

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Incêndios em ambientes fechados: uma análise da influência do
fator ventilação no comportamento da pluma de fogo sob a visão
da teoria do caos.**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

RODRIGO MACHADO TAVARES

Orientadora: Prof^ª. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte, Ph.D.

RECIFE, SETEMBRO / 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE**

RODRIGO MACHADO TAVARES

“Incêndios em ambientes fechados: uma análise da influência do fator ventilação no comportamento da pluma de fogo sob a visão da teoria do caos”.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GERENCIAMENTO DE RISCOS

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato RODRIGO MACHADO TAVARES _____ .

Recife, 23 de Setembro de 2003.

Prof.^ª. DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE, Ph.D. (UFPE).

Prof. FERNANDO CAMPELLO DE SOUZA, Ph.D. (UFPE).

Prof.^ª. ROSARIA ONO, Ph.D. (USP).

PÁGINA DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar este trabalho a duas pessoas fundamentais em minha jornada: João Marcelo e Inês. Esses dois seres humanos extraordinários me ensinaram, e até hoje me ensinam, de forma honrosa o complexo mecanismo da vida. Hoje tenho o privilégio, independentemente do resultado final, de estar podendo aspirar a um grau de mestre, devido ao apoio que eles me deram.

Portanto, dedico esse trabalho, o qual foi fruto de muito esforço e abnegação, a essas duas pessoas que, não por um acaso, são os meus pais. Só tenho, de fato, que agradecer a Deus a oportunidade de ser filho deles.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo e de todos, a Deus. A começar pelo dom da vida e por tudo que ele tem me proporcionado nessa vida.

À Dra. Dayse Duarte, por ter me aceito como seu orientando, por ter acreditado em meu potencial acadêmico, e, sobretudo, pela sua magnânima orientação no decorrer do desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

À minha família, por todo o apoio, em todos os aspectos, que ela vem me dando ao longo desta minha jornada. Meus pais, os quais, por mais que eu procure expressar a minha gratidão, jamais poderia conseguir agradecê-los em palavras. Assim como aos meus irmãos e sempre amigos: Gustavo e Leonardo.

Aos colegas de trabalho do grupo de pesquisa RISCTEC, que, ao longo deste período de desenvolvimento de dissertação, se tornaram a minha segunda família.

Aos colegas e amigos do mestrado, pelo convívio sadio, humano e acadêmico.

A todos os profissionais que trabalham no PPGEP.

Aos Doutores Fernando Campello e Rosaria Ono, por fazerem parte da banca examinadora da presente dissertação.

A CAPES e ao CNPq, pelo auxílio financeiro, assim como aos professores do PPGEP, por terem me concedido a bolsa de Mestrado.

Não poderia deixar, ainda, de agradecer hoje, agora e sempre, aos meus amigos desta e de outras vidas, quer sejam os visíveis, quer sejam os invisíveis.

RESUMO

Com base nas perdas provenientes de incêndios em ambientes fechados (i.e., edifícios, casas, etc), sejam diretas (i.e., em especial mortes dos ocupantes), ou indiretas, o presente trabalho buscou fazer uma análise do desempenho dos mesmos, tendo como parâmetro de referência a influência da arquitetura. As dimensões das aberturas (i.e, janelas) irão inserir uma variável antrópica no incêndio: o fator de ventilação. A ventilação, por sua vez, irá determinar a quantidade de comburente que estará entrando no ambiente, o que é crucial no que diz respeito à propagação do incêndio ou à extinção do mesmo.

Durante o processo de combustão será produzida uma pluma de fogo. Esta consiste num evento de fundamental importância durante a etapa *pré-flashover*. É justamente nessa etapa *pré-flashover* que ocorre a maioria das mortes associadas aos incêndios.

O presente trabalho procurou analisar a interação entre a pluma de fogo e o ar que entra no ambiente como sendo um sistema dinâmico não-linear e complexo. Em outras palavras, buscou-se responder o seguinte questionamento: um incêndio em ambiente fechado é um sistema caótico?

Com isto, pretende-se oferecer uma melhor compreensão sobre um incêndio em ambientes fechados e, por conseguinte, prevenir de forma mais eficaz o seu desenvolvimento, minimizando os seus impactos, sobretudo no que se refere à segurança dos ocupantes.

Palavras-chave: incêndios em ambientes fechados; ventilação; pluma de fogo; segurança dos ocupantes; sistema caótico; *flashover*.

ABSTRACT

Based on the losses - direct (i.e., especially the occupants' deaths) or indirect - of enclosure fires (i.e., buildings, houses etc.), the present work intended for to do an analysis of these kinds of phenomena, using as reference parameter the influence of the architecture. The dimensions of the openings (i.e., windows) will insert a “human variable” in the fire phenomenon: the ventilation factor. This variable will determine the amount of oxygen that will enter in room, which is crucial to the propagation of fire or its extinction.

Thus, given that fire happens, during the combustion process a fire plume will be produced. Such fire plume is a very important event during the pre-flashover phase. It is exactly in this phase, that take place most deaths associated to fires.

Therefore, the present work tried to analyze the interaction between the fire plume and the air that enters through the openings as a nonlinear dynamic and complex system. In other words, this work tried to answer this question: is an enclosure fire a chaotic system?

In doing so, this work intends to offer a better understanding of enclosure fires, and, consequently, to prevent in a more effective way its development, minimizing the impacts, especially the occupants' deaths.

Key words: enclosure fires; ventilation; fire plume; occupants' safety; chaotic system; *flashover*.

SUMÁRIO

PÁGINA DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	x
SIMBOLOGIA	xi
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Impactos provenientes dos incêndios.....	1
1.2 <i>Apresentação da problemática</i>	11
2.OBJETIVO.....	16
3.REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1 Dinâmica dos incêndios em ambientes fechados.....	17
3.2 Caracterização da pluma de fogo modelo.....	26
3.3 Ventilação versus incêndios.....	32
4. TEORIA DO CAOS.....	46
5. UM INCÊNDIO É UM SISTEMA CAÓTICO ?.....	50
5.1 Um incêndio é um sistema não-periódico ?.....	65
5.2 Um incêndio é sensível às condições iniciais ?.....	70
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	83
7. BIBLIOGRAFIA.....	90
8. APÊNDICE.....	9

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Incêndio no edifício Andraus.....	2
Figura 1.2 – Incêndio no edifício Joelma.....	3
Figura 1.3 – Incêndio como sendo um sistema.....	8
Figura 1.4 – Estágio de formação da camada de gases aquecidos no teto.....	12
Figura 1.5 – Esboço esquemático da pluma de fogo desenvolvida acima do pacote combustível.....	13
Figura 3.1 – Curva do comportamento de um incêndio em ambientes fechados.....	17
Figura 3.2 – Etapas de desenvolvimento de um incêndio.....	19
Figura 3.3 – Diagrama contínuo para o desenvolvimento de incêndios para ambientes com volume menor do que 100m ³	22
Figura 3.4 – Início de <i>flashover</i> numa sala de testes experimentais.....	23
Figura 3.5 – Fatores que influenciam no crescimento do incêndio.....	24
Figura 3.6 – Desenvolvimento da pluma de fogo culminando no <i>flashover</i>	27
Figura 3.7 – Esquema de uma pluma de fogo ascendente simétrica no eixo.....	29
Figura 3.8 – Desenho ilustrativo de uma pluma de fogo.....	29
Figura 3.9 – Pluma de fogo.....	31
Figura 3.10 – Janela de abrir de folha dupla (aberta).....	32
Figura 3.11 – Janela de abrir de folha dupla (fechada).....	32
Figura 3.12 – Desenho representando a quantidade de massa de ar que entra em função da abertura.....	35
Figura 3.13 – Esboço esquemático da diferença de pressão para ambientes fechados aquecidos.....	34
Figura 3.14 – Desenho ilustrativo de três pontos imaginários na parte superior da janela...36	
Figura 3.15 – Desenho ilustrativo de três pontos imaginários na parte inferior da janela...38	
Figura 5.1 – Fachada principal da edificação.....	50
Figura 5.2 – Fachada lateral da edificação.....	51
Figura 5.3 – Planta baixa da edificação.....	51
Figura 5.4 – Corte AB.....	52
Figura 5.5 – Diagrama contínuo descrevendo a evolução da propagação da chama a partir de uma possível sala de origem.....	53
Figura 5.6 – Planta baixa da sala 1 e descrição sucinta da mesma.....	54
Figura 5.7 – Planta baixa da sala 2 e descrição sucinta da mesma.....	54

Figura 5.8 – Planta baixa da sala 3 e descrição sucinta da mesma.....	55
Figura 5.9 – Hierarquização do problema.....	56
Figura 5.10 – Graus de importância de cada sala.....	57
Figura 5.11 – Gráfico em 3d mostrando a variação de u em função de v e t , tendo-se $m_a = 1,98\text{kg/s}$	66
Figura 5.12 – Gráfico em 3d mostrando a variação de u em função de v e t , tendo-se $m_a = 1,70\text{kg/s}$	66
Figura 5.13 – Gráfico em 3d mostrando a variação de u em função de v e t , tendo-se $m_a = 1,20\text{kg/s}$	67
Figura 5.14 – Gráfico em 3d mostrando a variação de u em função de v e t , tendo-se $m_a = 0,52\text{kg/s}$	67
Figura 5.15 – Gráfico em 2d mostrando a variação de Z em função de t , tendo-se $m_a = 1,98\text{kg/s}$	68
Figura 5.16 – Gráfico em 2d mostrando a variação de Z em função de t , tendo-se $m_a = 1,70\text{kg/s}$	68
Figura 5.17 – Gráfico em 2d mostrando a variação de Z em função de t , tendo-se $m_a = 1,20\text{kg/s}$	69
Figura 5.18 – Gráfico em 2d mostrando a variação de Z em função de t , tendo-se $m_a = 0,52\text{kg/s}$	69
Figura 5.19 – Esboço esquemático da sensibilidade às condições iniciais.....	70
Figura 6.1 – Variáveis que influenciam durante o crescimento do incêndio.....	85
Figura 6.2 – Interação entre os fenômenos que ocorrem durante o incêndio.....	86
Figura 6.3 – Perda de massa em função do tempo para incêndios em espaços confinados e não confinados.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Dados de incêndios em edificações no mundo	5
Tabela 1.2 – Cronologia dos principais incêndios em ambientes fechados no Brasil.....	6
Tabela 5.1 – Escala verbal proposta por Saaty.....	58
Tabela 5.2 – Cálculo do fluxo de massa de ar que entra por cada tipo de janela.....	59
Tabela 5.3 – Velocidade ascendente da pluma de fogo para $m_a = 1,98\text{kg/s}$	73
Tabela 5.4 – Velocidade ascendente da pluma de fogo para $m_a = 1,70\text{kg/s}$	75
Tabela 5.5 – Velocidade ascendente da pluma de fogo para $m_a = 1,20\text{kg/s}$	77
Tabela 5.6 – Velocidade ascendente da pluma de fogo para $m_a = 0,52\text{kg/s}$	79
Tabela 6.1 – Dados de temperatura e fluxo de calor necessários para o <i>flashover</i>	84

SIMBOLOGIA

- α = fator de crescimento do incêndio (kW/s^2);
- t = tempo decorrido a partir da ignição (s);
- z = altura da pluma (m);
- b = raio da pluma (m);
- m = fluxo de massa desprendido a partir da combustão do pacote combustível (kg/s);
- v = velocidade horizontal que entra na pluma (m/s);
- u = velocidade ascendente da pluma (m/s);
- H = altura da janela (m);
- h_1 = distância da quantidade de ar que entra em relação ao plano neutro (m);
- h_u = distância da quantidade de ar que sai em relação ao plano neutro (m);
- v_g = velocidade do ar na parte superior da abertura (m/s);
- v_a = velocidade do ar que entra na parte inferior da abertura (m/s);
- m = fluxo de massa (kg/s);
- C_d = coeficiente de fluxo (adimensional);
- A = área da abertura (m^2);
- ρ = densidade do gás (kg/m^3);
- dA = área infinitesimal da abertura;
- w = largura infinitesimal da abertura;
- z = altura infinitesimal da abertura;
- m_a = fluxo de massa de ar entrante (kg/s);
- F_v = fator de ventilação ($\text{m}^{5/2}$);
- L = altura da chama sem influência do teto (m);
- Q = taxa de calor liberado do pacote combustível (kW/m^2);
- D = diâmetro aproximado do pacote combustível (m);
- R_f = extensão da pluma no teto (m);
- Δ = distância entre a superfície do pacote combustível e o teto (m);
- $u_{\text{máx}}$ = velocidade máxima ascendente da pluma de fogo (m/s);
- Q = taxa de calor liberado do pacote combustível (kW/m^2);
- m_p = fluxo de massa perdida pelo material em combustão (kg/s);
- k = coeficiente de condutividade térmica (kW/m.K);
- c = calor específico (kJ/kg.K);

ρ_g = densidade dos gases internos (kg/m^3);

T_g = temperatura dos gases internos ($^{\circ}\text{C}$);

ρ_a = densidade dos gases internos (kg/m^3);

T_a = temperatura dos gases internos (kg/m^3).