

**MEFTE**  
**Bragança 09**

**III Conferência Nacional**  
**em mecânica de fluidos, termodinâmica**  
**e energia**

**17 e 18 de Setembro**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

**Fernando Pinho**  
**Pedro Coelho**  
**Paulo Oliveira**  
**Paulo Piloto**

Título: Actas da III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia (MEFTE - BRAGANÇA 09), resumos.

Autores da edição: Fernando Pinho, Pedro Coelho, Paulo Oliveira, Paulo Piloto.

ISBN: 978-989-96264-0-9

Depósito Legal: 297510 / 09

Editora: Associação Portuguesa de Mecânica Teórica Aplicada e Computacional (APMTAC)

Imagem: Atilano Suarez (Serviços de imagem do IPB) e Ricardo Gonçalves (CTI-ESTIG-IPB)

Paginação: Paulo Piloto, Elizabeth Pereira, Fernanda Maçorano

Produção Gráfica: Escola Tipográfica

## ACTAS DA

III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia  
(MEFTE - BRAGANÇA 09)  
resumos

## ORGANIZAÇÃO

APMTAC – Associação Portuguesa de Mecânica, Teórica, Aplicada e Computacional  
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
IST – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa  
UBI – Universidade da Beira Interior  
IPB – Instituto Politécnico de Bragança

APMTAC



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Faculdade de Engenharia



IPB  
INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE BRAGANÇA

## COMISSÃO ORGANIZADORA

Fernando Pinho – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Pedro Coelho – Instituto Superior Técnico  
Paulo Oliveira – Universidade da Beira Interior  
Paulo Piloto – Instituto Politécnico de Bragança

## COMISSÃO EXECUTIVA

Ana Isabel Pereira – Instituto Politécnico de Bragança  
Carlos Balsa – Instituto Politécnico de Bragança  
Olga Ferreira – Instituto Politécnico de Bragança  
Simão Pinho – Instituto Politécnico de Bragança  
Ricardo Dias – Instituto Politécnico de Bragança  
Rolando Dias – Instituto Politécnico de Bragança  
Rui Lima – Instituto Politécnico de Bragança  
Valdemar Garcia – Instituto Politécnico de Bragança

## COMISSÃO HONRA

Albano Alves – Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Vitor Alves – Governo Civil de Bragança  
Jorge Nunes – Câmara Municipal de Bragança  
Sobrinho Teixeira – Instituto Politécnico de Bragança

## COMISSÃO CIENTÍFICA

A. F. Miguel – Universidade de Évora  
A. Heitor Reis – Universidade de Évora  
Abel Rouboa – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro  
António C. Sousa – University of New Brunswick – Canadá  
António Gameiro Lopes – Universidade de Coimbra  
António Mendes – Universidade da Beira Interior  
António Moreira – Instituto Superior Técnico  
António Raimundo – Universidade de Coimbra  
Carlos Pinho – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Celestino R. Ruivo – Universidade do Algarve  
Falcão Campos – Instituto Superior Técnico  
Fernando Pinho – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
João Campos – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
João Viegas – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Jorge Capote Abreu – Universidade de Cantabria  
José C. Pereira – Instituto Superior Técnico  
José Carlos Teixeira – Universidade do Minho  
José Conde – Universidade Nova de Lisboa  
José Costa – Universidade de Coimbra  
José Dias – Universidade Nova de Lisboa  
José Palma – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Juana Fortes – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Luís Adriano Oliveira – Universidade de Coimbra  
Luís Eça – Instituto Superior Técnico  
Luís Pais – Instituto Politécnico de Bragança  
Manuel Alves – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Mário Costa – Instituto Superior Técnico  
Paulo Oliveira – Universidade da Beira Interior  
Pedro Coelho – Instituto Superior Técnico  
Pedro Dinho – Universidade da Beira Interior  
Rui Ferreira – Instituto Superior Técnico  
Sobrinho Teixeira – Instituto Politécnico de Bragança  
Toste Azevedo – Instituto Superior Técnico  
Viriato Semião – Instituto Superior Técnico  
Vitor Costa – Universidade de Aveiro

## ÍNDICE

PREFÁCIO .....	9
SESSÕES PLENÁRIAS .....	11
On modelling the effects of streamline curvature and system rotation on the turbulent scalar fluxes.....	13
Papel da Mecânica dos Fluidos no Estudo dos Incêndios Florestais .....	14
Turbulence Modelling and Numerical Issues: from RANS to DNS and LES .....	15
Teoria Constructal – Estruturas de escoamento complexas em engenharia e na natureza.....	17
Magic Triangle: Energy-Environment-Sustainable Development .....	19
Mecanismos de Formação e Métodos de Controlo da Emissão de Óxidos de Azoto em Sistemas de Combustão.....	20
SESSÕES PARALELAS .....	21
<b>SESSÃO 1: MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA .....</b>	<b>23</b>
Controlo de fumo por varrimento em parques de estacionamento cobertos: aplicação da ventilação de impulso .....	25
Unsteady Aerodynamics of Membrane Airfoils in Hovering Flight.....	27
Velocity–erosion correlation study of a sinusoidal sand pile.....	29
Planar time-dependent viscoelastic flow – pulsating flow and effect of elasticity number .....	31
Influência da geometria de misturadores em T na dinâmica do escoamento .....	32
Simulação experimental e numérica da erosão de uma pilha cónica .....	34
<b>SESSÃO 2: COMBUSTÃO E ESCOAMENTOS BIFÁSICOS.....</b>	<b>37</b>
Eficácia do Processo de <i>Reburning</i> usando Biomassa como Combustível Secundário .....	39
Investigação Computacional e Experimental de uma Câmara de Combustão Operando no Regime de Combustão sem Chama Visível .....	41
Oxigenação de águas em colunas de borbulhamento inclinadas com um sistema de anteparos perfurados.....	43
Phase Separation Study Using the Lattice Boltzmann Method.....	45
Estudos de visualização da esteira de bolhas tubulares em escoamento ascendente num fluido de Boger estagnado .....	47
Oxigenação de águas em colunas de borbulhamento a operar em escoamento co-corrente descendente.....	49
<b>SESSÃO 3: TURBULÊNCIA.....</b>	<b>51</b>
Modelagem numérica de escoamento turbulento sobre uma colina rugosa .....	53
Modelling of The Initial Laminar Phase and Transition to Turbulence in Numerical Explosion Simulation.....	55
Avaliação da performance de códigos CFD na previsão da velocidade em canais de secção composta .....	57
Estudo experimental do escoamento de um jacto plano originado por um dispositivo de cortina de ar.....	59
Limitations of performance assessment in 3D turbine stage computations using wall functions with high and low-Re turbulence models.....	60
A new $k-\epsilon$ turbulence closure for FENE-P fluid flows at low and high drag reductions .....	61
<b>SESSÃO 4: MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA .....</b>	<b>63</b>
Effect of the skimming layer on electro-osmotic — Poiseuille flows of viscoelastic fluids.....	65

Escoamento de fluido newtoniano através da junção de dois canais planos: Estudo numérico do efeito de inércia .....	66
Análise Computacional do Escoamento Variável de Fluidos Não Newtonianos Inelásticos numa Bifurcação em "T" Bidimensional.....	68
Assimetrias do escoamento de líquidos não-Newtonianos em regime de transição .....	70
New Liquid Flow Distributor Design using CFD and Experimental Validation .....	72
Laminar Flow Past a Confined Cylinder.....	74
<b>SESSÃO 5: TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES .....</b>	<b>77</b>
Captura de CO2 com Produção de Energia em ciclo de Rankine Modificado .....	79
Desenvolvimento experimental e numérico de um sistema de admissão de geometria variável para motores de veículos automóveis .....	81
Modelação e simulação numérica de uma instalação solar térmica de circulação por termosifão com permutador de calor de camisa horizontal .....	83
Modelação numérica e experimental da evaporação num plano de água aquecida .....	85
Construção e estudo de um sistema de refrigeração com energia solar .....	86
Simulação numérica do escoamento de um sistema naval de evacuação dos produtos da combustão .....	88
<b>SESSÃO 6: TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....</b>	<b>91</b>
Efeito da força de impulsão na transferência de calor a partir de um cilindro aquecido.....	93
Efeitos da convecção mista na transferência de calor entre um conjunto de cilindros e fluidos newtonianos.....	95
Intumescent coating modelling based on small scale experimental tests.....	97
Detailed Analysis of Fin-and-Tube Evaporators.....	99
Modelação de Transferência de Calor em Caldeiras.....	101
Análise da Configuração de Arrefecimento de Transformadores Eléctricos .....	103
<b>SESSÃO 7: MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA .....</b>	<b>105</b>
Configuração e Evolução Temporal da Cavidade de Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes.....	107
Numerical investigation of laminar flow in symmetric and asymmetric complex T-channels for micro-mixing.....	109
Análise das velocidades horizontais na simulação da rebentação sobre um perfil barra-fossa.....	111
Aplicação de um método Lagrangiano para a modelação de escoamento com superfície livre e de interacção onda-estrutura costeira.....	113
Relações de Haskind na interacção de vários corpos flutuantes com ondas .....	115
Simulação numérica da propagação de ondas regulares sobre um baixio esférico .....	117
<b>SESSÃO 8: MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>119</b>
Utilização de modelos semi-empíricos na simulação da secagem de bacalhau .....	121
Análise térmica de um forno de resistência ao fogo .....	123
Desenvolvimento e utilização de uma montagem experimental para estudo de sistemas de tratamento de gases de escape para veículos automóveis .....	125
Caracterização do Comportamento de Ventiladores Estáticos, Determinação Experimental das Curvas Características.....	126
Análise de sensibilidade a medições PIV para a caracterização de escoamentos hidraulicamente rugosos com moderada submersão relativa.....	127
Determinação da carbonização na madeira de pinheiro quando submetida a elevadas temperaturas para diferentes direcções das fibras .....	128
<b>SESSÃO 9: MÉTODOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>131</b>

Leading-Edge Vortex Flow Modelling Around Delta Wings Using a Boundary Element Method .....	133
On the approximate solution to an initial boundary valued problem to a nonlinear diffusion equation with a non-local source .....	134
Análisis y clasificación de los errores existentes en los modelos de fluidodinámica computacional de incendios .....	135
Sobre a aplicação de condições fronteira em problemas da dinâmica de fluidos .....	137
Modelação matemática da evolução de brechas decorrentes do galgamento de barragens de aterro .....	138
<b>SESSÃO 10: MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA .....</b>	<b>139</b>
Transferência de calor e de quantidade de movimento em escoamento laminar à microescala.....	141
Design of an efficient microfluidic rectifier for viscoelastic fluid flow.....	143
Análise do escoamento sanguíneo em microcanais com bifurcações .....	145
Electro-osmotic flows of viscoelastic fluids: a numerical study.....	146
Design of efficient microfluidic devices for viscoelastic fluid flow: a numerical approach.....	148
Steady flow of viscoelastic fluids in microchannels under electrokinetic forces: PTT model with a Gordon-Schowalter convected derivative .....	150
<b>SESSÃO 11: ENERGIA .....</b>	<b>153</b>
O Problema de Optimização de Pás de Rotores de Propulsores e Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal..	155
Aplicação do princípio piezoelétrico no desenvolvimento de pavimentos para aproveitamento energético	156
Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interação entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas.....	157
Considerações sobre o desenvolvimento de algumas tecnologias de produção e armazenamento do hidrogénio como vector energético.....	159
Analytical and experimental modeling of a viscous disc pump for MEMS applications .....	161
Estudo de viabilidade da implementação de sistemas de microgeração na região de Aveiro.....	162
<b>SESSÃO 12: MÉTODOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>165</b>
Uma solução aproximada para um problema de Decomposição Spinodal .....	167
Comparação de diferentes formulações numéricas para o cálculo de escoamentos viscoelásticos não estacionários .....	168
Modelação numérica do transporte eólico de areia: evolução da topografia do solo, consequência dos fenómenos de deposição e de erosão .....	170
Simulação numérica da interação de uma onda regular com um cilindro submerso: Comparação de três códigos numéricos .....	172
Application of the Stretched Simulated Annealing Method in the Stability Analysis of Multicomponent Systems using Excess Gibbs Energy Models .....	174
An approximate solution to Solid Fuel Models by Decomposition Methods .....	175
<b>ÍNDICE REMISSIVO .....</b>	<b>177</b>

## PREFÁCIO

Este volume contém os resumos dos artigos apresentados na III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia. Este evento surge na sequência da I e da II Conferências Nacionais de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica, organizadas pelas Universidades Nova de Lisboa (2006) e de Aveiro (2008), respectivamente, sob os auspícios da Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional (APMTAC).

Em 2008 os participantes na II Conferência exprimiram a sua opinião de ver alargado o âmbito deste evento, atraindo uma audiência mais vasta e incluindo uma maior ênfase nas aplicações. Os organizadores desta III Conferência entenderam dar resposta a esse apelo, alargando o âmbito do evento não só ao tema da Energia, que está intimamente ligado à Mecânica dos Fluidos e à Termodinâmica, mas também retirando-lhe o foco dominante nos métodos numéricos. De facto, a abordagem de todos estes temas é feita com variadas ferramentas complementares, nomeadamente de carácter analítico, numérico e experimental. Todas são essenciais para o desenvolvimento da Mecânica dos Fluidos, da Termodinâmica e da Energia, todas têm o seu âmbito de aplicação, as suas vantagens e desvantagens e da sua utilização conjunta advém o progresso nestas áreas científicas.

Portugal tem assistido a um forte crescimento da investigação nas áreas temáticas da conferência. A Comissão Organizadora regista com agrado o crescimento do número de artigos científicos (em cerca de 40%) e da sua qualidade, essencialmente como resultado desta mudança estratégica, apesar da proximidade a outros eventos da mesma temática, organizados também com a participação da APMTAC. Os trabalhos aqui apresentados são maioritariamente provenientes de instituições de investigação e de ensino nacionais, mas registamos também algumas participações internacionais. Numa tentativa de aumentar a visibilidade externa e a qualidade da conferência, a Comissão Organizadora não só aumentou o número de sessões plenárias, esperando que estas actuem também como catalisadoras de novos desafios, como convidou pela primeira vez três oradores estrangeiros.

Esta conferência, também designada por MEFTE - BRAGANÇA 09, é uma organização conjunta entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), o Instituto Superior Técnico (IST), a Universidade da Beira Interior (UBI) e o Instituto Politécnico de Bragança (IPB), que acolhe esta realização no seu campus.

Nas últimas décadas, Bragança assumiu de forma afirmativa uma maior qualidade do seu espaço urbano, apostando na evidência de uma nova dinâmica social, empresarial e cultural. Cabe às diferentes instituições que a compõem promover e incentivar acções que a tornem numa das cidades mais atractivas do país. Bragança e o IPB surgem assim naturalmente como sede de acolhimento deste evento de carácter educativo e científico.

Finalmente, a Comissão Organizadora agradece a todos aqueles que contribuíram para o sucesso desta conferência, em especial aos autores dos trabalhos submetidos.

Comissão Organizadora:  
Fernando Pinho (FEUP), Pedro Coelho (IST), Paulo Oliveira (UBI), Paulo Piloto (IPB)  
Instituto Politécnico de Bragança  
17 - 18 de Setembro de 2009

## Intumescent coating modelling based on small scale experimental tests

Luis M. R. Mesquita<sup>1</sup>, Paulo A. G. Piloto<sup>1</sup>, Mário A. P. Vaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Polytechnic Institute of Bragança, Applied Mechanics Department, Campus Sta Apolónia, Ap. 1134, 5300-857 Bragança, Portugal

email: [lmescquita@ipb.pt](mailto:lmescquita@ipb.pt) <http://www.ipb.pt>

<sup>2</sup>Faculty of Engineering of the University of Porto, Rua Dr Roberto Frias, S/N, 4200-465 Porto, Portugal

---

### Abstract

*An investigation of two different intumescent coatings used in steel fire protection has been performed to evaluate their efficiency. Among other quantities, the steel temperature and the intumescence thickness variation were measured. A mathematical model for the intumescent coating is developed. It considers the coating decomposition and models the protection by two layers, the reacted and the unreacted layer. A comparison between the experimental results and the ones obtained from the numerical model is presented.*

---

**Key-words:** Fire Protection; Intumescent Coatings; Cone Calorimeter; Heat Transfer; Thermal Decomposition

### 1 Introduction

Thin film intumescent coatings are mostly used in the civil construction industry to increase the fire resistance requirements prescribed by the structural fire design codes. They are applied essentially to structural elements with inadequate fire behaviour, like the case of steel and aluminium structures. An intumescent coating when submitted to fire starts to bubble and swells to form a carbonaceous, porous, low-density char, reducing the heat transfer to underlying virgin material layer and therefore to the substrate.

The performance of two commercial water-based intumescent paint were assessed by a set of experimental tests, conducted in a cone calorimeter, which enables the mass loss rate calculation, the substrate temperature and the intumescence thickness variation with time, [1].

A numerical model is established with the conservation equation of energy for the substrate, virgin and char layers, the conservation of mass of gas and solids and the transport of gas through the char is modelled using the empirical Darcy's law approximation. The model allows knowing the moving boundary and the free boundary locations and therefore the overall intumescence thickness with time.

The paper will focus the model development, the numeric treatment of the differential equations and, based on the intumescence thickness variation, the steel temperature comparison between the numeric and the experimental results.

### 2 Results from the cone calorimeter tests

To assess the performance of two commercial water-based intumescent paints a set of experimental tests was performed in a cone calorimeter as prescribed by the standard ISO5660, [2]. The steel plates were coated in one side with different dry film thicknesses (0,5, 1,5, 2,5 [mm]) and tested with two radiant heat fluxes: 35 [kW/m<sup>2</sup>] and 75 [kW/m<sup>2</sup>]. The temperature evolution was measured during tests and considering discrete frames the intumescence development was measured from image processing in Matlab, see Fig 1 and Fig 2. A detailed presentation of the experimental work can be found in [1].

### 3 Intumescent coating modelling

An intumescent coating when subjected to a fire starts to bubble and swells to form a carbonaceous, porous, low-density char, reducing the heat transfer to underlying virgin material layer and therefore to the substrate.

The model is based on the assumption that the coating decomposes in a single step reaction, at a specified temperature and in a very thin front, which separates the reacted zone from the virgin material, to volatiles and residual char. The decomposition gases are assumed to behave ideally and are not reactive. As an additional simplifying assumption the char and the gases are considered as being in thermal equilibrium.

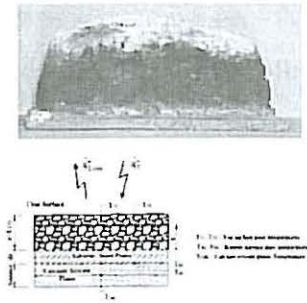


Fig. 1. Intumescent layer cross section cut. Reference and position of the thermocouples.

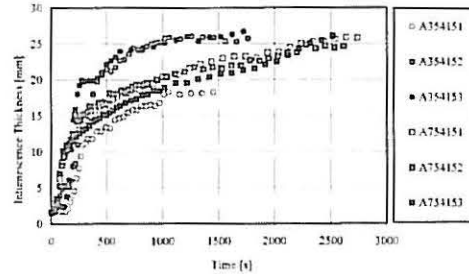


Fig. 2. Coating A intumescence development for 4 [mm] specimens with 1500 [µm] dry thickness and heat fluxes of 35 and 75 [kWm<sup>-2</sup>].

The solution method was implemented in a Matlab routine using the Method Of Lines (MOL), [3], and the integrator *ode15s* used to solve the set of ordinary differential equations. The temperature field is determined by the steel and virgin energy equations. When the front reaches the pyrolysis temperature, equal to 250 [°C], starts to decompose and to move. Then the moving front rate is determined and the intumescence starts. The position of the free boundary is set equal to the experimental result and the intumescence temperature field is determined. In each time step the virgin and char layers are remeshed.

The numerical results follow reasonably well the experimental values, as presented in Fig. 3 and Fig. 4. The results show that both the determined steel temperatures and the moving front are strongly dependent on the activation energy that defines the amount of mass loss of virgin paint.

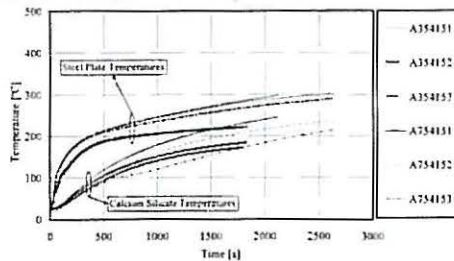


Fig. 3. Steel and calcium silicate temperatures for 4 [mm] specimens coated with a DFT of coating A equal to 1.5 [mm], tested with heat fluxes of 35 and 75 [kWm<sup>-2</sup>].

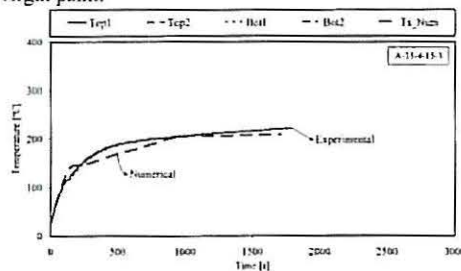


Fig. 4. Comparison of measured and computed steel temperatures,  $E_0 = 125 \text{ kJmol}^{-1}$ .

#### 4 Conclusions

A numerical model is applied to determine the steel temperature considering the intumescence measured in the cone calorimeter experimental tests. The model considers the intumescent heat sink and swelling based in the mass transfer, swelling and the kinetic decomposition. The results show that temperature variation is strongly dependent on the kinetic parameters.

#### References

1. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P.; Pinto, T.; "Decomposition of intumescent coatings: comparison between numerical method and experimental results", Application of Structural Fire Design, ISBN: 978-80-01-04266-3, pp. 140-145, Prague, Czech Republic, 19-20 February 2009.
2. ISO 5660-1:2002, Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method), International Organization for Standardization, 2002.
3. Wouwer A.V, Saucez P., and W. E. Schiesser, "Simulation of Distributed Parameter Systems Using a Matlab- Based Method of Lines Toolbox: Chemical Engineering Applications", Ind. Eng. Chem. Res. 2004, 43, 3469-3477.