



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 determinação do comportamento ao fogo
de revestimentos de pisos utilizando uma fonte de calor
radiante**

Estudo realizado por solicitação do Departamento
de Edifícios do LNEC

Lisboa • Junho de 2008

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 221/2008 – NQM

Caracterização Metrológica e Avaliação de Incertezas no Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF): Ensaio de Determinação do Comportamento ao Fogo de Revestimentos de Pisos utilizando uma Fonte de Calor Radiante

Resumo

Este relatório apresenta a caracterização metrológica e a avaliação de incertezas de medição do *Ensaio de Determinação do Comportamento ao Fogo de Revestimentos de Pisos utilizando uma Fonte de Calor Radiante*, realizado no Laboratório de Ensaios 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 densidade de fluxo térmico e atenuação luminosa acumulada.

Metrological Characterization and Uncertainty Evaluation in the Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF): Reaction to Fire Tests for Floorings – Determination of the Burning Behaviour using a Radiant Heat Source

Abstract

This report presents the metrological characterization and the measurement uncertainty evaluation related with the *Reaction to Fire Tests for Floorings – Determination of the Burning Behaviour using a Radiant Heat Source* – carried out by the Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/LERF). The current document includes a description of the studied test and describes the measurement uncertainty evaluation of the heat flux density and integrated light attenuation quantities.

Caractérisation Métrologique et Évaluation des Incertitudes dans le Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo (LNEC/LERF): Essai de Détermination du Comportement au Feu des Revêtements de Sol à l'aide d'une Source de Chaleur Rayonnante

Résumé

Ce rapport présente la caractérisation métrologique et l'évaluation des incertitudes de mesurage de l'*Essai de Détermination du Comportement au Feu des Revêtements de Sol à l'aide d'une Source de Chaleur Rayonnante*, réalisé par le Laboratório de Ensaios 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 densité de flux thermique et atténuation lumineuse accumulée.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE REVESTIMENTOS DE PISOS UTILIZANDO UMA FONTE DE CALOR RADIANTE.....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Metodologia de ensaio.....	4
2.2.1 Gradiente espacial de densidade de fluxo térmico.....	4
2.2.2 Atenuação luminosa pela presença de fumo.....	7
2.3 Montagem experimental.....	9
2.3.1 Infra-estrutura laboratorial.....	9
2.3.2 Instrumentação de medição.....	10
2.4 Ensaios e operações preliminares.....	11
2.5 Procedimento de ensaio.....	13
3 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	15
3.1 Introdução.....	15
3.2 Componentes de incerteza.....	16
3.2.1 Densidade de fluxo térmico de referência.....	16
3.2.1.1 Método de calibração.....	16
3.2.1.2 Regressão linear.....	17
3.2.1.3 Repetibilidade.....	20
3.2.1.4 Deriva.....	20
3.2.2 Posição de referência do fluxímetro térmico.....	21
3.2.3 Distância percorrida pela frente de chama.....	22
3.2.4 Transmitância.....	22
3.3 Avaliação da incerteza de medição da densidade de fluxo térmico pelo método de Monte Carlo.....	25
3.4 Avaliação da incerteza de medição da atenuação luminosa acumulada pelo método GUM.....	27
3.5 Resultados obtidos.....	28
3.5.1 Densidade de fluxo térmico.....	28
3.5.2 Atenuação luminosa acumulada.....	30
4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

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 de saída. 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 Determinação do Comportamento ao Fogo de Revestimentos de Pisos utilizando uma Fonte de Calor Radiante**, fundamentada

na actividade laboratorial desenvolvida no LNEC/LERF.

Relativamente ao conteúdo deste documento, refira-se que, no capítulo 2 se efectua uma descrição do presente ensaio no que respeita à metodologia de ensaio, à montagem experimental, aos ensaios e às operações preliminares e ao procedimento de ensaio aplicado.

No capítulo 3 encontram-se descritas as metodologias de avaliação de incertezas adoptadas e as respectivas componentes de incerteza das mensurandas de interesse neste estudo – a densidade de fluxo térmico e a atenuação luminosa acumulada – sendo apresentados os resultados obtidos pela avaliação efectuada.

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

2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE REVESTIMENTOS DE PISOS UTILIZANDO UMA FONTE DE CALOR RADIANTE

2.1 Introdução

O ensaio de determinação do comportamento ao fogo de revestimentos de pisos tem por objectivo a medição de duas grandezas – a **densidade de fluxo térmico** e a **atenuação luminosa acumulada** – as quais, de acordo com a norma EN 13501-1 [2], determinam critérios classificativos no que respeita à reacção ao fogo de materiais destinados a revestimentos de pisos.

No contexto normativo, este ensaio é baseado na norma ISO 9239-1 [3] que determina a colocação da amostra representativa do revestimento de piso a ensaiar numa posição horizontal e sob um painel radiante (com uma inclinação de 30° relativamente ao posicionamento da amostra), possibilitando a sua exposição a um gradiente espacial conhecido de densidade de fluxo térmico. Deste modo, pretende-se simular as condições térmicas existentes ao nível de um piso de um corredor cujas superfícies superiores são aquecidas mediante a presença de chamas e gases na fase inicial de desenvolvimento de um incêndio.

A norma de ensaio impõe, também, a existência de uma chama na extremidade da amostra mais próxima do painel radiante que, num dado instante da realização do ensaio, é aplicada directamente sobre a sua superfície de forma a originar a sua ignição. Ao longo da propagação da chama sobre a amostra, promove-se o registo do tempo que a frente de chama demora a alcançar determinadas distâncias de progressão e, por outro lado, o registo da distância percorrida pela frente de chama num dado intervalo de tempo.

O conhecimento prévio do gradiente espacial de densidade de fluxo térmico existente no interior da câmara de ensaio – obtido mediante a realização de um ensaio preliminar – permite converter as distâncias de progressão da frente de chama nas respectivas densidades de fluxo térmico. Tem particular interesse o conhecimento da densidade de fluxo térmico no instante em que a chama sobre a amostra se extingue ou da densidade de fluxo térmico após o período de ensaio de 30 minutos, isto é, a determinação da densidade de fluxo térmico crítico: a densidade de fluxo térmico relativa à distância máxima de propagação da chama sobre amostra durante o período de ensaio.

Neste ensaio efectua-se, também, a medição da atenuação luminosa acumulada de um feixe de luz no interior na condução de extracção de gases do interior da câmara de ensaio sendo realizada, complementarmente e sem efeitos classificativos, a medição do tempo de extinção da chama sobre a superfície da amostra e a correspondente distância máxima final de propagação de chama.

Nas secções seguintes apresentam-se os aspectos mais relevantes deste ensaio relativos à metodologia de ensaio, à montagem experimental, aos ensaios e às operações preliminares e ao procedimento de ensaio aplicado.

2.2 Metodologia de ensaio

2.2.1 Gradiente espacial de densidade de fluxo térmico

A grandeza densidade de fluxo térmico constitui uma das mensurandas de interesse do presente ensaio. A sua medição pressupõe o conhecimento prévio do gradiente espacial da grandeza densidade de fluxo térmico na região central de uma superfície horizontal existente no interior da câmara de ensaio, sobre a qual é colocada a amostra ensaiada sujeita aos efeitos de transferência de calor por radiação e convecção.

A determinação da relação funcional representativa do gradiente espacial de densidade de fluxo térmico baseia-se num ensaio preliminar no qual são realizadas medições desta grandeza sobre uma superfície inerte (constituída por silicato de cálcio), mediante o recurso a um fluxímetro térmico do tipo Schmidt-Boelter (sem janela óptica), sobre a qual ocorrem fenómenos de transferência de calor por radiação e convecção em resultado das elevadas temperaturas originadas pela combustão de propano no interior de um painel radiante.

Este ensaio preliminar é efectuado com uma periodicidade mínima de um mês, podendo este intervalo ser extendido para um período que pode atingir os seis meses, no caso em que os ensaios realizados não revelem diferenças significativas nos resultados obtidos. Note-se que, qualquer alteração significativa da montagem experimental utilizada implica a realização, eventualmente antecipada, deste ensaio preliminar [4].

A superfície inerte ensaiada apresenta uma configuração geométrica que permite o posicionamento do fluxímetro térmico em posições de referência, garantindo a exposição deste ao fluxo térmico radiante e convectivo em diversos pontos situados na região central da superfície inerte e igualmente espaçados entre si, conforme é possível observar na figura 1.

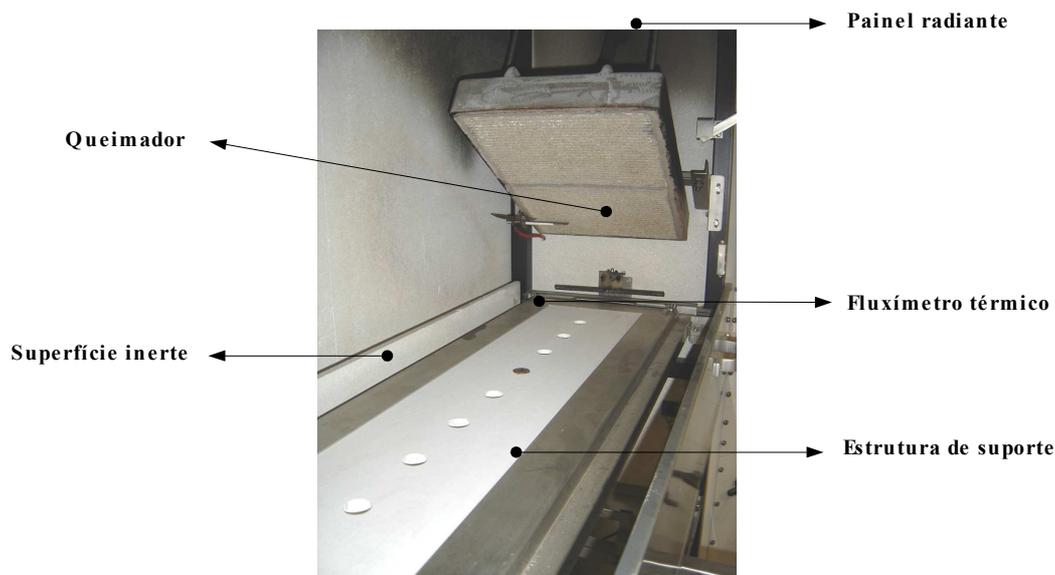


Figura 1: Medição de densidade de fluxo térmico na superfície inerte.

Salienta-se que, a norma de ensaio impõe que as estimativas de densidade de fluxo térmico obtidas cumpram as tolerâncias especificadas (*vide* tabela 1) para cada posição de medição pelo que o cumprimento deste requisito poderá implicar um reajustamento dos caudais mássicos do propano e do ar que são introduzidos no interior do painel radiante (onde se processa o fenómeno de combustão).

Tabela 1: Tolerâncias normativas das estimativas de densidade de fluxo térmico [3].

Posição (mm)	Densidade de fluxo térmico nominal ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)	Tolerâncias ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)
110	10,9	$\pm 0,4$
210	9,2	$\pm 0,4$
310	7,1	$\pm 0,4$
410	5,1	$\pm 0,2$
510	3,5	$\pm 0,2$
610	2,5	$\pm 0,2$
710	1,8	$\pm 0,2$
810	1,4	$\pm 0,2$
910	1,1	$\pm 0,2$

A figura 2 ilustra a curva de densidade de fluxo térmico nominal e as respectivas curvas de tolerância superior e inferior, conforme citadas na tabela anterior, considerando-se de acordo com a norma de ensaio a existência de uma relação funcional linear entre pontos consecutivos de medição.

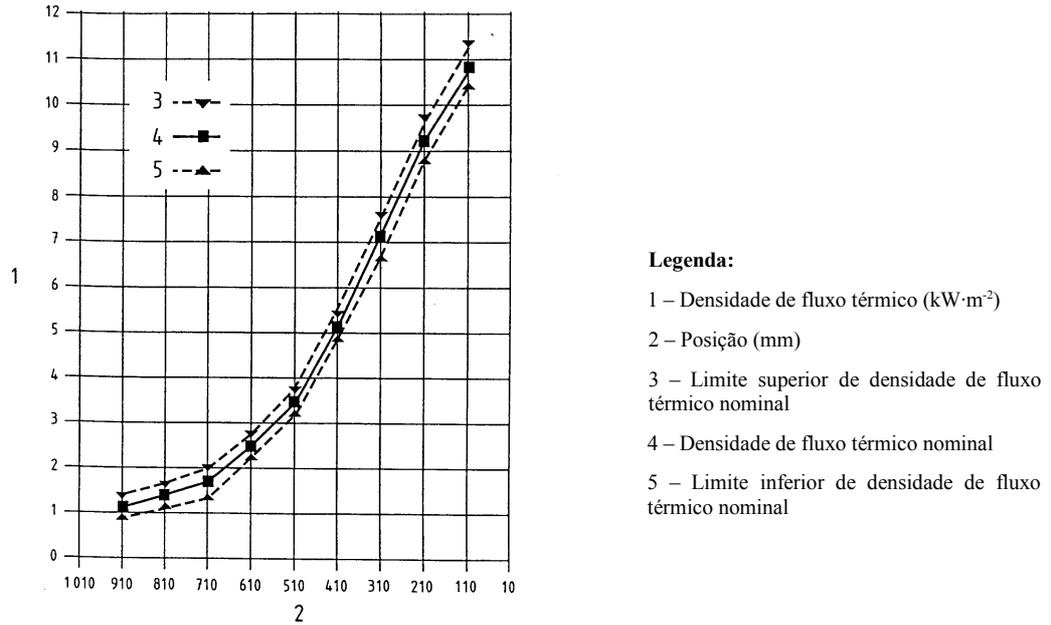


Figura 2: Curva de densidade de fluxo térmico nominal e respectivas tolerâncias superior e inferior [3].

Com efeito, a relação funcional linear estabelecida entre a distância percorrida pela frente de chama, x , e a correspondente densidade de fluxo térmico, ϕ , entre os pontos de medição i e $i+100$ mm, é dada por

$$\phi = \left(\frac{\phi_i^0 - \phi_{i+100\text{mm}}^0}{x_i^0 - x_{i+100\text{mm}}^0} \right) x + \phi_{i+100\text{mm}}^0 - \left(\frac{\phi_i^0 - \phi_{i+100\text{mm}}^0}{x_i^0 - x_{i+100\text{mm}}^0} \right) x_{i+100\text{mm}}^0, \quad (1)$$

em que ϕ^0 é a densidade de fluxo térmico de referência (determinada pelo ensaio preliminar) e x^0 é a posição de referência do fluxímetro térmico na medição de ϕ^0 .

A realização deste ensaio preliminar pressupõe a medição e o controlo de diversas grandezas de influência, nomeadamente:

- a velocidade do escoamento de gases na conduta de extracção;
- a temperatura no interior da câmara de ensaio;
- a temperatura dos gases na conduta de extracção;
- a temperatura do painel radiante;
- os caudais mássicos de entrada do propano e do ar no painel radiante.

As estimativas destas grandezas são obtidas com recurso a instrumentação dedicada, sendo aplicadas na realização do ensaio principal, adoptando-se as tolerâncias respectivas definidas pela norma de ensaio.

2.2.2 Atenuação luminosa pela presença de fumo

O fenómeno da combustão origina, para além da libertação de uma determinada quantidade de energia, um conjunto de produtos de combustão que, dependendo do tipo de combustível, do modo de combustão e das condições de ventilação, podem apresentar-se sob a forma de partículas sólidas ou gotículas de condensação suspensas no ar constituindo assim um aerossol com a designação comum de fumo.

Do conjunto de metodologias utilizadas na sua caracterização destaca-se a medição da atenuação luminosa, determinada pela medição da intensidade de luz transmitida. Efectivamente, a intensidade de luz que atravessa um meio contendo fumo é atenuada devido a um conjunto de interacções com as partículas e gotículas suspensas de que resultam a absorção e a dispersão da luz.

O fenómeno da atenuação da luz num aerossol como o fumo é descrita pela Lei de Bouguer ou de Lambert-Beer [5, 6], expressa por

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot L), \quad (2)$$

em que I é a intensidade luminosa transmitida, I_0 é a intensidade luminosa incidente na ausência de fumo, α é o coeficiente de absorção neperiano e L é o comprimento do trajecto percorrido pela luz na presença de fumo. Adicionalmente, considera-se que o coeficiente de absorção neperiano é dado por

$$\alpha = \alpha_m \rho, \quad (3)$$

onde α_m corresponde ao coeficiente de absorção neperiano mássico (dependente, essencialmente, da distribuição dimensional das partículas e gotículas que constituem o fumo e das suas correspondentes propriedades ópticas) e ρ exprime a concentração mássica de fumo num dado volume [5, 6].

Neste contexto, a grandeza transmitância, τ , é definida como o quociente entre a intensidade luminosa transmitida e a intensidade luminosa incidente na ausência de fumo, ou seja,

$$\tau = \frac{I}{I_0}, \quad (4)$$

definindo-se $a = (1 - \tau)$ como a grandeza atenuação luminosa.

Com base na Lei de Bouguer, desenvolveu-se um sistema óptico visando a medição da

grandeza transmitância, o qual permite caracterizar a atenuação luminosa acumulada pela presença de fumo, s , durante o ensaio em estudo. O modelo matemático descritivo é o seguinte:

$$s = \int a dt = \int (1 - \tau) dt \quad . \quad (5)$$

Este sistema de medição de fumo é constituído pelos seguintes elementos (ver figura 3):

- lâmpada de incandescência, que constitui uma fonte de luz policromática;
- sistema de lentes, que estabelece a colimação de feixe na região de medição de fumo (inclui sistema de limpeza com ar sob pressão);
- diafragma;
- detector fotoeléctrico, com uma resposta espectral equivalente à da visão humana.

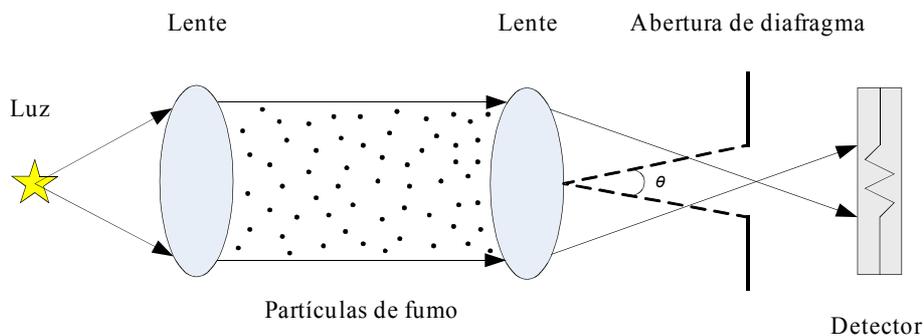


Figura 3: Representação esquemática do sistema óptico para a medição de fumo.

A colocação de uma abertura de diafragma tem por objectivo minimizar o efeito da dispersão da luz que atinge o detector. De facto, num contexto experimental, a radiação luminosa que atinge o detector fotoeléctrico é constituída não somente pela componente de radiação luminosa que é transmitida pelo fumo mas, também, por radiação luminosa resultante do fenómeno de dispersão associada à interacção estabelecida com as partículas e gotículas que constituem o fumo. Para partículas e gotículas de dimensão reduzida, a radiação luminosa sofre uma dispersão aproximadamente uniforme em todas as direcções pelo que a quantidade dessa radiação que se propaga em direcção ao detector é apenas uma fracção limitada, tornando-se mais significativa com o aumento da sua dimensão. Esta condicionante determina que se promova uma definição apropriada do ângulo de abertura θ (*vide* figura 3).

Note-se ainda que, a lei de Lambert-Beer é válida, apenas, para uma fonte de radiação luminosa monocromática como, por exemplo, um laser. Na prática, o recurso a uma lâmpada de incandescência (policromática) é justificado pelo facto de apresentar uma estabilidade

superior à do laser [6], assegurando-se um fornecimento de potência eléctrica estável que permita manter a temperatura do filamento aproximadamente constante (2900 ± 100) K. Dada a dispersão espectral desta fonte luminosa, a utilização do sistema de medição de fumo requer a realização periódica de calibração recorrendo à utilização de filtros ópticos com diferentes valores nominais distribuídos ao longo da escala compreendida entre zero (absorção total) e 100 % (transmissão total).

2.3 Montagem experimental

Nesta secção promove-se a descrição dos elementos fundamentais da montagem experimental associada ao ensaio em estudo, destacando-se os que se encontram relacionados com a infra-estrutura laboratorial e com a instrumentação de medição que permite obter as diversas grandezas mensuráveis.

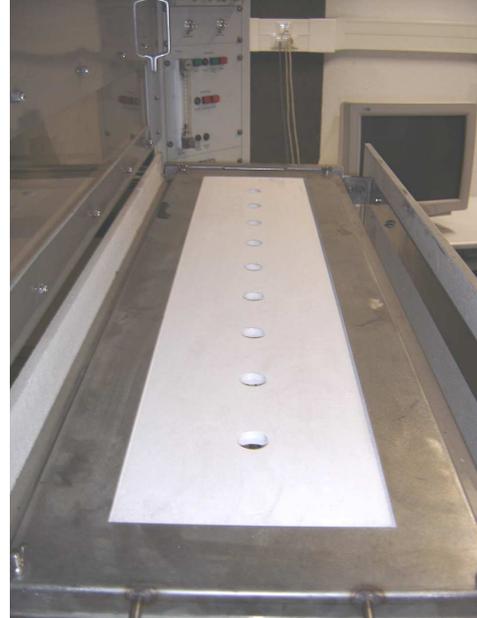
2.3.1 Infra-estrutura laboratorial

Dos elementos constituintes da infra-estrutura laboratorial existente no LNEC/LERF (*vide* figura 4), destacam-se:

- a câmara de ensaio;
- o painel radiante;
- o sistema de extracção de gases e fumo que inclui a chaminé, a estrutura de instalação do sistema óptico para a medição de fumo, a conduta de extracção, o ventilador e o respectivo sistema de controlo;
- a estrutura de instalação do painel de comando para realização do ensaio, dos indicadores de diversos sistemas de medição e do sistema de aquisição de dados;
- o queimador de propano, que inclui eléctrodos para ignição e detecção da presença de chama e que se encontra conectado a um sistema pneumático que permite efectuar o seu posicionamento remoto durante o ensaio;
- o sistema de controlo e abastecimento de ar ao painel radiante;
- o sistema de controlo e abastecimento de propano ao painel radiante e ao queimador;
- a estrutura de suporte da amostra sujeita a ensaio que inclui o sistema de fixação e uma escala metálica;
- a placa inerte de silicato de cálcio, cujas características dimensionais são definidas

de acordo com a norma de ensaio, sendo utilizada no contexto da determinação do perfil de densidade de fluxo térmico (*vide* figura 5);

- a estrutura de suporte da placa mencionada no ponto anterior.



Figuras 4 e 5: Montagem experimental no LNEC/LERF e placa inerte de silicato de cálcio.

2.3.2 Instrumentação de medição

Na realização do presente ensaio recorre-se a um conjunto diversificado de instrumentos e sistemas de medição, designadamente:

- um fluxímetro térmico *Medtherm*, modelo 64-2-20 (*vide* figura 6);
- um sistema óptico para medição de fumo *Fire Testing Technology*, modelo construído de acordo com a norma DIN 50055, constituído por lâmpada policromática, lentes (inclui sistema de limpeza com ar sob pressão) e detector fotoelétrico (*vide* figura 7);



Figuras 6 e 7: Fluxímetro térmico em posição de referência e pormenor da instalação do sistema óptico para medição de fumo na conduta de extracção.

- uma escala metálica (*vide* figura 8);

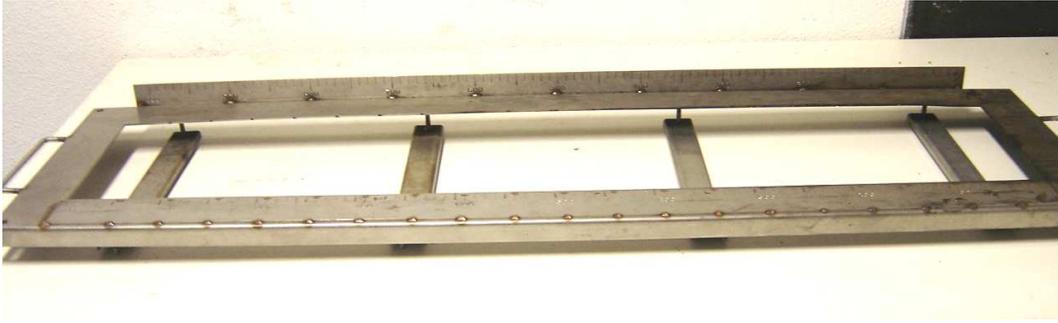


Figura 8: Escala metálica instalada na estrutura de suporte da amostra ensaiada.

- um pirómetro radiante *Thermalert*, modelo TXC;
- um anemómetro digital *Omega*, modelo HHF 300A;
- dois termopares do tipo K (*vide* norma EN 60584-1), para medição da temperatura dos gases na câmara de ensaio e na conduta de extracção;
- dois caudalímetros mássicos *Bronkhorst*, modelos F-203AC-FAC-55-V e F-201AC-FAC-44-V.

A aquisição e processamento de dados é suportada por:

- um sistema de aquisição de dados *Agilent*, modelo 34902A;
- uma placa de interface PCI-GPIB;
- uma aplicação informática *Fire Testing Technology FRPSoft*.

2.4 Ensaio e operações preliminares

O ensaio preliminar de determinação da curva representativa do gradiente espacial de densidade de fluxo térmico tem uma significativa importância no contexto do ensaio em estudo devido à sua aplicação na determinação da mensuranda densidade de fluxo térmico. Este ensaio segue a sequência de operações que se descreve em seguida:

- instalação da placa inerte no interior da câmara de ensaio;
- medição da velocidade do escoamento de gases no centro da conduta de extracção com recurso a um anemómetro;
- ignição do painel radiante e o conseqüente aquecimento da câmara de ensaio durante o período de tempo de uma hora (com ausência de chama no queimador);
- medição da densidade de fluxo térmico, em cada posição de referência da placa

inerte, durante um período de tempo de 30 segundos; caso não se cumpram as tolerâncias definidas na norma de ensaio, é realizado o ajuste do caudal mássico de entrada de ar ou de propano no interior do painel radiante respeitando, em seguida, um período de estabilização de 10 minutos antes de se efectuar uma nova medição;

- remoção da placa inerte do interior da câmara de ensaio, dando início a um período de estabilização de cinco minutos;
- medição da temperatura da câmara de ensaio com recurso a um termopar colocado no seu interior;
- medição da temperatura do painel radiante mediante a utilização de um pirómetro radiante.

A vertente do ensaio em estudo, relativa à medição da grandeza atenuação luminosa, apresenta um conjunto adicional de ensaios também considerados preliminares, dos quais se destacam:

- o ensaio de determinação experimental da deriva e do ruído do sistema de medição;
- o ensaio de comparação dos valores lidos pelo sistema com os valores de referência, determinados de um conjunto de filtros ópticos.

A determinação experimental da deriva e do ruído consiste na medição da grandeza transmitância durante um período de 30 minutos, garantindo-se que, na região central da conduta de extracção de gases, se encontra um escoamento com uma velocidade conhecida e equivalente à estabelecida para a realização do ensaio principal.

A deriva é obtida com base no método dos mínimos quadrados, sendo esta grandeza definida como a diferença absoluta entre os valores inicial e final da recta resultante da realização de uma regressão linear das observações realizadas. Por sua vez, o ruído é avaliado mediante o cálculo da média quadrática dos valores de transmitância observados.

A colocação de filtros ópticos no circuito óptico do sistema e o conseqüente registo dos valores de transmitância durante um período mínimo de um minuto, permitem estabelecer uma comparação entre o valor médio lido pelo sistema e o valor de transmitância de referência. Neste ensaio de comparação, recorre-se a um conjunto de seis filtros ópticos com diferentes absorvâncias e transmitâncias no circuito óptico, sendo complementado com o ajuste do zero da gama de medição pela introdução de um corpo opaco, e com o ajuste do valor extremo da gama de medição (100 % de transmitância) através da ausência de colocação de qualquer corpo ou filtro no circuito óptico.

Salienta-se que, a realização experimental do ajustamento dos valores extremos da gama de medição é efectuada no início de cada ensaio, permitindo definir

$$\tau = \tau_{\text{zero}} + \frac{\tau_{100\%} - \tau_{\text{zero}}}{V_{100\%} - V_{\text{zero}}} (V - V_{\text{zero}}) , \quad (6)$$

onde τ representa a transmitância, τ_{zero} e V_{zero} correspondem, respectivamente, à transmitância e à tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados na realização experimental do zero da cadeia de medição, $\tau_{100\%}$ e $V_{100\%}$ correspondem, respectivamente, à transmitância e à tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados na situação experimental de realização da condição de 100 % de transmitância e V é a tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados.

Do conjunto de operações preliminares à realização do ensaio, destaca-se a preparação e o condicionamento ambiental das amostras ensaiadas, previamente à realização do ensaio principal e de acordo com a norma EN 13238. De acordo com o procedimento de ensaio [4], são extraídas do revestimento de piso em estudo seis amostras, em particular, três amostras numa dada direcção e as restantes na direcção perpendicular à primeira.

No decurso do ensaio principal são ensaiadas alternadamente duas amostras com direcções de extracção opostas, permitindo determinar qual a que apresenta uma menor densidade de fluxo térmico crítico, promovendo-se a realização adicional de duas amostras com a mesma direcção de extracção que esta última.

2.5 Procedimento de ensaio

A realização do ensaio em estudo é iniciada com a medição e o controlo da grandeza de influência velocidade do escoamento de gases na conduta de extracção, a qual deverá corresponder à gama nominal estabelecida na norma de ensaio, de forma similar aos ensaios preliminares .

Após a ignição do painel radiante e decorrido um período de estabilização térmica da câmara de ensaio, é promovida a medição da sua temperatura interna e a medição da temperatura do painel radiante. As estimativas obtidas devem estar suficientemente próximas dos valores nominais obtidos no ensaio preliminar de determinação da curva de densidade de fluxo térmico, atendendo às respectivas tolerâncias estipuladas pela norma de ensaio. Caso não se verifique o cumprimento deste requisito, é efectuada o ajuste do caudal mássico de entrada de ar ou propano no interior do painel radiante respeitando um período de estabilização térmica antes de se promover uma nova medição das grandezas de influência

citadas anteriormente nesta secção (velocidade de escoamento dos gases na conduta, temperatura da câmara de ensaio e temperatura do painel radiante).

Complementarmente, é observada a estabilidade do sistema óptico para medição de fumo, promovendo-se o ajuste deste sistema relativamente à condição de 100 % de transmitância.

Assegurado o cumprimento dos requisitos de ensaio mencionados definem-se, na sequência temporal do ensaio, os seguintes acontecimentos:

- $t=0$ min , início do ensaio com a colocação da amostra no interior da câmara de ensaio (cujo queimador foi previamente acesso) e do registo da medição da grandeza atenuação luminosa;
- $t=2$ min , fim do período de pré-aquecimento com a imposição da chama do queimador sobre a superfície da amostra e o registo do tempo que a chama demora a percorrer trajectos com 50 mm de comprimento sobre a superfície da amostra e do tempo de extinção de chama;
- $t=10$ min , início do registo periódico, em intervalos de 10 minutos, da distância de propagação da frente de chama;
- $t=12$ min , recolha do queimador para a sua posição inicial de ensaio e finalização do seu processo de combustão;
- $t=30$ min , finalização do ensaio e medição da distância máxima percorrida pela frente de chama.

3 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

3.1 Introdução

A avaliação de incertezas de medição aplicada a um processo descrito por um modelo matemático do tipo,

$$y = f(x_1, \dots, x_N) \quad (7)$$

em que x_i representa as estimativas das grandezas de entrada e y a estimativa da grandeza de saída, pode ser interpretada, na 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.

Esta análise pode ser concretizada recorrendo a diferentes abordagens suportadas em métodos com maior ou menor grau de complexidade e com diferentes campos de aplicação, destacando-se as 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).

Em face de um problema concreto, uma dificuldade inerente à actividade metrológica consiste na selecção de uma das opções anteriores que permita 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.

A adopção do método analítico funcional conduz às soluções exactas, contudo, a sua concretização prática revela-se complexidade tornando-o pouco atractivo ou até exequível para a maioria das avaliações de incertezas de medição 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 encontrarem soluções viáveis para a determinação dos parâmetros em causa com base na axiomática desenvolvida no âmbito da Teoria das Probabilidades.

No estudo realizado, esta metodologia revela-se adequada à determinação das componentes de incerteza associadas à parametrização da recta de calibração do fluxímetro

térmico utilizado, determinada com base no método dos mínimos quadrados.

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 [7], contrariamente ao que se verifica, por exemplo, com a metodologia GUM [8]. 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, conforme descritos nesta secção.

No presente estudo, a sua aplicação à avaliação da incerteza de medição da grandeza densidade de fluxo térmico revela-se particularmente adequada, conforme é possível constatar, em detalhe, na secção 3.3.

O método GUM possui vantagens e limitações bem conhecidas, conduzindo a soluções exactas no caso de modelos matemáticos lineares com amostragens adequadas das grandezas de entrada, tendo limitações quando aplicado a modelos não-lineares e quando a sua aplicação envolve aproximações baseadas em critérios subjectivos, entre outras [8].

Atendendo à regressão linear entre a densidade de fluxo térmico e a tensão eléctrica aos terminais do fluxímetro térmico determinada pela sua calibração, a aplicação desta metodologia revela-se adequada à determinação da propagação de incertezas resultante da presença de componentes paramétricas (em virtude da dispersão dos parâmetros obtidos e da correlação mútua entre ambos) e da medição da grandeza tensão eléctrica.

Por outro lado, a aplicação desta metodologia à avaliação da incerteza de medição da grandeza de saída atenuação luminosa acumulada possui diversas vantagens, conforme descrito, em detalhe, na secção 3.4.

Na secção seguinte, concretiza-se a formulação das componentes de incerteza associadas às diversas grandezas de entrada das duas mensurandas de interesse neste estudo.

3.2 Componentes de incerteza

3.2.1 Densidade de fluxo térmico de referência

3.2.1.1 Método de calibração

No contexto normativo, o ensaio de calibração de fluxímetros térmicos é efectuado segundo a norma ISO 14934-2, que define o método do corpo negro de cavidade esférica

como metodologia primária de calibração assegurando deste modo a rastreabilidade das medições efectuadas no domínio da Termometria, e por outro lado, a definição da respectiva recta de calibração com elevado nível de exactidão.

A tabela seguinte apresenta as incertezas-padrão da grandeza de entrada densidade de fluxo térmico de referência no que concerne à sua componente de incerteza associada ao método de calibração, conforme mencionadas no certificado de calibração [9] do fluxímetro térmico utilizado no LNEC/LERF.

Tabela 2: Incertezas-padrão da componente de incerteza associada ao método de calibração [9].

Densidade de fluxo térmico (kW·m ⁻²)	Incerteza-padrão do método de calibração (kW·m ⁻²)
2	± 0,02
3	± 0,04
5	± 0,07
6	± 0,07
8	± 0,09
9	± 0,10
11	± 0,12
12	± 0,13
13	± 0,15
15	± 0,16

3.2.1.2 Regressão linear

A determinação dos parâmetros a e b da recta de calibração do fluxímetro térmico é baseada no método dos mínimos quadrados [10] segundo o qual, a relação linear existente entre a grandeza densidade de fluxo térmico, ϕ , e a grandeza tensão eléctrica, V , é dada por

$$\phi = a + b \cdot V, \quad (8)$$

em que

$$a = \bar{\phi} - b \cdot \bar{V}, \quad (9)$$

e

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi})(V_i - \bar{V})}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}, \quad (10)$$

mediante a realização de n observações independentes.

Na regressão linear estabelecida, identificam-se as seguintes fontes de incerteza:

- a dispersão de valores atribuídos aos parâmetros da regressão linear e a correlação mútua estabelecida entre ambos;
- a medição da tensão eléctrica nos terminais do fluxímetro térmico.

Relativamente ao primeiro ponto, a aplicação do método probabilístico de determinação da matriz de variância-covariância revela-se apropriada, permitindo obter as expressões

$$\text{var}(a) = \sigma^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{V}^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \right], \quad (11)$$

$$\text{var}(b) = \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}, \quad (12)$$

$$\text{cov}(a, b) = \frac{-\sigma^2 \cdot \bar{V}}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}, \quad (13)$$

em que $\sigma^2 = \text{var}(\epsilon_i)$, considerando ϵ_i como o erro residual.

As expressões apresentadas permitem construir a matriz de variância-covariância,

$$\begin{bmatrix} \sigma^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{V}^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \right] & \frac{-\sigma^2 \cdot \bar{V}}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \\ \frac{-\sigma^2 \cdot \bar{V}}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} & \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \end{bmatrix}.$$

Na tabela 3 são apresentados os resultados do ensaio de calibração [9] do fluxímetro térmico utilizado pelo LNEC/LERF, os quais constituem dados de entrada para o cálculo da parametrização da respectiva recta de calibração.

Por sua vez, a tabela 4 resume os resultados obtidos pela aplicação do método dos mínimos quadrados e do método probabilístico de determinação da matriz de variância-covariância aos dados de entrada apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Estimativas obtidas pela calibração do fluxímetro térmico [9].

Densidade de fluxo térmico total (kW·m ⁻²)	Tensão eléctrica (mV)
1,64	0,90
3,13	1,73
4,63	2,57
6,13	3,41
7,62	4,25
9,08	5,07
10,56	5,90
12,03	6,74
13,50	7,57
14,94	8,38

Tabela 4: Parametrização da regressão linear entre a densidade de fluxo térmico e a tensão eléctrica.

Parâmetro	Estimativa	Incerteza-padrão
a (kW·m ⁻²)	0,060	± 0,009
b (kW·m ⁻² ·mV ⁻¹)	1,777	± 0,002
Covariância (a,b)		
$-1,26 \times 10^{-5}$ kW ² ·m ⁻⁴ ·mV ⁻¹		

Neste caso, a matriz variância-covariância associada aos parâmetros desta regressão linear corresponde a

$$\begin{bmatrix} 7,42 \times 10^{-5} & -1,26 \times 10^{-5} \\ -1,26 \times 10^{-5} & 2,7 \times 10^{-6} \end{bmatrix}.$$

No que respeita à medição de tensão eléctrica, o fabricante do sistema de aquisição de dados utilizado no LNEC/LERF [11], refere que o nível de exactidão das estimativas obtidas para esta grandeza é determinado, essencialmente, pelo erro de medição, pelo erro de mudança de canal de leitura e pelo erro de conversão analógica-digital. Considerando a gama de medição adoptada (compreendida entre 0 mV e 100 mV) e a utilização deste instrumento a uma temperatura de (23 ± 5) °C durante um período de um ano, o nível de exactidão das leituras de tensão eléctrica, V , efectuadas corresponde a $\pm 0,004$ mV.

A propagação destas componentes de incertezas na regressão linear, estimada usando a expressão (8), implica o recurso à metodologia GUM que, neste caso, permite escrever a Lei de Propagação de Incertezas [8] como

$$u^2(\phi) = \left(\frac{\partial \phi}{\partial a}\right)^2 \cdot u^2(a) + \left(\frac{\partial \phi}{\partial b}\right)^2 \cdot u^2(b) + \left(\frac{\partial \phi}{\partial V}\right)^2 \cdot u^2(V) + 2 \left(\frac{\partial \phi}{\partial a}\right) \left(\frac{\partial \phi}{\partial b}\right) u(a) \cdot u(b) \cdot r(a, b) \quad , \quad (14)$$

ou seja,

$$u^2(\phi) = u^2(a) + V^2 \cdot u^2(b) + b^2 \cdot u^2(V) + 2 \cdot V \cdot u(a) \cdot u(b) \cdot r(a, b) \quad , \quad (15)$$

notando-se que o último termo, onde se encontra o coeficiente de correlação, r , pode ser obtido a partir do valor da covariância mediante a utilização da expressão

$$u(a) \cdot u(b) \cdot r(a, b) = \text{cov}(a, b) \quad . \quad (16)$$

A aplicação das expressões anteriores permite concluir que a estimativa da componente de incerteza associada à regressão linear corresponde a $\pm 0,01 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.2.1.3 Repetibilidade

A consulta dos registos históricos do LNEC/LERF relativos à totalidade dos ensaios preliminares realizados visando a determinação da curva de densidade de fluxo térmico, permite estimar a repetibilidade associada a cada posição de medição, conforme apresentado na tabela seguinte.

Tabela 5: Repetibilidade das medições de densidade de fluxo térmico de referência.

Posição (mm)	Repetibilidade (kW·m⁻²)
110	± 0,14
210	± 0,12
310	± 0,13
410	± 0,07
510	± 0,04
610	± 0,03
710	± 0,04
810	± 0,05
910	± 0,04

3.2.1.4 Deriva

O registo histórico dos ensaios preliminares de determinação da curva de densidade de fluxo térmico realizados no LNEC/LERF permite, simultaneamente, determinar a deriva associada a cada posição de medição, determinada como a diferença absoluta entre o valor inicial e o valor final de densidade de fluxo térmico obtido com base numa regressão linear de um conjunto de observações. A tabela 6 resume os resultados obtidos para cada posição

de medição.

Tabela 6: Deriva das medições de densidade de fluxo térmico de referência.

Posição (mm)	Deriva ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)
110	0,15
210	0,01
310	0,05
410	0,10
510	0,02
610	0,05
710	0,001
810	0,01
910	0,01

3.2.2 Posição de referência do fluxímetro térmico

O conhecimento das tolerâncias dimensionais da placa inerte e da respectiva estrutura de suporte (*vide* figura 9) permitiu identificar diversas componentes de incerteza relativas ao posicionamento de referência do fluxímetro térmico durante o ensaio preliminar de determinação da curva de densidade de fluxo térmico.

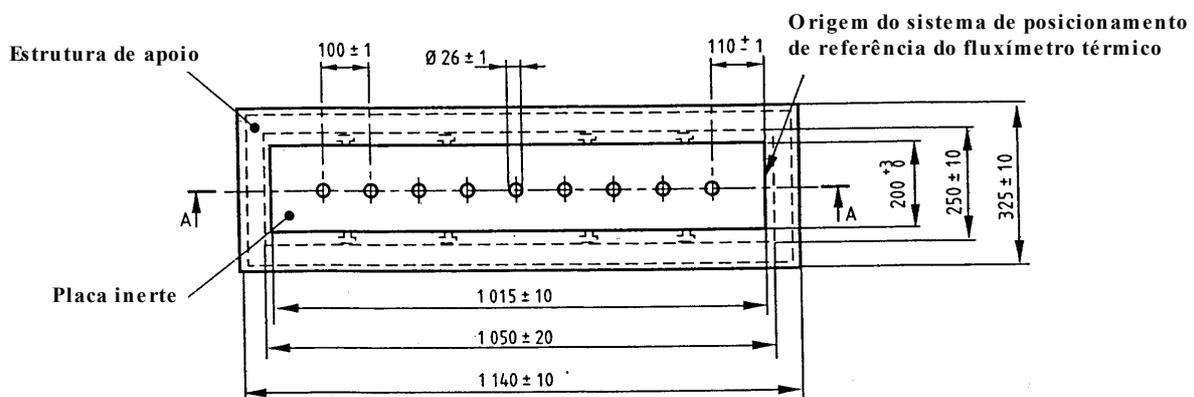


Figura 9: Tolerâncias dimensionais da placa inerte e da sua estrutura de suporte [3].

Nesta, destacam-se as seguintes tolerâncias dimensionais:

- distância entre o furo na extremidade da placa e a aresta interior da estrutura de suporte, considerada como a origem do sistema de posicionamento de referência do fluxímetro térmico;
- distâncias relativas entre os diversos furos de posicionamento do fluxímetro térmico na placa inerte;

- diâmetro dos furos para posicionamento do fluxímetro térmico.

A tabela seguinte apresenta as fontes de incerteza citadas e as correspondentes funções densidade de probabilidade e parametrizações adoptadas.

Tabela 7: Componentes de incerteza associadas à posição de referência do fluxímetro térmico.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Parametrização
δx_{zero}^0	Distância entre furo e arestra interior	R	± 1 mm
$\delta x_{\text{furos}}^0$	Distância relativa entre furos	R	± 1 mm
$\delta x_{\text{diâmetro}}^0$	Diâmetros dos furos	R	± 1 mm

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

Atendendo ao material constituinte da placa inerte (silicato de cálcio), a potencial contribuição adicional devido à sua dilatação por efeito térmico é considerada desprezável face às componentes de incerteza apresentadas anteriormente.

3.2.3 Distância percorrida pela frente de chama

A medição da distância percorrida pela frente de chama na superfície da amostra ensaiada é realizada com recurso a uma escala metálica instalada na estrutura de suporte. Neste caso, a componente de incerteza associada ao instrumento de medição é dominante face às componentes de incerteza que se podem atribuir ao método de medição – por exemplo, a dilatação térmica da escala em resultado das elevadas temperaturas a que está sujeita ou o posicionamento do zero da escala relativamente ao ponto de origem da medição – e ao operador.

De facto, a resolução da escala (correspondendo a 10 mm) constitui a característica metrológica cuja contribuição para a incerteza é mais relevante. A sua contribuição é estimada adoptando-se uma função densidade de probabilidade rectangular cujos limites são definidos pelo valor da resolução citada, conforme se observa na tabela seguinte.

Tabela 8: Componente de incerteza associada à distância percorrida pela frente de chama.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Parametrização
δx	Resolução do instrumento de medição	R	± 10 mm

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

3.2.4 Transmitância

A medição da grandeza transmitância tem por base a adopção do modelo matemático linear expresso por (6), de acordo com valores de transmitância e tensão eléctrica aos

terminais do detector fotoelétrico considerados como referência nas condições de 0 % e de 100 % sendo necessário contabilizar as seguintes componentes de incerteza:

- tensão eléctrica obtida com o sistema de aquisição de dados;
- tensão eléctrica medida durante a realização experimental dos pontos extremos da gama de medição (condições de 0 % e 100 % de transmitância);
- radiação residual presente na condução de extracção na realização experimental do zero do sistema de medição;
- transmitância em circuito óptico aberto.

No que se refere à componente de incerteza da tensão eléctrica obtida com o sistema de aquisição, considera-se o valor majorado do nível de exactidão citado pelo seu fabricante [11] para um período de funcionamento de um ano no intervalo de temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Por sua vez, a quantificação da componente de incerteza associada à tensão eléctrica observada durante a realização experimental nos pontos extremos da gama de medição foi efectuada com recurso a um processo de amostragem com dimensão igual a 20.

A estimativa da componente de incerteza relativa à radiação residual resulta de se adoptar uma função densidade de probabilidade meio-arco seno cujo limite inferior apresenta menor probabilidade de ocorrência comparativamente ao seu limite superior. De forma análoga, atribui-se à componente de incerteza da transmitância em circuito aberto uma função densidade de probabilidade meio-arco seno cujo limite superior apresenta, neste caso, uma menor probabilidade de ocorrência comparativamente ao seu limite inferior. Salienta-se que, em ambos os casos, a parametrização referida baseia-se no conhecimento empírico disponível.

Atendendo tratar-se de um sistema de medição fundamentado num modelo matemático do tipo linear, procedeu-se à quantificação da componente de incerteza associada à linearidade com base nos registos históricos do LNEC/LERF relativos aos ensaios de comparação entre a indicação do sistema de medição e os valores de referência de filtros ópticos colocados no circuito óptico. A selecção da função de densidade de probabilidade e respectiva parametrização teve por base uma amostra experimental com uma dimensão igual a 90, cuja representação gráfica se encontra na figura 10.

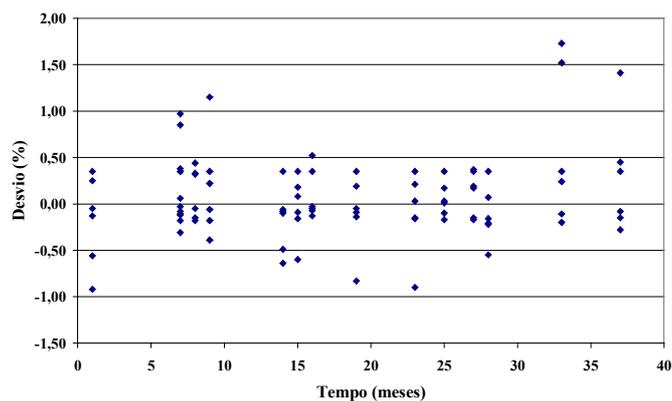


Figura 10: Dispersão dos desvios de transmitância.

A consulta dos registos históricos do LNEC/LERF visando a determinação experimental da deriva e do ruído do sistema de medição, possibilitou a estimativa destas duas componentes de incerteza, tendo-se considerado, para cada uma delas, uma amostra com uma dimensão igual a 13 (*vide* figuras 11 e 12).

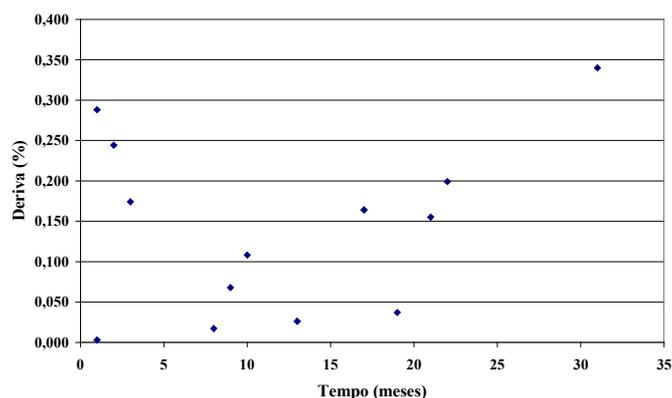


Figura 11: Dispersão dos valores de deriva.

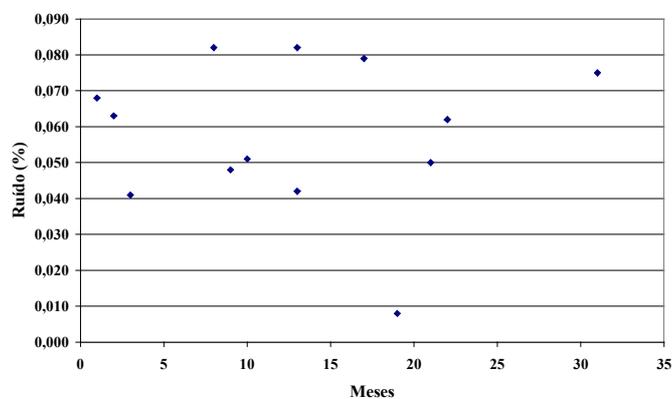


Figura 12: Dispersão dos valores de ruído.

A tabela 9 resume as diferentes componentes de incerteza mencionadas anteriormente para a grandeza transmitância.

Tabela 9: Componentes de incerteza associadas à grandeza transmitância.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa, incerteza-padrão ou parametrização
δV_{DAQ}	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm(4 \times 10^{-5} \cdot V + 7 \times 10^{-6}) \text{ V}$
$\delta V_{\tau 100\%}$	Tensão eléctrica na realização do ponto extremo de medição (100 %)	R	$(0,103 \pm 0,001) \text{ V}$
δV_{zero}	Tensão eléctrica na realização do zero	R	$(0,005 \pm 0,001) \text{ V}$
$\delta \tau_{100\%}$	Transmitância de 100 % em circuito óptico aberto	$\frac{1}{2} \text{ U}$	$(0,99; 1)$
$\delta \tau_{\text{nulo}}$	Transmitância nula (radiação residual)	$\frac{1}{2} \text{ U}$	$(0; 0,01)$
$\delta \tau_{\text{linearidade}}$	Linearidade	N	$0 \pm 0,007$
$\delta \tau_{\text{deriva}}$	Deriva	T	$(15 \pm 15) \times 10^{-4}$
$\delta \tau_{\text{ruído}}$	Ruído	R	$(60 \pm 25) \times 10^{-5}$

* 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 da densidade de fluxo térmico pelo método de Monte Carlo

Considerando o modelo matemático utilizado na medição indirecta da mensuranda densidade de fluxo térmico – *vide* o respectivo diagrama funcional apresentado na figura 13 – a adopção do MMC revela uma maior simplicidade de aplicação e um nível de exactidão superior face à metodologia GUM em virtude de se desconhecer o efeito da não-linearidade presente no modelo matemático.

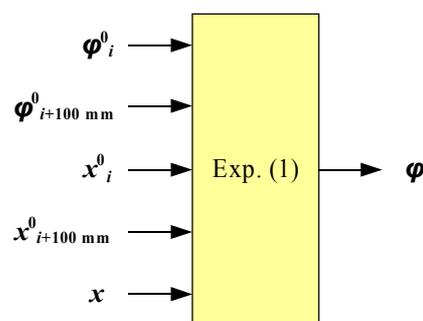


Figura 13: Diagrama funcional da grandeza densidade de fluxo térmico.

O 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 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 14).

O conhecimento da dependência matemática das diversas mensurandas relativamente às grandezas de entrada presentes no ensaio em estudo, cuja caracterização metrológica consta nas secções anteriores, permite que se proceda à fase de simulação numérica visando a determinação da incerteza de medição da grandeza de saída.

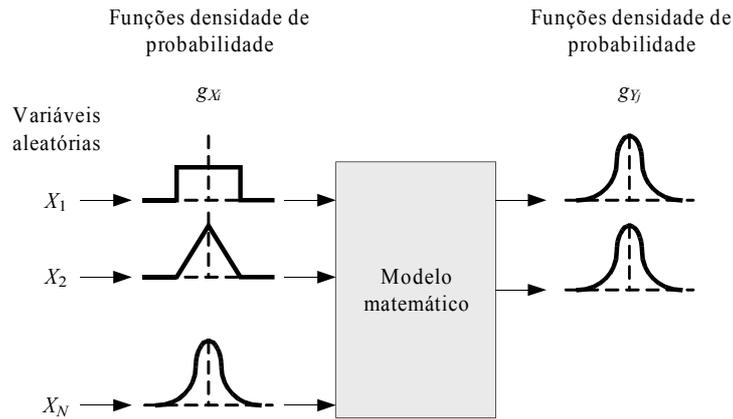


Figura 14: Conversão da informação de entrada em informação de saída através do modelo matemático representativo da medição [7].

Para esse efeito, o procedimento de avaliação de incertezas segundo o MMC requer um conjunto de recursos algorítmicos para a concretização das diferentes etapas que o constituem, conforme é possível observar na figura 15.

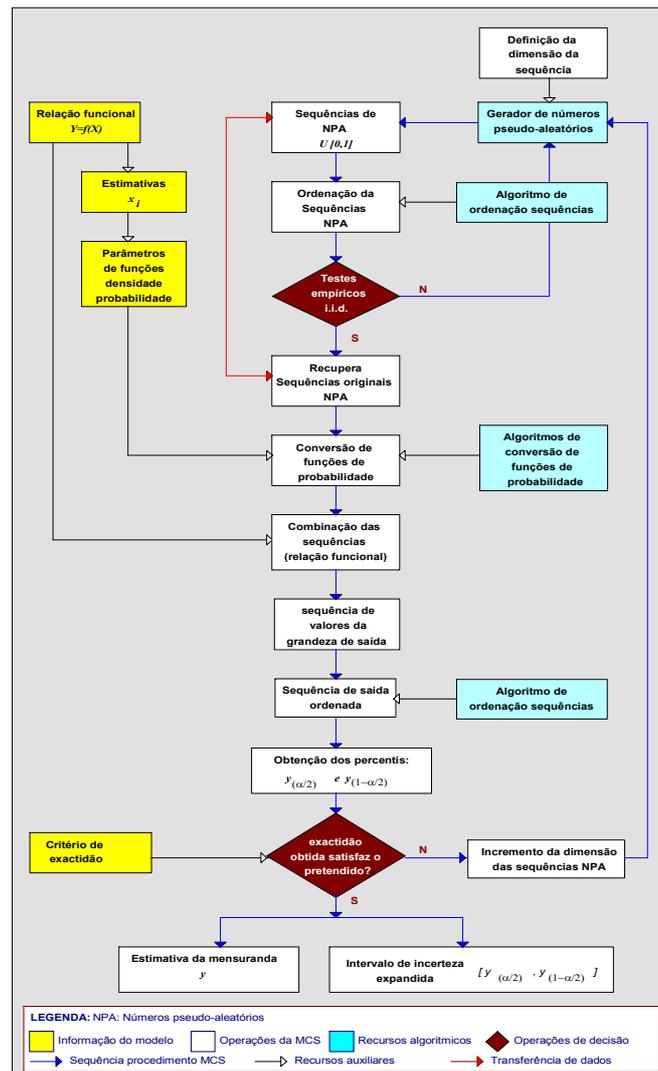


Figura 15: Diagrama ilustrativo do processo de simulação pelo MMC [7].

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.

Em concreto, recorreu-se neste estudo ao gerador de números pseudo-aleatórios Mersenne Twister [12] para a obtenção de sequências numéricas com uma dimensão típica de 10^6 , tendo sido utilizados algoritmos de conversão e ordenação descritos em [13]. O nível de exactidão das simulações numéricas efectuadas foi obtido de acordo com o algoritmo descrito por Cox [14].

3.4 Avaliação da incerteza de medição da atenuação luminosa acumulada pelo método GUM

A medição da grandeza atenuação luminosa acumulada, obtida por via indirecta de acordo com o modelo matemático exposto na figura 16 traduz-se, de acordo com a aplicação computacional utilizada no ensaio [15], na realização da aproximação

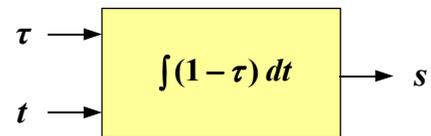


Figura 16: Diagrama funcional da grandeza atenuação luminosa acumulada.

$$s \approx \Delta t \sum_{i=0s}^{1800s} (1 - \tau)_i = \Delta t \sum_{i=0s}^{1800s} a_i \quad , \quad (17)$$

sendo baseada na técnica de integração numérica do rectângulo [16] e em que Δt corresponde ao período de medição do ensaio correspondente a um segundo.

A natureza linear deste modelo matemático permite a aplicação da metodologia GUM como via para obtenção da solução exacta do problema, considerando-se a existência de uma base temporal independente da realização das n observações de atenuação luminosa (mutuamente independentes) ao longo do ensaio e, conseqüentemente, uma incerteza associada à medição de Δt que pode ser considerada desprezável. Alternativamente, a aplicação do MMC ao presente caso envolve um esforço acrescido de natureza

computacional conduzindo, neste caso, a resultados similares.

Salienta-se que, face à magnitude da contribuição para a incerteza de medição da grandeza atenuação luminosa, a componente de incerteza associada à técnica de integração numérica pode ser considerada desprezável.

Assim, a aplicação da Lei da Propagação das Incertezas segundo o método GUM [8] à expressão (17) conduz a

$$u^2(s) = n \cdot \left(\frac{ds}{da_i} \right)^2 \cdot u^2(a_i) \quad , \quad (18)$$

ou seja,

$$u^2(s) = n \cdot \Delta t^2 \cdot u^2(a_i) \quad . \quad (19)$$

Na avaliação efectuada adoptou-se o valor majorado da incerteza-padrão associada à grandeza atenuação luminosa obtido com base no desenvolvimento de um processo de simulação numérica específico, suportado no MMC e atendendo às componentes de incerteza citadas em 3.2.4, cujos resultados são expostos na secção 3.5.2.

3.5 Resultados obtidos

3.5.1 Densidade de fluxo térmico

No que respeita à grandeza de entrada densidade de fluxo térmico de referência, a tabela 10 apresenta as incertezas-padrão obtidas por método GUM atendendo às componentes de incerteza citadas na secção 3.2.1. Note-se que as estimativas apresentadas referem-se ao ensaio preliminar mais recente realizado pelo LNEC/LERF.

Tabela 10: Incertezas padrão associadas às estimativas de densidade de fluxo térmico de referência.

Posição (mm)	Estimativa (kW·m ⁻²)	Componentes de incerteza (kW·m ⁻²)				Incerteza-padrão (kW·m ⁻²)
		Método de calibração	Regressão linear	Repetibilidade	Deriva	
110	11,26	± 0,12	± 0,01	± 0,14	± 0,15	± 0,24
210	9,19	± 0,10	± 0,01	± 0,12	± 0,01	± 0,16
310	7,17	± 0,09	± 0,01	± 0,13	± 0,05	± 0,17
410	4,94	± 0,07	± 0,01	± 0,07	± 0,10	± 0,14
510	3,42	± 0,04	± 0,01	± 0,04	± 0,02	± 0,06
610	2,35	± 0,02	± 0,01	± 0,03	± 0,05	± 0,06
710	1,66	± 0,02	± 0,01	± 0,04	± 0,001	± 0,05
810	1,21	± 0,02	± 0,01	± 0,05	± 0,01	± 0,06
910	0,96	± 0,02	± 0,01	± 0,04	± 0,01	± 0,05

Os resultados obtidos permitiram o desenvolvimento de um processo de simulação numérica segundo o MMC, visando a determinação da incerteza de medição da densidade de fluxo térmico, abrangendo toda a gama de medição da mensuranda de interesse no ensaio em estudo, conforme se apresenta na tabela 11.

Tabela 11: Resultados obtidos pelo MMC para a grandeza densidade de fluxo térmico.

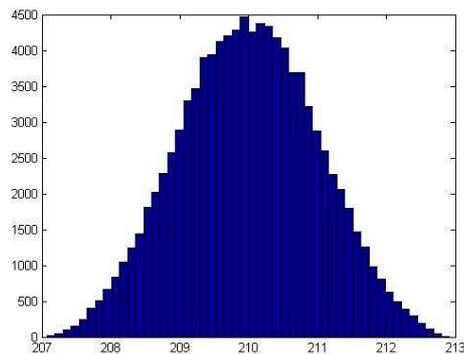
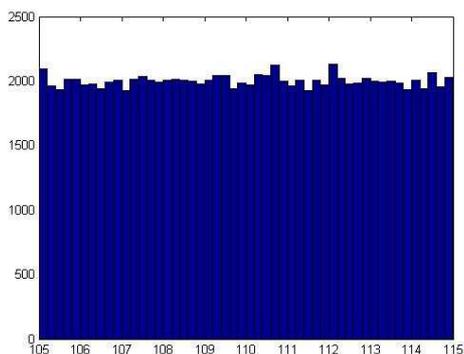
Classe	Estimativa (kW·m ⁻²)	Incerteza-padrão (kW·m ⁻²)	Incerteza-padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %) (kW·m ⁻²)	Nível de exactidão requerido (kW·m ⁻²)	Nível de exactidão da simulação (kW·m ⁻²)
A _{2n} ou B _n	11,3	± 0,3	± 3	± 0,5	± 0,05	± 0,01
	8,2	± 0,2	± 2	± 0,3	± 0,05	± 0,01
C _n	6,1	± 0,2	± 3	± 0,3	± 0,05	± 0,01
	5,2	± 0,2	± 4	± 0,3	± 0,05	± 0,01
D _n	4,2	± 0,2	± 5	± 0,3	± 0,05	± 0,01
	3,6	± 0,2	± 6	± 0,3	± 0,05	± 0,01
E _n	2,5	± 0,2	± 8	± 0,3	± 0,05	± 0,01
	1,0	± 0,2	± 20	± 0,3	± 0,05	± 0,01

Em particular, a tabela 12 exemplifica, os resultados obtidos para a estimativa de saída com a incerteza-padrão mais elevada.

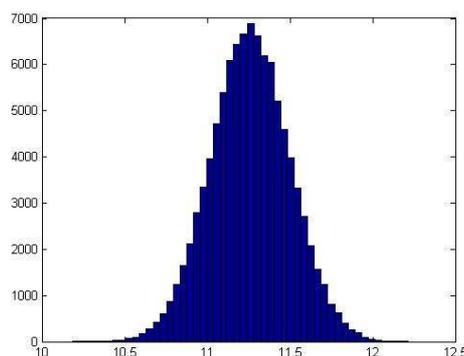
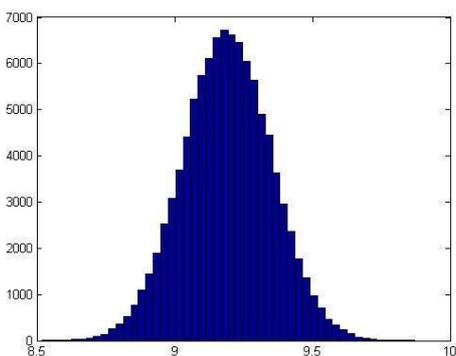
Tabela 12: Incertezas de medição das mensurandas para uma estimativa de saída de 11,3 kW·m⁻².

Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Incerteza expandida (95%)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
ϕ_i^0 (kW·m ⁻²)	11,3	± 0,3	± 0,5	± 0,05	± 0,01
$\phi_{i+100\text{mm}}^0$ (kW·m ⁻²)	9,2	± 0,2	± 0,3	± 0,05	± 0,01
x_i^0 (mm)	110,0	± 1,0	± 1,9	± 0,05	± 0,03
$x_{i+100\text{mm}}^0$ (mm)	210,0	± 1,0	± 1,9	± 0,05	± 0,03
x (mm)	110,0	± 2,4	± 4,8	± 0,05	± 0,02
ϕ (kW·m ⁻²)	11,3	± 0,3	± 0,5	± 0,05	± 0,01

As figuras 17 a 20 ilustram a dispersão típica das sequências numéricas obtidas pelo processo de simulação numérica desenvolvido, nomeadamente, as sequências associadas à distância percorrida pela frente de chama, à posição de referência, à densidade de fluxo térmico de referência e à densidade de fluxo térmico.



Figuras 17 e 18: Histogramas das grandezas de entrada x e x^0 .



Figuras 19 e 20: Histogramas das sequências numéricas das grandezas ϕ^0 e ϕ .

3.5.2 Atenuação luminosa acumulada

A determinação das incertezas de medição associadas à grandeza atenuação luminosa resultou da aplicação do MMC apresentando-se, na tabela 13, os resultados obtidos na gama de medição nominal desta grandeza no LNEC/LERF. A figura 21 apresenta um histograma representativo da dispersão de valores observada para a grandeza atenuação luminosa.

Tabela 13: Incertezas-padrão da grandeza atenuação luminosa obtidas pelo MMC.

Estimativa	Incerteza-padrão	Incerteza-padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerido	Nível de exactidão da simulação
0,014	$\pm 0,007$	± 50	$\pm 0,014$	$\pm 0,0005$	$\pm 0,0002$
0,202	$\pm 0,007$	± 3	$\pm 0,013$	$\pm 0,0005$	$\pm 0,0002$
0,300	$\pm 0,006$	± 2	$\pm 0,012$	$\pm 0,0005$	$\pm 0,0002$
0,399	$\pm 0,006$	± 2	$\pm 0,012$	$\pm 0,0005$	$\pm 0,0002$

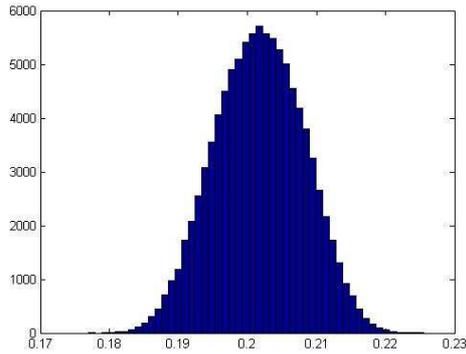


Figura 21: Histograma da grandeza atenuação luminosa.

Face aos resultados obtidos adopta-se um valor majorado de incerteza-padrão de $\pm 0,007$ o que permite, segundo a expressão (19), determinar a incerteza de medição da grandeza atenuação luminosa acumulada no LNEC/LERF.

De acordo com os cálculos efectuados, a sua incerteza-padrão corresponde a $\pm 0,5 \%$ ·min e a correspondente incerteza expandida num intervalo de confiança de 95 % é de $\pm 1,0 \%$ ·min.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu efectuar a caracterização metrológica das grandezas presentes no *ensaio de determinação do comportamento de reacção ao fogo de revestimentos de pisos utilizando uma fonte de calor radiante*, possibilitando a avaliação das incertezas de medição das duas mensurandas de interesse neste ensaio: a densidade de fluxo térmico e a atenuação luminosa acumulada.

No que respeita à grandeza densidade de fluxo térmico, a avaliação efectuada revelou que a incerteza de medição permanece aproximadamente constante em toda a gama de medição desta mensuranda, conforme é possível observar na tabela seguinte que resume os resultados obtidos por aplicação do MMC.

Tabela 14: Incertezas de medição da grandeza densidade de fluxo térmico.

Classe	Estimativa (kW·m ⁻²)	Incerteza-padrão (kW·m ⁻²)	Incerteza-padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %) (kW·m ⁻²)
A _{2n} ou B _n	11,3	± 0,3	± 3	± 0,5
	8,2	± 0,2	± 2	± 0,3
C _n	6,1	± 0,2	± 3	± 0,3
	5,2	± 0,2	± 4	± 0,3
D _n	4,2	± 0,2	± 5	± 0,3
	3,6	± 0,2	± 6	± 0,3
E _n	2,5	± 0,2	± 8	± 0,3
	1,0	± 0,2	± 20	± 0,3

Atendendo aos resultados obtidos, a incerteza-padrão associada a uma dada estimativa da grandeza densidade de fluxo térmico obtida no LNEC/LERF pode ser majorada pelo valor de ± 0,3 kW·m⁻², ao que corresponde uma incerteza expandida de ± 0,5 kW·m⁻² num intervalo de confiança de 95 %.

Os valores citados na tabela anterior foram obtidos com base na aplicação do MMC, o qual se revelou adequado para a avaliação de incertezas pretendida, tendo sido cumpridos os requisitos de exactidão previamente estabelecidos para as diversas grandezas de entrada e para a grandeza de saída.

Salienta-se que o valor de incerteza-padrão citado está de acordo com os resultados obtidos pelo LNEC/LERF no âmbito da sua participação num ensaio de comparação interlaboratorial [17] relativo ao ensaio de reacção ao fogo em estudo. A tabela seguinte expõe a análise estatística dos resultados obtidos pelo LNEC/LERF, observando-se uma

concordância entre os valores de incerteza-padrão obtidos no presente estudo e os valores dos desvios-padrão experimentais das amostras dos dois materiais ensaiados.

Tabela 15: Resultados do LNEC/LERF no âmbito do ensaio de comparação interlaboratorial [17].

Material	A	B
Estimativas de densidade de fluxo térmico (kW·m⁻²)	6,6	9,7
	7,3	9,2
	7,0	9,4
Média aritmética (kW·m⁻²)	7,0	9,4
Desvio-padrão experimental da amostra (kW·m⁻²)	± 0,3	± 0,2

Por sua vez, a avaliação de incerteza de medição da grandeza atenuação luminosa acumulada permitiu concluir que a incerteza-padrão associada à estimativa desta grandeza corresponde a $\pm 0,5 \%$ ·min, enquanto que a sua incerteza expandida se situa em $\pm 1,0 \%$ ·min num intervalo de confiança de 95 %.

Os valores citados foram obtidos mediante a aplicação do método GUM salientando-se, no entanto, a importância do MMC na determinação com um elevado nível de exactidão da incerteza de medição da grandeza de entrada transmitância.

Por último, refira-se que os resultados obtidos permitem evidenciar a qualidade das medições efectuadas pelo LNEC/LERF no âmbito da realização do ensaio de reacção ao fogo em estudo, sendo possível avaliar os níveis de exactidão dos sistemas de medição e das metodologias de ensaio envolvidas, aspectos determinantes para a classificação dos materiais ensaiados.

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

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 9239-1:2002 – Reaction to fire tests for floorings – Part 1: Determination of the burning behaviour using a radiant heat source, 2nd edition. Genève (Suíça): International Organisation for Standardization (ISO), Janeiro de 2002.
- [4] *ES 4 – Ensaio no painel radiante (revestimentos de pisos) – Procedimentos Gerais (versão 01)*. Lisboa (Portugal): Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/LERF), Janeiro de 2007.
- [5] Mulholland, G., How Well Are We Measuring Smoke?, In *Fire and Materials*, **6**, 2, pp. 65-67, 1982.
- [6] Putorti Jr, A., *Design Parameters for Stack-Mounted Light Extinction Measurement Devices*, National Institute of Standards and Technology Internal Report 6212. Washington DC (EUA): National Institute of Standards and Technology (NIST), Julho de 1998.
- [7] 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, 2007.
- [8] *Guide for the Expression of Uncertainty of Measurement (GUM)*. Genève (Suíça): International Organization for Standardization (ISO), 1993, re-editado em 1995.
- [9] *Heat flux meter calibration certificate BrfF619668*. Borås (Suécia): SP Swedish National Testing and Research Institute – Fire Technology Research and Development, Outubro de 2006.
- [10] Mood, A. et al., *Introduction to the theory of statistics*, 3rd edition. Singapore: McGraw-Hill International Editions, 1974.
- [11] *Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit User's Guide*, 4th edition. Loveland, Colorado (EUA): Agilent Technologies, Junho de 2006.
- [12] 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, pp. 3-30, 1998.
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] *User's Guide for the FRPSoft Software Package – Version 2*. East Grinstead, West Sussex (Reino Unido): Fire Testing Technology Limited, Fevereiro de 2003.
- [16] Pina, H., *Métodos Numéricos*. Lisboa (Portugal): McGraw-Hill de Portugal, 1995.
- [17] Vladimír Štokr, *Final report on results of international interlaboratory comparison of results pertaining to safety testing of floor coverings used in building industry – radiant panel according to EN ISO 9239-1*, Brno (República Checa): Textile Testing Institute, Agosto de 2005.

