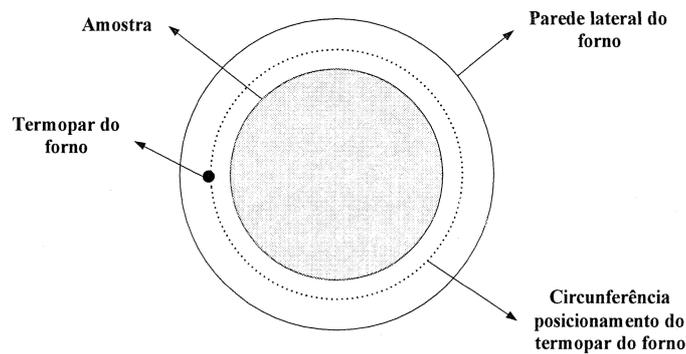


Figura 11: Representação esquemática da secção a meia altura do forno eléctrico.

Deste modo, é possível definir uma circunferência hipotética no interior do forno na qual é permitido o posicionamento do termopar que efectua as medições de temperatura ao longo do ensaio o que, conjugado com a assimetria do gradiente térmico no interior do forno, traduz-se na existência de uma componente de incerteza de uniformidade. Esta reflecte a dispersão de valores de temperatura obtidos com o posicionamento do termopar em diferentes posições da referida circunferência.

A realização de um ensaio experimental visando a obtenção de estimativas da grandeza temperatura em posições (espaciais) da circunferência revela-se inadequada dado não ser possível efectuar com exactidão o posicionamento do termopar no interior do forno, facto que é agravado pelo significativo gradiente térmico existente no seu interior.

Com efeito, apenas é possível assegurar o posicionamento de um termopar ao nível da parede lateral do forno, o que justifica que a quantificação desta componente de incerteza seja baseada nas medições de temperatura efectuadas no âmbito do ensaio preliminar de determinação do gradiente espacial. De acordo com o registo histórico dos ensaios preliminares realizados pelo LNEC/LERF, a assimetria térmica admite uma diferença máxima que é observada ao nível da parede lateral a meia altura do forno, sendo o seu valor de, aproximadamente, 8 °C, assumindo-se neste caso uma distribuição rectangular centrada

cuja amplitude é definida pelo valor de temperatura mencionado.

Tabela 2: Componentes de incerteza associadas à grandeza temperatura do forno.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	FDP*	Fonte de informação
$\delta T_{\text{calibração}}$	Calibração dos termopares	$\pm 0,9^\circ\text{C}$	N	Certificado de calibração
$\delta T_{\text{estabilidade}}$	Estabilidade	$\pm 10^\circ\text{C}$	R	Ensaio experimental
$\delta T_{\text{uniformidade}}$	Uniformidade	$\pm 8,0^\circ\text{C}$	R	Registo histórico de ensaios preliminares
δT_{bainha}	Transferência de calor pela bainha do termopar (deriva de curto prazo)	$\pm 2,0^\circ\text{C}$	N	Ensaio experimental
$\delta T_{\text{JF sensor}}$	Sensor de temperatura na junção fria	$\pm 0,3^\circ\text{C}$	N	Especificações do fabricante** do sistema de aquisição de dados [7]
$\delta T_{\text{JF linearidade}}$	Linearidade da medição de temperatura da junção fria	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	N	
$\delta T_{\text{JF estabilidade}}$	Estabilidade da temperatura da junção fria	$\pm 1,2^\circ\text{C}$	N	
$\delta T_{\text{exactidão}}$	Nível de exactidão do voltímetro	$\pm 0,7^\circ\text{C}$	N	
$\delta T_{\text{resolução}}$	Resolução do voltímetro	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	R	
$\delta T_{\text{linearidade}}$	Linearidade do conversor analógico-digital (AD)	$\pm 1,0^\circ\text{C}$	N	
$\delta T_{\text{deriva ganho}}$	Deriva do ganho do conversor AD	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	N	
$\delta T_{\text{deriva zero}}$	Deriva do zero do conversor AD	$\pm 1,2^\circ\text{C}$	N	

* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

** As especificações do fabricante relativas às características metroológicas do voltímetro e do conversor AD utilizados encontram-se expressas em V pelo que foi necessário recorrer às tabelas NIST [8] dos coeficientes de Seebeck (para o termopar tipo K, na gama de medição compreendida entre 600°C e 900°C , com junção fria a uma temperatura de 0°C) para efectuar a sua conversão para $^\circ\text{C}$. Constatou-se que a incerteza associada à estimativa do coeficiente de Seebeck utilizado tem um efeito desprezável sobre a incerteza da conversão realizada.

3.2.2 Massa da amostra

Na medição da massa da amostra ensaiada identificam-se as seguintes componentes de incerteza (conforme expostas na tabela 3): a calibração da balança digital, a repetibilidade, a linearidade e a resolução. Neste caso, atendendo ao procedimento adoptado, consideram-se desprezáveis as contribuições associadas aos desvios de excentricidade e reversibilidade.

Tabela 3: Componentes de incerteza associadas à estimativa da massa da amostra ensaiada.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	FdP*	Fonte de informação
$\delta m_{\text{calibração}}$	Calibração da balança digital	$\pm 0,04\text{ g}$	N	Certificado de calibração
$\delta m_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade	$\pm 0,10\text{ g}$	R	Especificações do fabricante [9]
$\delta m_{\text{linearidade}}$	Linearidade	$\pm 0,20\text{ g}$	R	
$\delta m_{\text{resolução}}$	Resolução	$\pm 0,10\text{ g}$	R	

* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

As distribuições de probabilidade adoptadas são, em regra, rectangulares uma vez que as especificações dos fabricantes correspondem a valores limites dos desvios, não sendo possível dispor de informação mais detalhada acerca da sua variabilidade. A excepção ocorre no que se refere à componente de incerteza associada à calibração da balança digital, esta resulta da aplicação da Lei de Propagação de Incertezas, aplicando-se o Teorema do Limite Central, o que permite considerar que a distribuição de probabilidade é normal.

3.2.3 Duração de chamadas persistentes

No LNEC/LERF, a medição da duração de chamadas persistentes é efectuada pelo operador o qual recorre ao registador de tempo de ensaio presente na aplicação computacional utilizada no contexto do ensaio de incombustibilidade. Deste modo, identificam-se como componentes de incerteza a calibração e a resolução associadas ao instrumento de medição.

No que respeita à componente de incerteza atribuída ao operador considera-se que esta é, fundamentalmente, determinada pelo tempo de resposta do operador face à detecção da chama e a consequente realização da medição considerando-se na sua quantificação uma estimativa de natureza empírica associada a uma distribuição rectangular.

Note-se que, no LNEC/LERF, o ensaio de incombustibilidade é efectuado sempre pelo mesmo operador, o que justifica não se admitir uma componente de incerteza de repetibilidade associada à realização deste ensaio por diferentes operadores.

De acordo com a norma de ensaio, a identificação de uma chama persistente por parte do operador poderá ser dificultada pela formação, em algumas amostras ensaiadas, de uma zona gasosa luminosa azul a qual não deverá ser considerada como uma chama persistente devendo, no entanto, ser registada a sua ocorrência. A familiarização do operador do LNEC/LERF com a existência deste fenómeno torna esta componente de incerteza desprezável face às outras componentes apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 4: Componentes de incerteza associadas à duração de chamadas persistentes.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Limites de variação	FdP*	Fonte de informação
δt_f calibração	Calibração do contador de tempo de ensaio	$\pm 0,01$ s	N	Certificado de calibração
δt_f resolução	Resolução do contador de tempo de ensaio	$\pm 1,0$ s	R	Aplicação computacional [10]
δt_f resposta	Tempo de resposta do operador	$\pm 0,5$ s	R	Estimativa empírica

* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

3.3 Avaliação da incerteza de medição das grandezas aumento de temperatura e duração de chamas persistentes pelo método GUM

3.3.1 Aumento de temperatura

Considerando as componentes de incerteza citadas na tabela 2, a aplicação da Lei de Propagação de Incertezas, de acordo com o método GUM, à grandeza temperatura do forno, T , determina que a correspondente incerteza-padrão seja igual a $u(T) = \pm 4,8^\circ\text{C}$.

A relação funcional representativa da medição da grandeza aumento de temperatura (*vide* expressão 1, página 4) revela a existência de duas grandezas de entrada: a temperatura máxima, $T_{\text{máx}}$, registada ao longo do período de ensaio, à qual podemos atribuir a incerteza-padrão citada nesta secção para a medição pontual de temperatura do forno, ou seja, $u(T_{\text{máx}}) = \pm 4,8^\circ\text{C}$; e a temperatura média final, $\overline{T_f}$, obtida com base na realização de n observações da temperatura do forno, T_{f_i} , durante o último minuto do período de ensaio.

Neste último caso, pelo facto de traduzir uma média aritmética de uma amostra de valores instantâneos de temperatura do forno com uma dimensão igual a 120 (note-se que a frequência de aquisição corresponde a 2 Hz), a incerteza-padrão da grandeza temperatura média final resulta:

- do desvio-padrão experimental da média, em que $u(T_{f_i}) = \pm 4,8^\circ\text{C}$, conforme a incerteza-padrão de uma qualquer medição instantânea da temperatura do forno;
- do desvio-padrão das observações realizadas durante o último minuto do período de ensaio assumindo-se, neste caso, o valor do desvio-padrão de $\pm 1,8^\circ\text{C}$ obtido no ensaio de estabilidade referido em 3.2.1.

Deste modo, a aplicação da Lei de Propagação de Incertezas conduz à seguinte expressão

$$u(\Delta T) = \sqrt{u^2(T_{\text{máx}}) + \frac{u^2(T_{f_i})}{n} + s^2(T_f)} \quad (5)$$

Como a grandeza temperatura final é estimada mediante o cálculo de uma média aritmética, é expectável que o efeito de correlação entre a grandeza temperatura máxima e a temperatura média final (ambas as medições recorrem ao mesmo instrumento de medição) seja significativamente reduzido. Este facto é confirmado pelos valores do coeficiente de correlação obtidos em ensaios de incombustibilidade relativos a lotes independentes de

amostras de um dado material, conforme é possível observar na tabela seguinte.

Tabela 5: Coeficiente de correlação das grandezas temperatura máxima e temperatura final.

Lote de ensaio	Dimensão da amostra	Coeficiente de correlação
1	5	0,10
2	7	-0,04
3	9	0,11
4	10	0,07

De acordo com a expressão (5), a **incerteza-padrão** atribuída à estimativa da grandeza aumento de temperatura corresponde a $u(\Delta T) = \pm 5,2^\circ\text{C}$, enquanto que a sua **incerteza expandida**, num intervalo de confiança de 95 %, corresponde a $U(\Delta T) = \pm 10^\circ\text{C}$ assumindo-se um número elevado de graus de liberdade e considerando válida a aplicação do Teorema do Limite Central.

3.2.2 Duração de chamas persistentes

De acordo com as componentes de incerteza mencionadas na tabela 4, a aplicação da Lei de Propagação de Incertezas conduz, no caso da grandeza duração de chamas persistentes, à expressão

$$u(t_f) = \sqrt{u^2(t_f \text{ calibração}) + u^2(t_f \text{ resolução}) + u^2(t_f \text{ resposta})}, \quad (6)$$

obtendo-se uma **incerteza-padrão** da mensuranda de interesse igual a $\pm 1,1 \text{ s}$. Tendo em conta um número elevado de graus de liberdade e considerando válido o recurso ao Teorema do Limite Central, a **incerteza expandida**, num intervalo de confiança de 95 %, corresponde a $\pm 2,2 \text{ s}$.

3.4 Avaliação da incerteza de medição da grandeza perda de massa pelo método de Monte Carlo

A medição, por via indirecta, da grandeza perda de massa é efectuada mediante o recurso ao um modelo matemático não-linear no qual estão presentes as grandezas de entrada massa inicial e massa final da amostra ensaiada, cujas componentes de incertezas constam na secção 3.2.2.

Na presente avaliação recorre-se ao método de Monte Carlo (MMC) que 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 traduz-se na convolução das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada, de acordo com o modelo matemático em estudo, obtendo-se como resultado a função de distribuição de probabilidade da grandeza de saída (*vide* a figura 12).

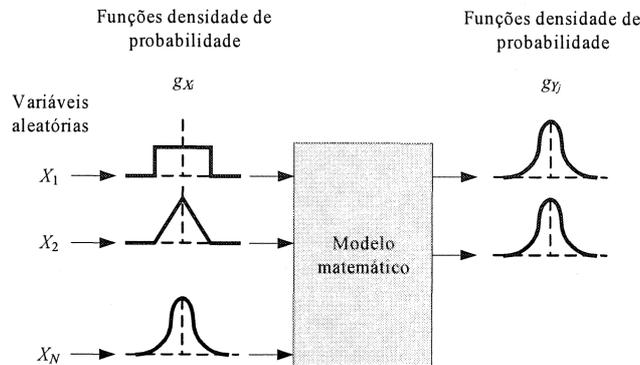


Figura 12: Conversão da informação de entrada em informação de saída através do modelo matemático representativo da medição [5].

Para esse efeito, o procedimento de avaliação 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 13.

Nesta figura, destacam-se 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.

Neste estudo recorreu-se ao gerador de números pseudo-aleatórios Mersenne Twister [11] para a obtenção de sequências numéricas com uma dimensão típica de 10^6 , tendo sido utilizados algoritmos de conversão e ordenação descritos em [12]. O nível de exactidão das simulações numéricas efectuadas foi obtido de acordo com o algoritmo descrito por Cox [13].

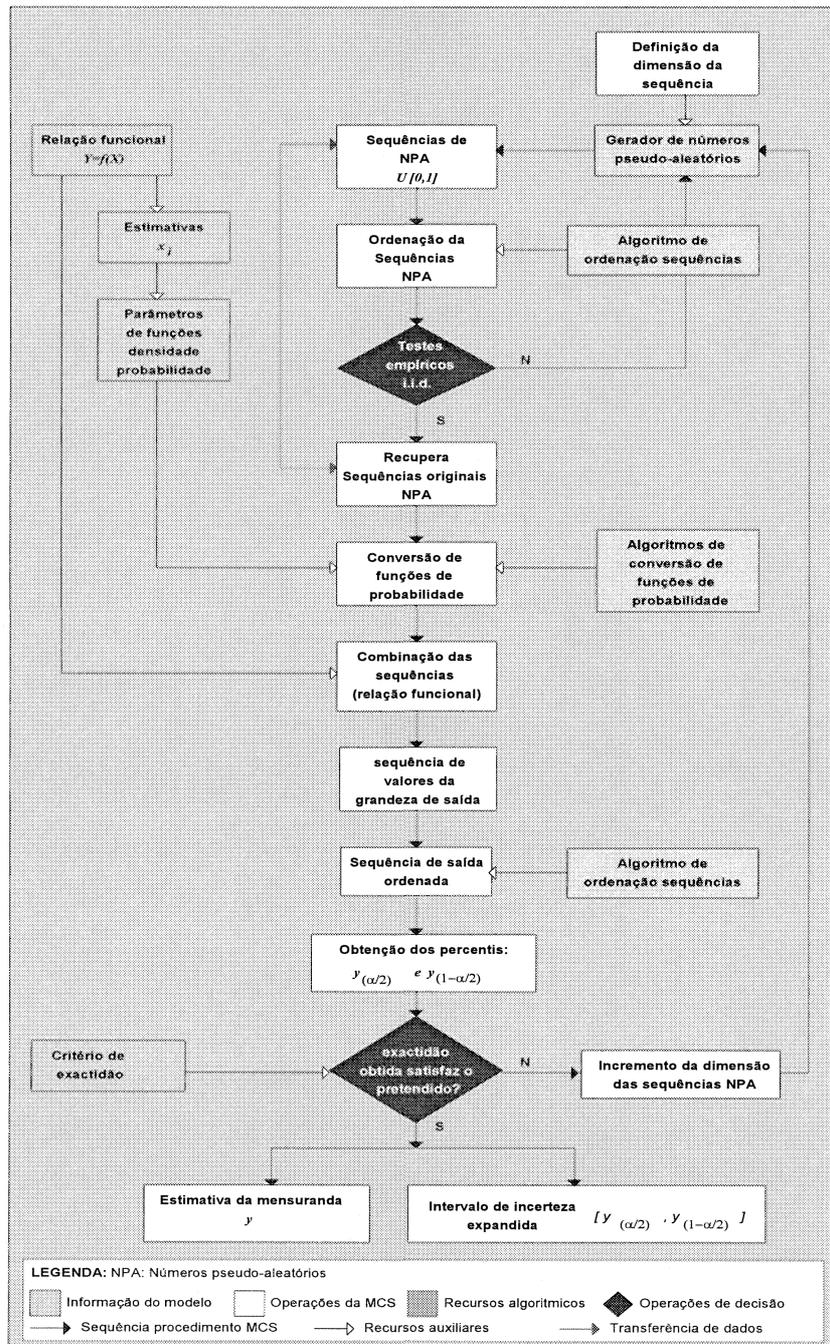


Figura 13: Diagrama ilustrativo do processo de simulação pelo MMC [5].

Como ambas as grandezas de entrada – a massa inicial e final da amostra – são obtidas mediante a utilização do mesmo instrumento de medição justifica-se uma análise do efeito de correlação entre ambas as grandezas citadas.

Para este efeito, promoveu-se a determinação do coeficiente de correlação com base nos resultados de ensaios relativos a lotes independentes de amostras de um dado material, conforme é possível observar na tabela 6.

Tabela 6: Coeficiente de correlação das grandezas massa inicial e massa final.

Lote de ensaio	Dimensão da amostra	Coeficiente de correlação
1	5	0,20
2	7	0,14
3	9	0,11
4	10	0,09

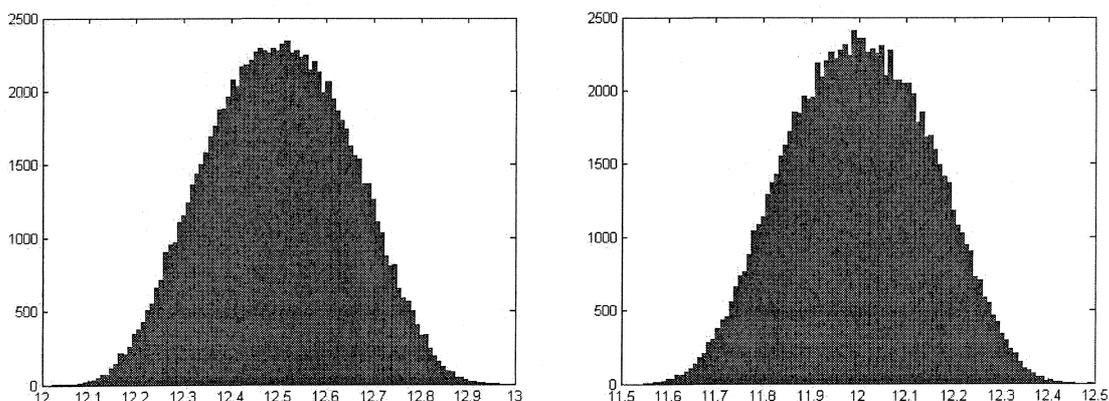
Atendendo aos resultados obtidos considera-se que a correlação estabelecida entre as grandezas de entrada em estudo não é significativamente relevante para a avaliação de incerteza de medição realizada.

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as grandezas de entrada e para a grandeza de saída, mediante a aplicação do MMC, com base nos dados de entrada recolhidos para o material de construção (lã de rocha) cujo ensaio de incombustibilidade apresenta maior frequência de realização no contexto da actividade experimental do LNEC/LERF.

Tabela 7: Incerteza de medição da perda de massa associada ao ensaio de lã de rocha.

Dados de entrada		Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
m_i	m_f						
12,2 g	11,8 g	m_i (g)	12,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 0,05$	$\pm 0,004$
		m_f (g)	11,8	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 0,05$	$\pm 0,004$
		Δm (%)	3,3	$\pm 1,6$	$\pm 3,2$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$

As figuras 14 a 16 constituem os histogramas representativos da variabilidade típica das grandezas de entrada e da grandeza de saída obtidos mediante o respectivo processo de simulação numérica.



Figuras 14 e 15: Histogramas da grandeza massa inicial e da grandeza massa final.

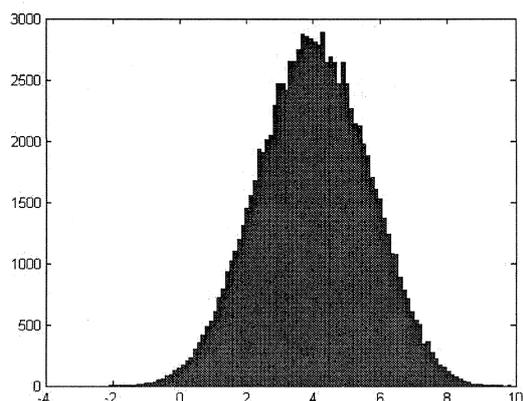


Figura 16: Histograma da grandeza de saída perda de massa.

Por sua vez, a tabela 8 resume os resultados obtidos, por aplicação do MMC, com base em dados de entrada relativos ao ensaio de outros materiais, tendo-se constatado que as incertezas de medição das grandezas de entrada (massa inicial e massa final da amostra) são idênticas às apresentadas anteriormente.

Tabela 8: Resultados obtidos para ensaios de incombustibilidade com menor frequência de realização.

Dados de entrada		Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
m_i	m_f						
26,5 g	12,8 g	Δm (%)	51,7	$\pm 0,6$	$\pm 1,2$	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$
53,0 g	29,1 g	Δm (%)	45,1	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$
67,0 g	65,6 g	Δm (%)	2,1	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$
98,7 g	83,4 g	Δm (%)	15,5	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$
112,0 g	106,4 g	Δm (%)	5,0	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,05$	$\pm 0,005$
168,4 g	152,1 g	Δm (%)	9,7	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,05$	$\pm 0,005$

Os resultados da incerteza de medição da grandeza perda de massa expressos nas tabelas anteriores demonstram a existência de uma significativa influência da massa inicial da amostra ensaiada na incerteza-padrão obtida. De facto, é possível constatar que ensaios de incombustibilidade de materiais distintos conduzem a estimativas de perda de massa bastante próximas mas cujas incertezas-padrão de medição diferem significativamente, atribuindo-se este facto à diferença de massa inicial entre as amostras ensaiadas, concluindo-se que quanto menor for o valor desta grandeza de entrada maior será a incerteza de medição da grandeza de saída, conforme é possível observar na figura 17.

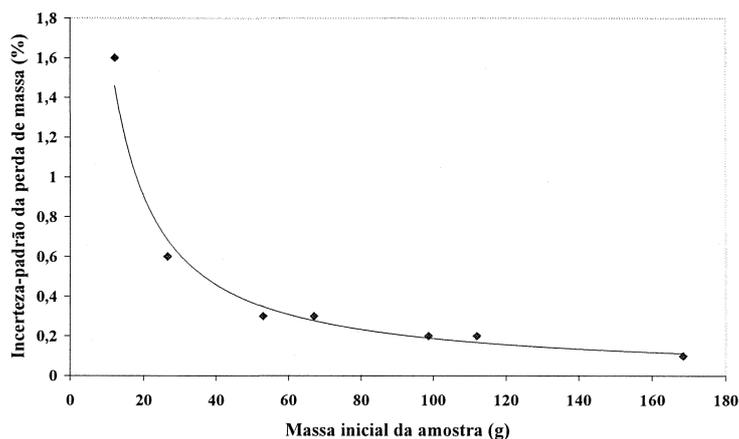


Figura 17: Relação funcional entre a massa inicial da amostra e a incerteza-padrão da perda de massa.

A aplicação de uma regressão não-linear do tipo potência permite exprimir, de forma aproximada, a **incerteza-padrão** associada à estimativa da grandeza perda de massa como

$$u(\Delta m) = 16,7 m_i^{-0,98} \quad , \quad (7)$$

em que m_i corresponde à massa inicial da amostra.

Por observação da figura 16 constata-se que, a dispersão de valores atribuídos à mensuranda de interesse apresenta uma distribuição probabilística próxima da distribuição gaussiana pelo que se considera válida a aplicação do Teorema do Limite Central. Com efeito, a **incerteza expandida** associada à estimativa da grandeza perda de massa, considerando um número infinito de graus de liberdade e um intervalo de confiança de 95 %, é dada por

$$U(\Delta m) = 33,4 m_i^{-0,98} \quad . \quad (8)$$

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu efectuar a avaliação das incertezas de medição associadas às estimativas das grandezas aumento de temperatura, perda de massa e duração de chamas persistentes obtidas pelo *ensaio de incombustibilidade*, mediante a caracterização metrológica realizada para as diversas grandezas envolvidas.

A tabela seguinte exprime as incertezas de medição obtidas evidenciando-se, deste modo, o grau de qualidade das medições efectuadas no ensaio de reacção ao fogo em estudo, aspecto essencial no contexto da acreditação de laboratórios do LNEC no Sistema Português da Qualidade.

Tabela 9: Incertezas de medição das mensurandas de interesse.

Grandeza	Incerteza-padrão	Incerteza expandida (95 %)
Aumento de temperatura	$\pm 5,2$ °C	± 10 °C
Perda de massa	$\pm(16,7 m_i^{-0,98})$ %	$\pm(33,4 m_i^{-0,98})$ %
Duração de chamas persistentes	$\pm 1,1$ s	$\pm 2,2$ s

Comparando os resultados obtidos com os critérios classificativos relativos à reacção ao fogo mediante a realização do ensaio de incombustibilidade, verifica-se que apenas a grandeza aumento de temperatura apresenta uma incerteza de medição expandida (num intervalo de confiança de 95 %) próxima da amplitude das classes definidas pela norma EN 13501-1 [2], o que poderá afectar significativamente a reprodutibilidade das classificações efectuadas pelos diferentes laboratórios de ensaio.

Este facto é confirmado pelos resultados obtidos pela realização de um ensaio de comparação interlaboratorial [14], o qual contou com a participação do LNEC/LERF, tendo-se verificado que a reprodutibilidade do ensaio realizado, no que respeita à medição da grandeza aumento de temperatura, correspondeu a $\pm 5,2$ °C.

A análise das componentes de incerteza relativas à medição da grandeza temperatura do forno revela que as fontes de incerteza predominantes estão associadas ao método de ensaio, nomeadamente, a estabilidade e a uniformidade do forno eléctrico utilizado.

Por último refere-se que, no processo de avaliação das incertezas de medição desenvolvido para as diversas mensurandas de interesse, foram utilizadas metodologias distintas, cada uma das quais adequadas ao contexto particular das grandezas estudadas.

VISTOS

O Director do CIC,



Francisco Carvalhal
Investigador Coordenador

AUTORIA



Luís Filipe Lages Martins
Eng.º Mecânico
Bolsheiro de Iniciação à Investigação Científica



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

Faint, illegible handwritten text.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN ISO/IEC 17025:2005 – Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração, 2ª edição. Lisboa (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Dezembro de 2005.
- [2] NP EN 13501-1:2004 – Classificação do desempenho face ao fogo de produtos e de elementos de construção – Parte 1: classificação utilizando resultados de ensaios de reacção ao fogo. Lisboa (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Dezembro de 2004.
- [3] ISO 1182:2002 – Reaction to fire tests for building products – Non-combustibility test. Genève (Suíça): International Organisation for Standardisation (ISO), Fevereiro de 2002.
- [4] *ES 3 – Ensaio no forno ISO – Procedimentos Gerais (versão 1)*. Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF), Janeiro de 2007.
- [5] Ribeiro, A. S. – *Avaliação de Incertezas de Medição em Sistemas Complexos Lineares e Não-Lineares – Teses e Programas de Investigação LNEC*. Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2007.
- [6] *Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*. Genève (Suíça): International Organization for Standardization (ISO), 1993, re-editado em 1995.
- [7] *PCI-DAS-TC User's Manual – Thermocouple Inputs for PCI Bus – Revision 2*. Norton, Massachusetts (EUA): Measurement Computing Corporation, 2001.
- [8] *NIST ITS-90 Thermocouple Database – NIST Standard Reference Database 60*, web version 2.0 (disponível em <http://srdata.nist.gov/its90/main/>), baseada em, *NIST Monograph 175 – Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouples Types based on ITS-90*. Gaithersburg, Maryland (EUA): National Institute of Standards and Technology (NIST), 1993.
- [9] *Sartorius – Manual de instrucciones – Sartorius Basic^{lite}, Sartorius Gem^{lite}*. Goettingen (Alemanha): Sartorius AG, Junho de 2002.
- [10] *User's Guide for the NonComb Software Package – Version 2*. East Grinstead, West Sussex (Reino Unido): Fire Testing Technology Limited, Outubro de 2003.
- [11] Matsumoto, M. and Nishimura, T. – Mersenne Twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, In *AC Trans. On Model. And Comp. Sim.* **8**, 1, 3-30, 1998.

- [12] Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*. New York (EUA): Cambridge University Press, 1986.

- [13] Cox, M. G., Dainton, M. P. and Harris, P. M., *Software Specifications for Uncertainty Calculation and Associated Statistical Analysis*, National Physical Laboratory (NPL) Report CMSC 10/01. Teddington, Middlesex (Reino Unido): Ed. Crown, 2001.

- [14] Steen-Hansen, A. and Paap, F., *Report from the EGOLF EN ISO 1182 round robin exercise 2006/2007* – Report NBL A07122. Trondheim (Noruega): SINTEF NBL, 2007.

