

INFLUÊNCIA DA TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE ENTRE O ENVOLTÓRIO E O AR INTERNO NO CONFORTO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO BRASILEIRA

Felipe Rosa Ormelez (1); Marc Olivier Abadie (2); Nathan Mendes (3)

- (1) Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba, PR, 80215-901, Brasil, 3271-1322, 3271-1691, e-mail: formelez@hotmail.com
- (2) Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba, PR, 80215-901, Brasil, 3271-1322, 3271-1691, e-mail: mabadie@univ-lr.fr
- (3) Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba, PR, 80215-901, Brasil, 3271-1322, 3271-1691, e-mail: nathan.mendes@pucpr.br

RESUMO

O conforto térmico em edificações depende de múltiplas variáveis tais como temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar, vestimenta e atividade física do usuário. A simulação energética de edificações permite a previsão do valor dessas variáveis considerando todas as solicitações externas e internas na própria edificação ao longo do tempo. Até recentemente, nenhuma transferência de vapor d'água entre o ar interno e as paredes era considerada por causa da falta de modelos numéricos adaptados à simulação energética das edificações e do conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais que constituem as paredes. Esta simplificação induz a estimativa excessiva da variação do nível de umidade relativa no ambiente que poderia prejudicar a predição do seu conforto térmico. Este trabalho numérico visa analisar a influência da transferência de umidade entre o envoltório e o ar interno no conforto térmico de uma edificação típica localizada em Curitiba, Brasil. Os resultados mostram que, nos casos estudados, apesar de observar uma diminuição de até 5% da amplitude de variação de umidade relativa, o efeito da transferência de umidade entre as paredes e o ar é desprezível para a avaliação do conforto térmico e mantém-se pequeno para a predição da qualidade de ar de um ambiente.

ABSTRACT

Thermal comfort in buildings depends on various variables such as dry-bulb temperature, relative humidity, mean radiant temperature, air velocity, people clothing and physical activity. Building energy simulation can predict the evolution of these variables taking into account external and internal solicitations. Until recently, no water vapor transfer between the indoor air and the building envelope was considered because of the lack of adapted numerical models and knowledge of hygrothermal properties of the building structural elements. This simplification induces an excessive prediction of the indoor relative humidity variation that can affect the evaluation of the thermal comfort. The present numerical analysis aims evaluating the effect of the moisture transfer between the indoor and the surrounding porous walls on the thermal comfort of a prototypical building room localized in the city of Curitiba, Brazil. Results show that, in the tested cases, even if a 5%-decrease of the relative humidity variation is observed, the effect of the moisture transfer between the walls and the air is negligible on the evaluation of the thermal comfort and remains low for the prediction of indoor air quality.

1. INTRODUÇÃO

As primeiras discussões científicas sobre a qualidade do ambiente interior e a sua correlação com a umidade do ar (Gulick, 1911 e Ingersoll, 1913) datam do início do século XX. Nesses últimos 40 anos, o interesse sobre a qualidade de ar, os efeitos da umidade na saúde e o conforto térmico cresceu de acordo com a compreensão de todos os fenômenos físicos envolvidos.

Recentemente, o seminário NORDTEST que tratava da capacidade de armazenamento da umidade dos materiais porosos (Rode, 2003) mostrou que as paredes das edificações (e quaisquer outros elementos porosos em contato com o ar interior) têm um efeito real sobre a umidade do ar interior, diminuindo a amplitude de variação dos níveis de umidade relativa e, conseqüentemente, modificando a sensação higrotérmica do ambiente.

Dentro deste contexto, foi dado início à formação do anexo 41 da Agência Internacional da Energia (Hens, 2003) para melhorar o conhecimento sobre a transferência de calor, ar e umidade nas edificações e estudar os seus efeitos na qualidade de ar interno, no consumo energético e na durabilidade dos materiais que constituem o envoltório.

No Brasil, diferentes trabalhos (Mendes et al., 2002, 2003a) já mostram que os fenômenos de transferência de calor e de massa que ocorrem simultaneamente nos materiais porosos da edificação são de grande relevância para análise energética de edificações e que, considerando os materiais habitualmente usados nas construções brasileiras e as temperaturas e umidades extremas encontradas no país, os efeitos desses fenômenos podem ter um impacto ainda maior em comparação aos países da Europa e aos Estados Unidos.

O presente trabalho visa analisar numericamente a influência da transferência de umidade entre o envoltório e o ar interno no conforto térmico de uma edificação localizada em Curitiba, Brasil. Em uma primeira parte, definem-se os parâmetros necessários à avaliação do conforto térmico. Apresentam-se na segunda parte as características de uma edificação típica brasileira, da sua utilização, e dos parâmetros de simulação. Por fim, analisam-se os resultados e conclui-se sobre a importância de se considerar o efeito higroscópico das paredes sobre o conforto térmico no ambiente interno.

2. METODOLOGIA

2.1 Avaliação da qualidade do ambiente interno

Neste estudo, a avaliação da qualidade do ambiente interno inclui a análise do conforto térmico e da aceitabilidade da qualidade do ar. O conforto térmico é calculado através de dois métodos: referentes à escala de sensação térmica da ASHRAE (2005) e à norma ISO 7730 (ISO, 1995). A aceitabilidade da qualidade do ar é avaliada segundo os resultados do estudo de Fang (1998).

O conforto térmico pode ser definido como um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa (ASHRAE, 1992). Ele é então função de vários parâmetros individuais (sexo, peso, roupa e taxa metabólica) e ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade e umidade do ar).

A escala de sensação térmica da ASHRAE (ATS - ASHRAE Thermal Sensation scale), cujas correlações foram baseadas nas respostas de 1600 estudantes sobre o conforto térmico (Rohles, 1973), permite avaliar de maneira simples o conforto térmico pois é apenas função da temperatura e umidade (ou pressão de vapor) do ar, do sexo e do tempo de exposição. Na dedução dessas correlações, foram considerados os outros parâmetros como constantes: vestimenta e atividade leves, baixa velocidade do ar, temperatura média radiante igual a temperatura do ar. O resultado dessas simplificações é uma fórmula simples para avaliar o conforto térmico, por exemplo, para ambos os sexos e uma exposição de uma hora, tem-se:

$$ATS = 0,2448t_{bs} + 0,2480p_v - 6,52775 \quad [\text{Eq. 01}]$$

onde t_{bs} é a temperatura de bulbo seco do ar (°C) e p_v é a pressão parcial de vapor (kPa).

Assim, o índice ATS pode variar de -3 (sensação de frio) até +3 (sensação de calor). O conforto ótimo é geralmente definido de acordo com valores desse índice dentro da faixa [-0,5;+0,5].

Baseando-se nas equações que traduzem o equilíbrio em regime permanente da temperatura do corpo humano com o seu ambiente, Fanger (1970) desenvolveu uma expressão que combina todos os parâmetros individuais e ambientais em um único índice chamado de Voto Médio Estimado (PMV - Predicted Mean Vote) que evolui de acordo com a escala de sensação térmica da ASHRAE:

$$\begin{aligned} PMV = & \left(0,303e^{-0,036M} + 0,028\right) \left\{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_v] \right\} \\ & - 0,42 \left\{ (M - W) - 58,15 \right\} - \left[1,7 \times 10^{-5} M (5867 - p_v) \right] - \left[0,0014M(34 - t_{bs}) \right] \\ & - \left\{ 3,69 \times 10^{-8} f_{cl} \left[(t_{cl} + 273)^4 \right] \right\} - \left[f_{cl} h_c (t_{cl} - t_{bs}) \right] \end{aligned} \quad [\text{Eq. 02}]$$

onde M é a taxa metabólica (W/m^2), W é a potência mecânica efetiva (W/m^2), t_{cl} é a temperatura da superfície da vestimenta (°C), t_m é a temperatura radiante média (°C), h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) e f_{cl} é a superfície do corpo coberta com as vestimentas que é uma função do índice de vestimenta (clo).

Na investigação do impacto da temperatura e da umidade na percepção da qualidade do ar e da intensidade do odor, Fang (1998) deduziu a seguinte equação para traduzir o nível de aceitabilidade da qualidade do ar de um ambiente:

$$ACE = -0,033h + 1,662 \quad [\text{Eq. 03}]$$

onde h é a entalpia do ar úmido (kJ/kg).

O índice ACE pode variar de -1 para um ar ambiente claramente inaceitável à +1 no caso de um ambiente cuja qualidade de ar é claramente aceitável.

2.2 Definição da edificação típica brasileira

A edificação padrão consiste em uma sala cujas dimensões são $8 \times 6 \times 2,7\text{m}$. As paredes verticais e o teto são compostos por tijolos de seis furos circulares com 10cm de espessura e reboco de ambos os lados com 2cm de espessura. O piso é feito de madeira (1,4cm) e concreto (50cm) sobre uma camada de solo aluvião (200cm). A parede sul apresenta duas janelas fechadas ($2 \times 3\text{m}$) de vidro simples. Um ganho interno permanente de calor de 200W é considerado no ambiente. O índice de vestimenta das pessoas é igual à 1CLO e a taxa metabólica corresponde à 1MET.

2.3 Parâmetros de simulação

Uma revisão sobre instrumentos de simulação de desempenho higrotérmico e energético de edificações permitiu listar os pros e contras dos programas EnergyPlus (Crawley et al., 2004), TRNSYS (TRNSYS, 1995) e PowerDomus (Mendes et al., 2003b) disponíveis no Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) da PUCPR para este trabalho. O programa PowerDomus foi escolhido porque os dois outros usam modelos muito simplificados para calcular a transferência de umidade nas estruturas porosas do envoltório (Abadie e Mendes, 2006). Assim, o PowerDomus é o único a resolver a transferência de calor e umidade de forma acoplada e é então mais adequado para a presente análise. Além disso, esse programa já integra uma base de dados representativa dos materiais da estrutura das edificações brasileiras.

A edificação está localizada em Curitiba (altitude de 934m, latitude de 25°40' sul, longitude de 47°19' oeste e pressão atmosférica de 92kPa). De acordo com o estudo de Abadie e Mendes (2006), a discretização espacial unidimensional das paredes deve respeitar os limites de 1nó por milímetro de material dentro da parede e 1nó por meio milímetro nas superfícies e o passo de tempo de 1min para prover cálculos precisos da transferência de calor e umidade entre o ar ambiente e as paredes. Os coeficientes de transferência de calor por convecção são impostos e constantes (interno: 3W/m².K, externo: 12W/m².K). Os coeficientes de transferência de massa por convecção são avaliados a partir dos valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção considerando um número de Lewis igual a 1. Nota-se que não há condicionador de ar na edificação estudada; a temperatura e a umidade variam livremente durante as simulações.

Dois casos foram estudados na presente análise. A primeira visa calcular a evolução da temperatura e umidade internas e dos índices (ATS, PMV e ACE) sem considerar a transferência de umidade entre as paredes e o ar ambiente. Esses resultados serão identificados como “sem adsorção” na seção seguinte. Já a segunda simulação que leva em conta a transferência de umidade será designada por “com adsorção”.

Foram considerados dois níveis de geração de vapor (Tabela 1). O primeiro, identificado como “escritório”, corresponde à geração de 3 pessoas com atividade média (IEA, 1991) presentes na edificação de 09h00 à 17h00. O segundo nível, identificado como “residência”, leva em conta a presença de duas pessoas e a geração das suas atividades (IEA, 1991).

O efeito de nível de ventilação foi também considerado nesta análise usando dois valores de taxa de renovação de ar (1 e 2vol/h).

Tabela 1 – Geração de vapor (g/h) dentro da edificação.

Hora	Escritório	Residência
0	0	120
1	0	120
2	0	120
3	0	120
4	0	120
5	0	120
6	0	720
7	0	720
8	0	0
9	500	0
10	500	0
11	500	0
12	500	0
13	500	0
14	500	0
15	500	0
16	500	0
17	500	0
18	0	120
19	0	840
20	0	840
21	0	120
22	0	120
23	0	120

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram simulados dois anos para cada caso no objetivo de anular o efeito das condicionais iniciais em temperatura e umidade dos materiais. Todos os resultados seguintes são apresentados para o segundo ano.

3.1 Efeito sobre o ambiente interno

Na Figura 1, apresentam-se as evoluções da temperatura e umidade relativa no escritório durante os quatro primeiros dias do ano. Primeiramente, observam-se as temperaturas idênticas com e sem adsorção nas paredes mostrando o efeito desprezível da transferência de umidade entre as paredes e o ar sobre a temperatura da zona. No segundo gráfico, a umidade relativa da zona diminui de acordo com a umidade externa, com exceção do período da geração do vapor onde se nota um nível maior de até 10%. Observa-se a diminuição de até 5% da amplitude de variação de umidade relativa devida ao armazenamento da umidade nas paredes que contribui para aumentar o nível mínimo de umidade relativa quando a transferência de umidade ocorre da parede ao ar, e diminuir o nível máximo no caso contrário.

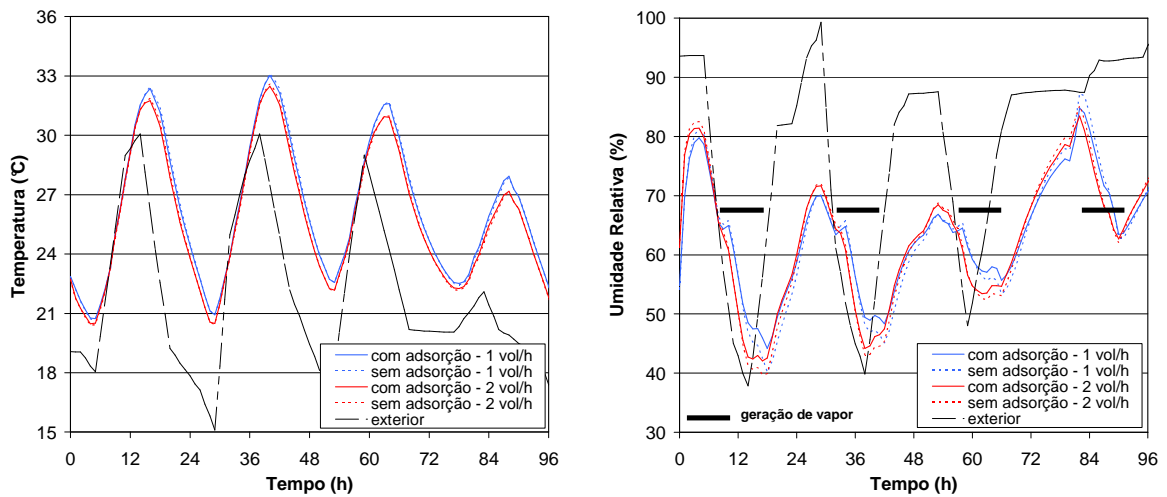


Figura 1 - Variação da temperatura (esquerda) e umidade relativa (direita) – Escritório.

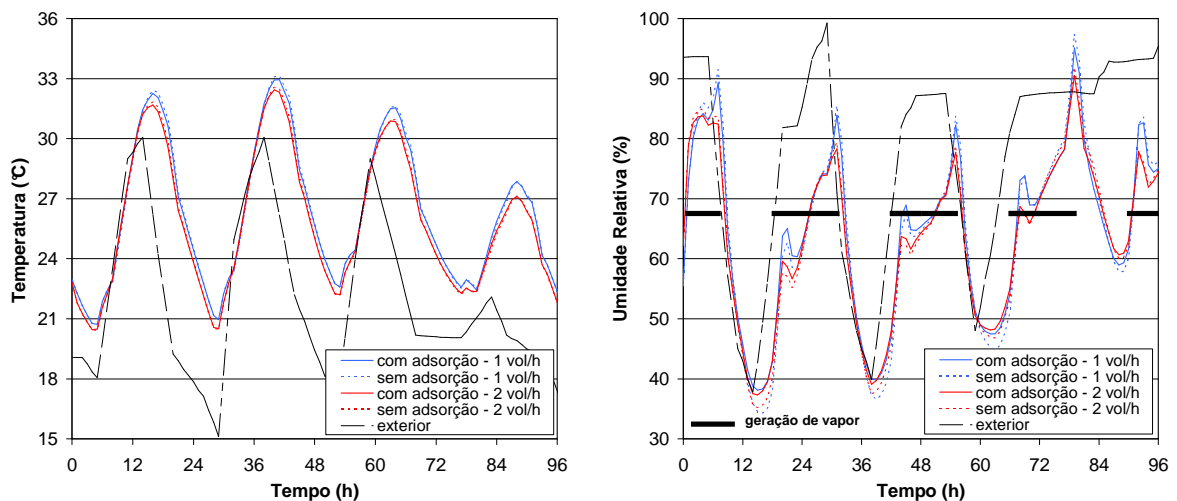


Figura 2 - Variação da temperatura (esquerda) e umidade relativa (direita) – Residência.

A Figura 2 mostra os resultados para a geração de vapor do tipo “Residência”. Observa-se a mesma tendência que no primeiro caso, mas com um aumento do nível de umidade relativa devido ao fato que a geração de vapor ocorre ao mesmo tempo que o aumento da umidade relativa externa.

Nota-se também que o efeito de dobrar a taxa de renovação de ar tem um efeito parecido ao da adsorção nas paredes.

3.2 Efeito sobre o conforto térmico e a percepção da qualidade do ar

A Tabela 2 apresenta o efeito de quando despreza-se a transferência de umidade entre o envoltório e o ar interno através do erro ϵ que pondera o erro absoluto com a faixa total da escala considerada. Assim, os efeitos relativos aos índices podem ser comparados diretamente:

$$\epsilon = \frac{|\text{Índice}_{\text{com adsorção}}(T) - \text{Índice}_{\text{sem adsorção}}(T)|}{n} \quad [\text{Eq. 04}]$$

onde n é a largura total da escala considerada ($n=6$ para ATS e PMV, $n=2$ para ACE) e T é o período de ocupação da edificação.

Os resultados, tanto considerando os valores médios como os máximos, mostram um efeito desprezível sobre os índices ATS e PMV e um pouco maior sobre o índice ACE. Para esse último índice, observa-se um erro máximo de 5.84% que acontece para a taxa de renovação de ar menor. Isso permite antecipar um efeito inversamente proporcional à taxa de renovação de ar cuja importância pode revelar-se primordial para edificações mal ventiladas.

Tabela 2 – Erro devido ao fato de desprezar a transferência de umidade entre o envoltório e o ar interno.

Índice	Tipo de geração de vapor	Taxa de renovação de ar	ϵ médio (%)	ϵ máximo (%)
ATS	Escritório	1vol/h	0.35	1.58
		2vol/h	0.33	1.59
	Residência	1vol/h	0.26	1.80
		2vol/h	0.19	1.65
PMV	Escritório	1vol/h	0.30	1.00
		2vol/h	0.35	1.02
	Residência	1vol/h	0.23	1.04
		2vol/h	0.19	1.41
ACE	Escritório	1vol/h	0.93	5.65
		2vol/h	0.51	2.99
	Residência	1vol/h	0.74	5.84
		2vol/h	0.37	2.63

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O presente trabalho numérico visa analisar a influência da transferência de umidade entre o envoltório e o ar interno no conforto térmico e na aceitabilidade da qualidade de ar dentro de uma edificação localizada em Curitiba. Neste objetivo, foram considerados materiais porosos comuns da edificação brasileira e diferentes cenários de solicitação térmica e hídrica (dois tipos de geração de vapor e dois níveis de taxa de renovação de ar).

Nesta análise, foi mostrado o efeito desprezível dessa transferência de umidade na predição dos índices de conforto térmico (ATS e PMV). A aceitabilidade da qualidade de ar (ACE) parece mais

sensível ao nível de umidade do ar e, por conseqüência, à transferência de umidade com os materiais porosos do envoltório.

A continuação deste trabalho visa ampliar esta análise para outras cidades do Brasil que apresentam um clima mais quente e úmido e mais quente e seco. Um segundo objetivo concerne o efeito de armazenamento dos materiais porosos sobre a aceitabilidade da qualidade de ar em ambientes termicamente controlados pois o efeito da variação das condições climáticas seria menor. Neste caso, deveria haver picos de carga latente com o acionamento do sistema de climatização. Ademais, a importância da transferência acoplada de calor e umidade deverá ser investigada também para análise de risco de crescimento de fungos e mofos em estruturas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADIE M.O., MENDES, N. (2006) “Comparative Analysis of Response-factor and Finite-volume based Methods for predicting Heat and Moisture Transfer through Porous Building Materials”. *Journal of Building Physics*, 30(1): 7-37.
- ASHRAE (1992) “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”. ANSI/ASHRAE Standard 55-1992.
- ASHRAE (2005) “Handbook of Fundamentals”. American Society of Heating and Air Conditioning Engineers.
- CRAWLEY, D.B., LAWRIE, L.K., PEDERSEN, C.O., WINKELMANN, F.C., WITTE, M.J., STRAND, R.K., LIESEN, R.J., BUHL, W.F., HUANG, Y.J., HENNINGER, R.H., GLAZER, J., FISHER, D.E., SHIREY III, D.B., GRIFFITH, B.T., ELLIS, P.G. and GU, L. (2004) “EnergyPlus: New Capable and Linked”. *Proceedings of the Simbuild 2004 Conference*, Boulder, Colorado, IBPSA-USA.
- FANG, L., CLAUSEN, G. and FANGER, P.O. (1998) “Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality”. *Indoor Air*, 8: 80-90.
- FANGER, P.O. (1970) “Thermal Comfort”. McGraw-Hill, New York.
- GULICK, L.H. (1911) “The Air We Breathe in Buildings, Science”. 33(844): 326–328.
- HENS, H. (2003) “Whole Building Heat, Air and Moisture Response”. International Energy Agency (IEA), Annex 41, Exco ECBCS, <http://www.kuleuven.ac.be/bwf/projects/annex41/>.
- IEA. (1991) “Sourcebook, Report Annex XIV, volume 1”. Leuven, Belgium: International Energy Agency.
- INGERSOLL, L.R. (1913) “Indoor Humidity, Science”. 37(953): 524–525.
- ISO. (1995) “Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort”. Standard 7730. International Organization for Standardization, Geneva.
- MENDES, N., PHILIPPI, P.C. and LAMBERTS, R. (2002) “A New Mathematical Method to Solve Highly Coupled Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 509-518.
- MENDES, N., WINKELMANN, F.C., LAMBERTS, R. and PHILIPPI, P.C. (2003) “Moisture Effects on Conduction Loads”. *Energy and Buildings*, 35(7): 631-644.

MENDES, N., OLIVEIRA, R.C.L.F. and SANTOS, G.H.dos. (2003b) “Domus 2.0: A Whole-Building Hygrothermal Simulation Program”. Proceedings of the 8th International Building Performance Simulation Association (IBPSA), 1, Eindhoven – Netherlands.

RODE, C. (2003) “Workshop on Moisture Buffer Capacity – Summary Report”. Dept. of Civil Engineering, Technical University of Denmark, R-067.

RHOLES, F.H.Jr. (1973) “The revised modal comfort envelope”. ASHRAE Transactions, 79(2): 52.

TRNSYS Version 15. (1995) “A Transient Simulation Program, Multizone Building Modeling with Type 56”. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) do Ministério da Ciência e Tecnologia pelo apoio financeiro.