

Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-Arte para Utilizadores Parte I: Introdução e Modelos Locais

Jorge C. S. André*, Domingos X. Viegas**

*Professor Auxiliar

**Professor Catedrático

Universidade Coimbra. Departamento de Engenharia Mecânica, Pinhal de Marrocos,
3030 COIMBRA

Sumário. Este artigo, que pela sua extensão se encontra subdividido em duas partes, dirige-se prioritariamente a utilizadores de modelos de propagação de fogos florestais. Visa proporcionar-lhes uma visão panorâmica actualizada do estado dos conhecimentos nesta área, propondo uma classificação geral para os modelos existentes e expondo, em termos simples, para alguns modelos ilustrativos de cada classe: os princípios físicos e a estratégia de modelação que lhes estão subjacentes; os seus parâmetros de entrada e saída; as suas limitações de aplicação, a fiabilidade das suas previsões e as suas perspectivas de desenvolvimento futuro. Neste artigo, após a introdução segue-se uma secção dedicada aos modelos que fazem apenas previsões para um pequeno sector da frente de fogo, subdivididos em modelos: empíricos, de campo e laboratoriais; físicos incompletos; e físicos completos. Dentro dos modelos empírico-laboratoriais, o modelo de Rothermel é apresentado com particular detalhe.

Palavras-chave: modelos empíricos; modelos físicos; modelos locais; modelo de Rothermel.

Abstract. This paper, which is subdivided into two parts for its extension, is aimed at users of forest fire propagation models. The purpose is to afford a broad view of the state-of-the-art in this domain, by proposing a general classification for the existing models and by explaining, in simple terms, for typical models in each class: the underlying physical principles and modelling strategy; the input and output parameters; the limits of application, the reliability of the predictions and the perspectives of future development. In this paper, after the introduction, another section is devoted to models that exclusively predict the behaviour of a small part of the fire front line, subdivided into the following classes: empirical, based on field and/or laboratory experiments; physical incomplete; and physical complete. Within the class of laboratory empirical models, Rothermel model is presented in particular detail.

Key words: empirical models; physical models; local models; Rothermel model.

Résumé. Cet article, qui est sous divisé en deux parties à cause de son extension, est dirigé prioritairement aux utilisateurs des modèles de propagations des feux de forêts. Il s'agit de leur proportionner une vision panoramique de l'état présent des connaissances dans ce domaine en proposant une classification générale pour les modèles existants et en présentant, dans des

termes simples, pour quelques modèles illustratifs de chaque classe: les principes physiques et la stratégie de modélisation sur lesquelles ils se basent; les paramètres d'entrée et de sortie; les limites d'application, la fiabilité de prédiction et les perspectives de développement futur. Après la introduction, la section suivante est dédiée aux modèles des prédictions du comportement d'un seul petit morceau du front du feu, sous-divisé en modèles: empiriques, de champ et de laboratoire; physiques incomplets; et physiques complets. Dans la classe des modèles empiriques de laboratoire, le modèle de Rothermel est particulièrement détaillé.

Mots-clés: modèles empiriques; modèles physiques; modèles locaux; modèle de Rothermel.

Introdução

Natureza geral de um modelo de propagação

Neste artigo, pelo termo «modelo de propagação» entendemos, de forma muito esquemática e geral, um modelo físico-matemático capaz de prever quantitativamente, em termos espaço-temporais médios, alguns aspectos físicos do comportamento natural de toda ou parte de uma frente chamejante de fogo florestal, nalgumas fases da sua história, com base em informação de entrada sobre as partes relevantes da floresta e do ambiente envolvente. Vale a pena fazer quatro esclarecimentos a esta definição.

Assim, em primeiro lugar, é importante reparar que a resolução espaço-temporal de descrição alcançada dependerá, simultaneamente: da capacidade do modelo para tratar fenómenos que são relevantes a escalas espaciais e temporais mais ou menos finas, como sejam, por exemplo, o salto da chama entre dois arbustos próximos mas separados, ou o efeito de uma rajada de vento sobre uma pequena secção da frente de fogo; da resolução da informação de entrada sobre a floresta e o ambiente que for possível obter; e, finalmente, do detalhe de descrição desejado pelo utilizador.

Em segundo lugar, vamos cingir-nos às previsões dos modelos para a região

da frente de fogo - região onde se encontram activas as reacções de combustão mais viva, neste caso, em chama, separando a zona do leito já (total ou parcialmente) queimada, situada «atrás» da frente, da zona ainda por queimar, situada «adiante» da frente - e as suas imediações mais próximas. Distinguindo os modelos que lidam apenas com uma pequena secção da frente, daqueles que abarcam toda a linha da frente, a principal informação de saída proporcionada por um modelo de propagação é, respectivamente, a velocidade local de propagação da frente (segundo a normal à linha da frente), para os modelos do primeiro grupo, e o movimento de toda a linha da frente, para os modelos do segundo grupo. Para além desta informação básica, cada modelo pode ainda fornecer informação sobre outros aspectos físicos do comportamento da frente de fogo, que são discriminados adiante para os vários tipos de modelos. Contudo, não é tida em conta a eventual formação de focos secundários adiante da frente, gerados pela projecção de material em combustão a partir do interior da frente (*spotting*, na literatura anglo-saxónica).

Em terceiro lugar, no desenvolvimento natural - isto é, excluindo qualquer intervenção humana de combate ao fogo- de uma frente de fogo com chama, de modo exaustivo mas sem entrar em detalhes (ANDRÉ, 1996), podem identifi-

car-se oito fases: (1) ignição; (2) crescimento; (3) pleno desenvolvimento de um certo regime de propagação, aproximadamente estacionário; (4) eventual transição de regime de propagação; (5) decaimento das chamas; (6) extinção das chamas; (7) extinção da combustão em brasa; e (8) arrefecimento dos resíduos da combustão. A maior parte dos modelos de propagação existentes lida apenas com a fase (3), para um número mais ou menos restrito de regimes de propagação, regra geral, compreendidos dentro da classe dos fogos de superfície de baixa ou média intensidade. Porém, existem já alguns modelos que, pelo menos em princípio, são capazes de descrever o fogo em todas as fases da sua história excepto, eventualmente, nas fases (1) e (4).

Em quarto lugar, exceptuando o caso dos fogos florestais de grande intensidade, que praticamente não são contemplados pelos modelos existentes, é sabido que apenas uma parte do material combustível presente num dado ponto da floresta - constituída pelos materiais mais secos e finos -, participa activamente nos processos de combustão mais viva que ocorrem no interior da frente, durante todo o seu tempo de permanência nesse local - também designado tempo de residência da frente. É comum exprimir-se este facto dizendo que é fundamentalmente esta parte do material combustível que propaga a frente de fogo (ROTHERMEL, 1983). Assim, para começar, qualquer modelo de propagação necessita de receber informação de entrada relativamente detalhada sobre esta parte da floresta, designada por leito combustível. No entanto, outras partes da floresta, como sejam, as árvores, afectam indirectamente a propagação da frente, na medida em que, por exemplo, modificam o

campo de vento nas suas imediações, relativamente a uma situação de campo aberto. Deste modo, se o modelo de propagação for suficientemente compreensivo, pode requerer também alguma informação de entrada sobre estas outras partes da floresta.

Utilidade prática de um modelo de propagação

De um ponto de vista pragmático, a investigação de modelos de propagação de fogos florestais justifica-se pelas múltiplas aplicações práticas que se podem dar a tais modelos, quer no âmbito da prevenção quer no do combate aos incêndios florestais indesejáveis. Assim, no âmbito das actividades de prevenção - empregando cenários de dados de entrada simulados ou mais ou menos realistas, com carácter histórico ou prognóstico-, estes modelos podem ser utilizados, por exemplo, para: dar formação aos combatentes; regular a florestação e o ordenamento do território, de modo a reduzir o risco de ocorrência de fogos florestais danosos ou difíceis de combater; fazer o planeamento de fogos controlados, na época baixa, para reduzir a quantidade de combustíveis finos no chão da floresta, de forma económica e ecologicamente sustentável.

No entanto, são as actividades ligadas ao combate que apresentam o maior desafio para a investigação, visto que implicam a construção de cenários realistas e complexos de informação de entrada - envolvendo alguns elementos com carácter prognóstico -, e a computação das previsões do modelo para o comportamento do fogo em tais cenários, em tempo razoavelmente inferior ao «tempo real» de ocorrência do fenómeno.

De facto, para fazer a selecção de locais e a alocação de meios de combate directo à linha da frente de fogo, ou para planear a construção de linhas de contenção da frente, é útil dispor das previsões de um modelo de propagação relativas a aspectos como os seguintes: movimento da linha da frente; indicadores de intensidade local da frente, baseados nas propriedades das chamas; concentração e composição dos fumos emitidos, seja na proximidade da frente, onde afectam a segurança dos combatentes, seja a grande distância da frente, pelo seu impacto poluente; potência calorífica transmitida a corpos sólidos próximos da frente, pessoas e imóveis.

Por estes motivos, as entidades responsáveis pelo combate aos fogos florestais em muitos países - nos EUA, Canadá e Austrália, desde os anos oitenta, e no Sul da Europa (França, Itália, Espanha, Grécia, Portugal), a partir dos anos noventa -, em maior ou menor escala e medida, têm vindo a utilizar modelos de propagação já existentes, em particular com carácter local, como ferramentas auxiliares de decisão. Na última secção da parte II do artigo teremos oportunidade de dar exemplos de programas de computador construídos com este propósito.

Objectivos e organização do artigo (Partes I e II)

Esclarecido o que entendemos por modelo de propagação de uma frente de fogo florestal, e justificado o seu interesse prático, estamos aptos a expor os objectivos e a organização do presente artigo.

Em relação aos objectivos, trata-se de apresentar o estado-da-arte sobre estes modelos, a utilizadores que, não sendo especialistas, estão interessados em saber quais as principais classes de modelos

que existem, e, para cada classe, em ter uma ideia sobre o seu estado actual e as suas perspectivas futuras de desenvolvimento, e, para alguns modelos ilustrativos da classe, em conhecer (ainda que apenas superficialmente): os princípios físicos e a estratégia de modelação que lhes estão subjacentes; os seus parâmetros de entrada e de saída; as limitações de aplicação a que estão sujeitos; e a fiabilidade das suas previsões.

Para alcançar estes objectivos, para além da introdução, dividimos o artigo (Partes I e II) em três secções principais. Numa secção tratamos de um primeiro grupo de modelos, com carácter local, isto é, que lidam apenas com uma pequena secção da frente de fogo. O património de modelos deste grupo é já suficientemente vasto para merecer uma sub-divisão mais fina, em modelos: empíricos, físicos incompletos e semi-empíricos, e físicos completos ou compreensivos. Noutra secção, já incluída na Parte II do artigo, apresentamos os modelos com carácter global, isto é, que tratam de toda a linha da frente, divididos em modelos: físicos semi-empíricos e incompletos, e físicos completos. Finalmente, na última secção abordamos os programas de computador existentes, constituindo sistemas de previsão do comportamento de uma frente de fogo mais ou menos completos, que podem integrar, para além de um ou mais modelos de propagação, outros modelos auxiliares e bases de dados, com o propósito de facilitar ao utilizador a geração dos dados de entrada que são requeridos pelos modelos de propagação.

Modelos de previsão do comportamento de um pequeno sector da frente

Salvo menção expressa em contrário, os modelos que se apresentam nesta

secção aplicam-se a condições do leito combustível e do ambiente, e a frentes de fogo com as características gerais que se passam a descrever.

O leito combustível está assente sobre um solo não-combustível e, geralmente, bom isolante térmico - por exemplo, um solo mineral. O leito propriamente dito é formado por um certo arranjo geométrico, regular ou aleatório, de partículas sólidas de material celulósico (madeira, folhas, papel, ou outros), relativamente finas mas com formas diversas, fazendo parte da classe mais geral dos leitos sólidos porosos. Quer do ponto de vista das propriedades das partículas individuais (geometria e dimensões, propriedades físico-químicas) quer das suas propriedades globais (distribuição espacial e quantidade de partículas), o leito é tratado como estatisticamente homogéneo, sendo caracterizado por valores médios constantes destas propriedades. Deste modo, muitos modelos podem não ser aplicáveis em leitos que apresentem heterogeneidades marcadas - como são, infelizmente, a maior parte dos leitos naturais-, nem sequer para prever o comportamento médio da frente.

Quanto ao ambiente de propagação, o terreno é plano mas, eventualmente, inclinado, e, caso exista, o vento imperturbado (isto é, não afectado pela frente de fogo) na proximidade da frente é constante e sopra paralelamente ao terreno, alinhado com a direcção de declive máximo (vector h), com um perfil vertical de velocidade $u = u(z)$ dado, o qual é, muitas vezes, simplesmente caracterizado por um valor médio de velocidade (vector U), a uma altura de referência.

Finalmente, a frente de chamas é tratada como se fosse estacionária, rectilínea e infinita, estando orientada

perpendicularmente à direcção comum do vento U e do declive máximo (vector h) (Figura 1).

Em resumo, com algumas restrições - a violação das mais importantes das quais está associada à existência de heterogeneidades no leito combustível e ao não paralelismo das direcções de declive máximo h , ou do vento U , e da normal (local) à frente de fogo n -, estes modelos podem ser utilizados para prever o comportamento de uma pequena secção da frente, durante um intervalo de tempo suficientemente curto. Daí que também se designem por modelos com carácter local.

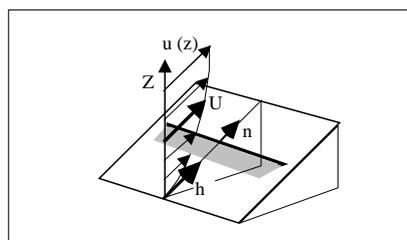


Figura 1 - Condições do terreno, do vento e da frente contempladas. Por comodidade, o vector h foi rebatido do plano horizontal para o plano do terreno

Modelos empíricos

Os modelos empíricos caracterizam-se pelo facto de a maior parte das relações que utilizam, ligando variáveis de entrada e de saída, terem carácter empírico, baseando-se num certo número de experiências de propagação de fogo, situadas dentro da zona do espaço de variáveis de entrada na qual se pretende aplicar o modelo.

A forma matemática de uma relação empírica não resulta de leis físicas fundamentais, aplicáveis num âmbito físico mais geral que o das experiências

em causa. Na verdade, o processo geral de construção de uma relação empírica para previsão da grandeza física Y , associada a uma certa classe de fenómenos físicos, consta de quatro passos principais. Em primeiro lugar, identifica-se um grupo de outras grandezas físicas, sejam elas (X_1, X_2, \dots, X_m) , designadas por variáveis de entrada, cumprindo duas condições básicas, para um fenómeno qualquer da classe: cada uma das grandezas X_i deve ser mais fácil de medir ou estimar *a priori*, que Y - o ideal é que as grandezas X_i não dependam, como Y , do próprio fenómeno; o conjunto de valores assumidos pelas variáveis de entrada para um fenómeno particular da classe, seja (x_1, x_2, \dots, x_m) , deve determinar, o mais precisamente possível, o correspondente valor y , da grandeza Y , também designada por variável de saída. Em segundo lugar, propõe-se *a priori* uma família de funções do tipo $y = F(x_1, x_2, \dots, x_m; p_1, p_2, \dots, p_l)$, em que (p_1, p_2, \dots, p_l) são l parâmetros livres.

Deste modo, cada vez que se fixam os valores destes l parâmetros, obtém-se uma função particular da família, ligando a variável de saída Y , às variáveis de entrada (X_1, X_2, \dots, X_m) . Em terceiro lugar, para cada um de n fenómenos da classe, medem-se as variáveis de entrada e de saída, gerando-se assim o conjunto de dados experimentais $S_n = \{(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}; y_j), j = 1, 2, \dots, n\}$. Nesta fase, procura-se não só que o número n de experiências seja o maior possível mas também que cubra homogeneamente o espaço relevante (para o utilizador) das variáveis de entrada. Para isso, dentro do programa experimental, é conveniente que as variáveis de entrada (X_1, X_2, \dots, X_m) sejam todas controladas. Finalmente, em quarto lugar, determi-

nam-se, empregando técnicas matemáticas adequadas, os valores óptimos que se devem seleccionar para os parâmetros livres (p_1, p_2, \dots, p_l) , sejam eles $(p_{10}, p_{20}, \dots, p_{l0})$, de modo que a correspondente função da família F - que é $y = F(x_1, x_2, \dots, x_m; p_{10}, p_{20}, \dots, p_{l0})$ ou, para abreviar, $y = F_0(x_1, x_2, \dots, x_m)$ - se ajuste o melhor possível ao conjunto de pontos experimentais S_n . A qualidade do ajustamento de uma função F , da família, será tanto melhor quanto mais baixos forem os valores dos erros $E_j = [y_j - F(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})]$, para os n pontos experimentais do conjunto S_n . A função empírica de previsão assim obtida, F_0 , é depois utilizada para prever o valor y que a grandeza Y deve assumir para um fenómeno qualquer da classe caracterizado pelos valores (x_1, x_2, \dots, x_m) das grandezas (X_1, X_2, \dots, X_m) (Figura 2).

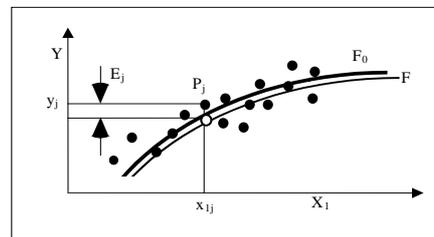


Figura 2 - Procedimento empírico de descoberta da relação entre uma variável de entrada X_1 , e uma variável de saída Y (caso tratado no texto em que $m = 1$)

Da exposição anterior ficou claro que a qualidade de uma relação empírica depende, simultaneamente: do número (m) e do acerto da escolha das variáveis de entrada (X_1, X_2, \dots, X_m) ; da família de funções F seleccionada e, em particular, do seu número (l) de parâmetros livres; da qualidade do programa experimental realizado para obter o conjunto S_n , reflec-

tida: pelo grau de controle das variáveis de entrada (X_1, X_2, \dots, X_m), pelos erros experimentais de medida das variáveis de entrada e de saída ($X_1, X_2, \dots, X_m; Y$), pelo número (n) de pontos experimentais, e pelo grau de homogeneidade da cobertura do espaço das variáveis de entrada (X_1, X_2, \dots, X_m).

Porventura, o óbice mais forte ao projecto de construção de um modelo empírico de propagação com um mínimo de generalidade e fiabilidade, reside no considerável custo, em tempo e em meios técnicos e humanos, do programa experimental que lhe está subjacente, devido ao grande número de variáveis de entrada que são requeridas para descrever adequadamente um leito combustível natural e o ambiente envolvente, e ao facto dos intervalos de variação de muitas destas variáveis serem relativamente amplos.

Passando ao ponto de vista de um utilizador, a principal dificuldade que ele sente ao recorrer a um modelo empírico consiste em apurar se o fenómeno de propagação de fogo que lhe interessa está contido na classe de leitões combustíveis, condições ambientais e frentes, para a qual o modelo foi construído. Esta dificuldade é tanto maior quanto mais reduzido for o número de variáveis de entrada do modelo e quanto menos homogénea for, e pior documentada estiver, a sua base de dados experimentais. Apesar de tudo, esta classe de modelos pode ainda ser subdividida, quanto ao grau de controlo das experiências em que os modelos se baseiam, em duas sub-classes, respectivamente, de modelos empíricos de campo e de modelos empíricos laboratoriais.

Modelos empíricos baseados em experiências de campo

No grupo de modelos empíricos de campo situam-se, por exemplo, os trabalhos pioneiros de CURRY e FONS (1940), nos EUA, e de MCARTHUR (1966), na Austrália, bem como parte substancial do programa de investigação dos serviços florestais canadianos (MC ALPINE *et al.*, 1990). Na Austrália este tipo de filosofia de modelação continua, ainda hoje, a ser activamente utilizado (CATCHPOLE, 1998).

Alguns modelos deste grupo apoiam-se em bases de dados experimentais muito heterogéneas, incluindo experiências de campo mais ou menos controladas e observações de incêndios reais. Deste modo, as suas condições de aplicação estão definidas de forma relativamente vaga, a dispersão dos resultados tende a ser muito elevada, e a fiabilidade de previsão é praticamente imponderável. Este é o caso, por exemplo, da seguinte correlação empírica para a velocidade de propagação da frente de fogo, derivada de um dos índices (ISI) do sistema canadiano (VAN WAGNER, 1987, FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP, 1992): (equação 1 a,b), onde: R [m/min] é a velocidade de propagação da frente; ISI (Initial Spread Index) é um índice normalizado; os coeficientes empíricos (a [m/min], b, c) devem ser ajustados a posteriori ao leito combustível; U [km/h] é a velocidade do vento a 10 m de altura (em campo aberto); e M_f [%] é o teor de humidade dos combustíveis finos mortos do leito (relativo à massa seca).

$$\left\{ \begin{array}{l} R = a.(1 - e^{-b.ISI})^c \\ ISI = 0,208. \left\{ e^{0,05039.U} \right\} \left\{ 91,9.e^{-0,1386.M_f} \left(1 + \frac{M_f^{5,31}}{4,93 \times 10^7} \right) \right\} \end{array} \right. \quad (1 \text{ a,b})$$

Outros modelos, porém, baseiam-se em programas experimentais mais bem controlados e homogêneos, e melhor documentados, tendendo, então, a ter condições de aplicação bastante restritas. Apesar de tudo, a grande dispersão dos dados que se continua a verificar obriga ao emprego de técnicas estatísticas relativamente apuradas para a construção das correlações empíricas dos modelos. Tal é o caso, por exemplo, do seguinte modelo de previsão da velocidade de propagação R [km/h] de frentes de fogo (plenamente desenvolvidas) em leitos naturais de herbáceas, em campo aberto, resultante de um extenso programa experimental australiano (CHENEY *et al.*, 1998), seguido de uma cuidadosa análise estatística dos dados (equação 2 a,b), onde: U [km/h] é a velocidade do vento em campo aberto, a 10 m de altura; M_f [%] é o teor de humidade das ervas secas do leito (relativamente à massa seca); C [%] é o grau de cura do leito, isto é, a percentagem (da carga [kg/m²]) de ervas secas no leito. Em relação à qualidade de ajustamento deste modelo e à sua incerteza preditiva, remetemos o leitor interessado para o artigo de CHENEY *et al.* (1998) (sua Figura 4 (a)).

Modelos empíricos baseados em experiências laboratoriais

Relativamente às experiências de campo - não falando já das simples observações de incêndios reais -, as experiências laboratoriais apresentam a

tríplice vantagem de permitirem um maior controle das variáveis de entrada e medidas mais precisas e fiáveis, para além de, sob idênticas exigências de medida, serem mais baratas o que, na prática, se reflecte na possibilidade de realizar um maior número de experiências, seja de replicação seja para assegurar uma melhor cobertura da zona relevante do espaço das variáveis de entrada. Por este motivo, as experiências laboratoriais têm sido muito utilizadas na investigação fundamental e aplicada da propagação de frentes de fogos florestais, constituindo já um património vasto e valioso (ANDRÉ *et al.*, 1992, e CATCHPOLE e CATCHPOLE, 1998).

Porém, para que estes estudos tenham interesse geral, em primeiro lugar, requer-se um bom domínio de uma série de técnicas de simulação experimental, para conseguir, por exemplo: construir um leito sólido poroso com propriedades similares às dos leitos naturais em questão; gerar uma frente de fogo em linha, plenamente desenvolvida e estacionária; ou simular correctamente a acção do vento, a alimentação do ar às chamas, e a exaustão dos gases queimados.

A este respeito, é, porventura, importante esclarecer que, na terminologia científica, «simular» não significa «imitar com todo o detalhe» mas sim, apenas, «assegurar a igualdade dos aspectos do modelo e da realidade que são relevantes», o que, por outro lado, implica já um certo conhecimento físico do fenómeno.

$$R = \begin{cases} (0,054 + 0,269 \cdot U) \cdot f(M_f) \cdot g(C), & \text{se } 0 \leq U \leq 5 \text{ km/h} \\ (1,4 + 0,838 \cdot (U - 5)^{0,844}) \cdot f(M_f) \cdot g(C), & \text{se } 5 < U \leq 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2a,b)$$

$$f(M_f) = \begin{cases} e^{-0,108 \cdot M_f}, & \text{se } 2 \leq M_f \leq 12\% \\ \begin{cases} 0,684 - 0,0342 \cdot M_f, & \text{se } 0 \leq U \leq 10 \text{ km/h} \\ 0,547 - 0,0228 \cdot M_f, & \text{se } 10 < U \leq 80 \text{ km/h} \end{cases} & \text{e } 12\% < M_f < 24\% \end{cases}$$

$$g(C) = \frac{1,120}{1 + 59,2 \cdot e^{-0,124 \cdot (C - 50)}}, \text{ se } 50\% \leq C \leq 100\%$$

De outra forma, na verdade, estar-se-ia a perder boa parte das vantagens das experiências laboratoriais face às de campo. Um bom exemplo de aplicação deste princípio encontramos-lo em FONS *et al.* (1960) - no âmbito de um projecto de investigação pioneiro, levado a cabo pelos serviços florestais dos EUA (Project Model Fire) -, os quais introduziram um modelo de leito poroso homogéneo, designado por «crib» em língua inglesa, formado pela sobreposição de camadas de barras de madeira compridas, de secção rectangular (ver Figura 5a). Neste modelo, uma série de propriedades relevantes do leito - como sejam, a razão (superfície/volume) das partículas, a carga e a porosidade do leito - podem ser controladas, dentro de certos intervalos, de forma expedita e reprodutível.

Existe ainda um segundo problema relacionado com a aplicação no campo de correlações empíricas obtidas com base em experiências laboratoriais, que resulta da diferença de escalas dos fenómenos. Com efeito, em laboratório, apenas se conseguem simular à escala 1:1 fogos florestais de relativamente baixa intensidade. O problema da transposição de dados entre dois fenómenos com escalas distintas, dentro de uma certa classe de fenómenos físicos, é abordado, com grande generalidade, em Análise Dimensional e Teoria da Semelhança,

cuja exposição fica fora do âmbito deste artigo. Esta teoria estabelece as condições gerais, conhecidas por condições de semelhança física entre dois fenómenos, para se poder operar a referida transposição de dados. Ora, dada a riqueza da fenomenologia físico-química envolvida na propagação de uma frente de fogo florestal, pode-se já afirmar que nunca é possível alcançar uma semelhança física total. Para certos regimes de propagação, se estivermos apenas interessados nalguns aspectos do comportamento da frente (variáveis de saída do modelo), existe, contudo, a possibilidade de obter uma semelhança física parcial - considerada suficiente em termos práticos - que contemple apenas aqueles fenómenos que controlam, efectivamente, as variáveis de saída dentro dos regimes em causa, desde que se trate de um pequeno número de fenómenos e sejamos, evidentemente, capazes de os identificar. Esta possibilidade é explorada, por exemplo, nos trabalhos de NELSON e ADKINS (1988) e de CARRIER *et al.* (1991).

Posto isto, há que dizer que os objectivos de investigação perseguidos com estes estudos experimentais são, na maior parte dos casos: a identificação e caracterização dos fenómenos físico-químicos que controlam a propagação da frente em certos regimes; o estudo da influência de variáveis de entrada (tais

como: a espessura ou o teor de humidade das partículas, a carga ou a porosidade da distribuição das partículas no leito; a velocidade característica do vento, ou o declive do terreno) sobre as variáveis de saída (como sejam: a velocidade de propagação, a profundidade ou o tempo de residência da frente; o comprimento ou a inclinação das chamas), conduzindo, algumas vezes, à proposta de correlações empíricas parcelares; a determinação de certos coeficientes empíricos requeridos por modelos de propagação com carácter físico, como aqueles que se referem adiante; ou, ainda, uma cuidadosa validação experimental de um qualquer modelo de previsão do comportamento da frente. Com efeito, raramente se visa a construção de modelos empíricos de propagação completos, susceptíveis de ser aplicados no campo.

Correlação empírica de ANDERSON (1969) para o tempo de residência

A título ilustrativo, mas também pelo seu carácter instrutivo quanto aos cuidados a ter e à fiabilidade a esperar da utilização de correlações empíricas obtidas por esta via, passamos a apresentar uma correlação muito simples, proposta por ANDERSON (1969) -utilizada no conhecido programa de computador BEHAVE-, para prever o tempo de residência da frente t_r [s] (cfr. VAZ *et al.*, 1998 para uma análise mais detalhada). Este, é definido como sendo o tempo que um determinado ponto (fixo) do leito permanece no interior da frente de fogo, o qual, grosso modo, coincide com o tempo de queima com chama de uma partícula do leito. A correlação proposta por aquele autor é $t_r = 18,9 \cdot d$, (equação 3).

sendo d [mm] o diâmetro (ou espessura) das partículas do leito. No seu trabalho, Anderson começa por apresentar dados experimentais obtidos por ele próprio, em laboratório, em leitos de agulhas de três espécies de pinheiro americano, caracterizados pelos seguintes intervalos paramétricos: d [mm] \in [0,44, 0,70], ρ_f = (massa volúmica das partículas) \approx 530 kg/m³, M_f [%] = (teor de humidade das partículas, relativo à massa seca) \in [2,6, 23,2], λ [mm³/mm²] = (volume de ar no leito, por unidade de área da superfície de uma partícula) \in [1,3, 2,8] e $\lambda \rightarrow \infty$ (situação limite de leito correspondente à queima de uma agulha isolada). Apresenta ainda outros dados retirados da literatura (obtidos, provavelmente, em experiências laboratoriais e de campo) mas que não documenta nem é possível identificar, dos quais apenas se sabem os seguintes intervalos de variação de variáveis de entrada: d [mm] \in [1,5, 100] e λ [mm³/mm²] \in [7,5, 18,4]. No entanto, para obter a correlação (3), Anderson ignora todos os seus dados experimentais (à excepção dos obtidos para $\lambda \rightarrow \infty$), caracterizados por valores de t_r claramente superiores aos previstos por aquela correlação. Nestas condições, Anderson deixa os potenciais utilizadores da sua correlação na ignorância de boa parte das suas restrições de aplicação. Estas incluem, por exemplo, a influência sobre t_r de parâmetros como os seguintes: material das partículas (t_r é superior para espécies resinosas); massa volúmica ρ_f das partículas, que não depende apenas do material de que são compostas; teor de humidade M_f das partículas (Anderson não sentiu a influência desta variável de entrada, embora a tenha variado dentro de um intervalo bastante amplo, porque as suas

partículas, com $d \approx 0,70$ mm, são todas muito finas); parâmetro λ do leito, dependendo, conjuntamente, da espessura das partículas e da porosidade do leito (isto deve-se a que, ao ignorar parte dos seus próprios dados experimentais, Anderson restringe, implicitamente, a variável λ ao intervalo $\lambda > 7,5$ mm, quando, na verdade, a influência de λ só se faz sentir para $\lambda < 4$ mm). Inclusivamente, o próprio expoente da variável d na equação (3), $n = 1$, não é consensual, visto que outros autores (FONS *et al.*, 1963, ALBINI, 1967) propõem valores de n mais altos ($1 \leq n \leq 2$).

Modelo de Rothermel

Como segundo exemplo, vamos apresentar o modelo de ROTHERMEL (1972), núcleo duro do programa BEHAVE, caso notável – e, tanto quanto sabemos, único – de modelo de propagação empírico completo e relativamente geral, baseado (quase exclusivamente) em experiências laboratoriais, o que justifica uma exposição mais extensa que o normal (cfr. ANDRÉ, 1996 para uma análise mais técnica e completa).

No Quadro 1 apresenta-se a lista completa de parâmetros de entrada do modelo, classificados de acordo com a sua variabilidade na natureza e/ou com o grau de liberdade que lhes é permitido no modelo. Os valores típicos que se apresentam para os parâmetros livres que são pouco variáveis na natureza, são adoptados por defeito no modelo. O modelo proporciona dois parâmetros de saída sobre a frente de fogo, um principal e outro secundário, a saber: R [m/s], a sua velocidade de propagação estacionária; e I_{R_0} [W/m²], a intensidade de reacção de uma frente (virtual) afim, propagando-se no leito em questão mas

na ausência de vento e de declive do terreno, definida como a taxa de libertação de calor desta frente, por unidade de área do solo por ela ocupada.

Passando agora a analisar a estratégia de construção deste modelo, é importante começar por referir que ela não é puramente empírica. Na verdade, para um modelo com tantos parâmetros de entrada, uma tal estratégia conduziria à realização de um número proibitivo de ensaios. Para se ficar com uma ideia mais concreta do que isto significa, repare-se que escolher para variáveis de controle dos testes apenas os 6 parâmetros de entrada com maior amplitude de variação natural, adoptando valores fixos para todos os restantes parâmetros, e varrer o intervalo de variação de cada variável de controle em apenas 10 passos, acarretaria a realização de um número de experiências da ordem de 10^6 , quando, na realidade, a equipa de Rothermel realizou «apenas» um número de testes da ordem de 10^2 . Por outro lado, isto significa também que a base de dados experimentais em que o modelo se apoia não varre uniformemente a região do espaço paramétrico considerada admissível, a qual, portanto, apresenta vastas zonas sem qualquer ponto experimental.

Vejamos, então, qual a super-estrutura de relações físicas em que o modelo se apoia. A principal destas relações exprime a lei de conservação da energia, durante um intervalo de tempo $[t, t + \Delta t]$, na região do leito combustível ainda não queimado que se representa na Figura 3, a qual constitui um exemplo concreto do que se designa, genericamente, por volume de controlo (VC). Neste caso, o VC é um paralelepípedo contíguo à linha da frente no instante t , com a profun-

didade $L = R \cdot \Delta t$ (R é a velocidade estacionária de propagação da frente), segundo a direcção de propagação, a altura H , a mesma do leito, e a largura 1 m, medida ao longo da frente (na perpendicular ao plano da figura). Na forma particular da lei de conservação da energia que aqui nos interessa escrever, apenas se contabiliza a energia absorvida por cada partícula do leito no interior do VC, até ao instante t_i em que é alcançada

pela frente e entra em ignição, isto é, entre os instantes t e t_i ($t \leq t_i \leq t + \Delta t$). Além disso, a duração Δt escolhida para o intervalo de tempo (e, portanto, também a profundidade L do VC) é suficientemente grande para se poder desprezar o calor absorvido pelas partículas do VC (sobretudo as situadas junto à sua face esquerda) anteriormente ao instante t , face ao calor total absorvido pelo VC entre t e $t + \Delta t$.

Quadro 1 - Informação útil sobre os parâmetros de entrada do modelo de ROTHERMEL (1972), na perspectiva de um utilizador

Simbolo [Unid.]	Parâmetro Definição	Tipo	Valor (típico/fixo)	Intervalo (admis./nat.)
W_0 [kg/m ²]	carga de combustível seco no leito	livre (variável)	-	0,3-9,0
β [-]	coef. de compactação do leito			0,005-0,120
σ [m ⁻¹]	razão superfície/volume das part.			315-11 500
M_f [-]	teor de humidade das partículas			0- M_x
m [-] (θ [°])	declive do terreno			0-0,75 (37,5°)
U [m/s]	velocidade do vento			0-3.6
S_T [-]	teor em minerais das partículas	livre (pouco variável)	0,0555	0,0001-0,09
S_e [-]	teor em minerais sem Sílica, das partículas secas		0,01	0,0001-0,07
h [MJ/kg]	poder calorífico inferior das partículas secas		18,6 (20,3)	(19,5-24,0) (SUSOTT, 1982a)
ρ_s [kg/m ³]	massa volúmica das part. secas		512	-
M_x [-]	teor de humidade de extinção das partículas	livre (especial)	-	0,1-0,4 (veget. morta)
c_s [J/kg.°C]	calor específico do mat. das partículas secas (madeira)	fixo	1 113+4,853 T (DUNLAP, 1912)	-
c_{P_w} [J/kg.°C]	calor específico da água		4 184	
T_{eb_w} [°C]	temp. de ebulição da água		100	
q_{v_w} [J/kg]	calor latente de evap. da água		2 259	
T_a [°C]	temperatura do ar		20	
T_{ig} [°C]	temp. de ignição das partículas		320	

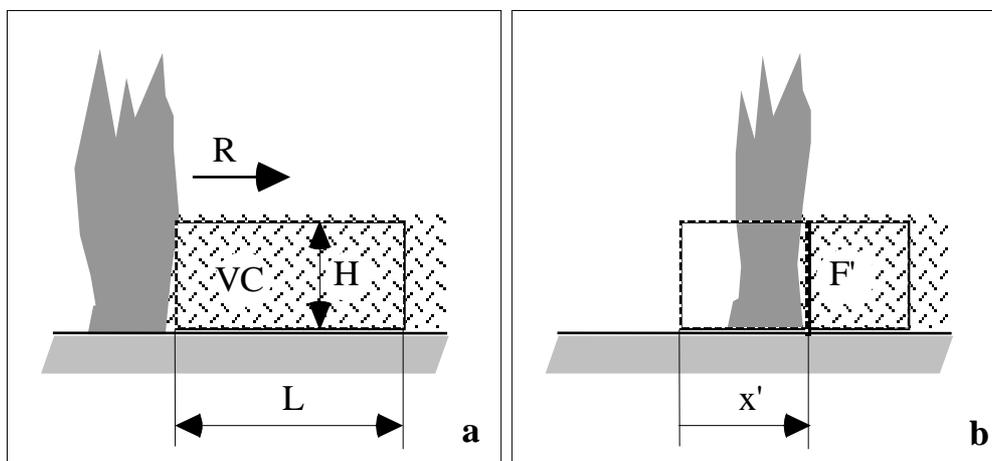


Figura 3 - Volume de controlo utilizado para exprimir a principal relação física do modelo de Rothermel (vista lateral), nos instantes: (a) t , inicial, e (b) t' , intermédio (arbitrário), do intervalo de tempo $[t, t + \Delta t]$

Posto isto, designe q_{ig_v} [J/m^3] o calor total que é necessário fornecer a uma unidade de volume do leito, para levar as partículas no seu interior, desde a condição de equilíbrio térmico com o ambiente (com a frente ainda a grande distância) até à condição de ignição (no instante em que a frente as alcança). Entre t e $t + \Delta t$, a frente atravessa todo o VC, desde a sua face esquerda até à sua face direita, de modo que no instante arbitrário t' ($t \leq t' \leq t + \Delta t$), se encontra em F' , à distância x' da face esquerda ($0 \leq x' \leq L$), como se mostra na Figura 3b. Assim, no instante de tempo t' , as partículas no VC que ainda não entraram em ignição (para a direita da superfície F'), por um lado, recebem calor da frente através da superfície F' e da parte da superfície de topo do VC entre x' e L , e, por outro lado, perdem uma fracção deste calor pelas superfícies do fundo, da direita, e de parte da de topo do VC. Para simplificar a contabilização do calor líquido que efectivamente entra no VC, substituímos todos os fluxos caloríficos anteriores,

variáveis com t' , por uma única entrada de calor equivalente, pela superfície F' , à taxa constante de I_p [W/m^2] (calor que passa por unidade de tempo e de área de F'), uniformemente distribuída sobre F' .

Estamos agora em condições de escrever a supra referida equação de conservação de energia no VC, durante $[t, t + \Delta t]$, nesta forma: (calor total absorvido pelas partículas no VC, até à ignição, entre t e $t + \Delta t$) = (entrada líquida de calor no VC, através da superfície móvel F' , em $[t, t + \Delta t]$), ou, simbolicamente,

$$q_{ig_v} \left(\frac{L}{R \cdot \Delta t} \cdot H \cdot 1 \right) = I_p \cdot (H \cdot 1) \cdot \Delta t,$$

donde decorre imediatamente a relação fundamental do modelo,

$$R = \frac{I_p}{q_{ig_v}}, \quad (4)$$

na qual os termos em numerador e denominador são designados, respectivamente, por termo-fonte (I_p) e termo-poço (q_{ig_v}) de calor.

Em relação ao termo-fonte de calor I_p ,

Rothermel assume a seguinte hipótese linear:

$$I_p = I_{p_0} + \Delta I_{p_w}(0,U) + \Delta I_{p_s}(m,0) \\ = (\xi \cdot I_{R_0}) + (\phi_w \cdot I_{p_0}) + (\phi_s \cdot I_{p_0}), \quad (5a,b)$$

onde: o sub-índice 0 designa, como é usual, a condição de propagação sem vento nem declive; (ΔI_{p_w} e ΔI_{p_s}) representam os incrementos sofridos por I_p , em relação ao termo-fonte base I_{p_0} , devido à acção isolada, respectivamente, do vento U , e do declive m ; e (ξ, ϕ_w, ϕ_s) são parâmetros adimensionais. O cálculo da intensidade de reacção sem vento nem declive, I_{R_0} , também se baseia numa relação com sentido físico, que pode ser deduzida considerando um volume de controlo paralelepipedico com dimensões ($D \cdot 1 \cdot H$) (D é a profundidade da frente segundo a direcção de propagação), móvel com a frente (não a frente real mas sim aquela que corresponde à propagação sem vento nem declive), abarcando, permanentemente, uma secção arbitrária da frente com largura unitária (ver Figura 4). Designando por τ_r o tempo de queima das partículas no interior do VC (ou tempo de reacção), é fácil concluir que o calor total libertado pela combustão das partículas no interior do VC, durante um intervalo de tempo $[t, t + \tau_r]$, é dado por:

$$Q = h \cdot (W_n \cdot (D \cdot 1) \cdot \eta_\delta), \quad (6)$$

em que: h [J/kg], poder calorífico inferior das partículas, é o calor libertado na combustão completa de uma unidade de massa de material potencialmente combustível das partículas (a massa total de uma partícula subtraída das fracções de água e de minerais, ambos não-combustíveis, designa-se massa líquida da partícula); W_n [kg/m²], carga líquida do leito, é a massa líquida total de partículas presentes por unidade de área

da base do leito, a qual se relaciona com a carga seca W_0 e o teor (líquido) em minerais S_T , através de $W_n = W_0 / (1 + S_T)$; η_δ , eficiência da combustão, é a fracção da massa líquida das partículas efectivamente consumida pela combustão dentro da frente. Rothermel denomina velocidade da reacção Γ [s⁻¹], o quociente $\Gamma = \eta_\delta / \tau_r$. Basta agora recordar que, por definição, I_{R_0} é a taxa de libertação de calor da combustão das partículas no interior do VC, por unidade de área da base do VC, isto é, atendendo à equação (6) e à definição de Γ ,

$$I_{R_0} = \frac{(Q / \tau_r)}{(D \cdot 1)} = h \cdot W_n \cdot \Gamma \quad (7a,b)$$

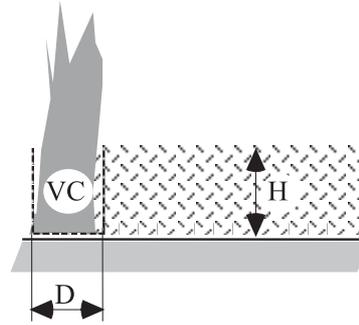


Figura 4 - Volume de controlo utilizado para deduzir as relações (6) e (7)

Para calcular o termo-poço de calor q_{ig_v} , da equação de conservação da energia (4), Rothermel emprega as seguintes relações físicas:

$$\begin{cases} q_{ig_v} = \rho_b \cdot q_{ig_m} \\ q_{ig_m} = \varepsilon \cdot Q_{ig} \\ Q_{ig} = 581 + 2594 \cdot M_f \end{cases} \quad (8a,b,c)$$

Na equação (8a): ρ_b [kg/m³], massa volúmica aparente do leito, é a massa seca total de partículas por unidade de volume do leito, relacionando-se com o coeficiente de compactação β do leito e

com a massa volúmica das partículas (secas) ρ_s , através de $\rho_b = \beta \cdot \rho_s$; e q_{ig_m} [J/kg] é o calor total que é necessário fornecer a uma unidade de massa seca de partículas do leito para provocar a sua ignição, que se supõe ocorrer à temperatura de ignição T_{ig} [°C]. Na equação (8b): Q_{ig} [J/kg] designa o valor que q_{ig_m} tomaria em condições (ideais) de aquecimento uniforme das partículas, condições que são tanto mais aproximadas quanto mais finas forem as partículas; e ε , número de aquecimento efectivo, é um número adimensional característico das partículas e da sua história real de aquecimento (à medida que a frente se vai aproximando), que tem, justamente, em conta o efeito da não-uniformidade do seu aquecimento. Concretamente, $0 < \varepsilon \leq 1$, sendo $\varepsilon \approx 0$ quando as partículas entram em ignição apenas à superfície, estando todo o seu interior ainda frio, e $\varepsilon = 1$ quando a ignição se dá simultaneamente em todo o volume da partícula por todo ele se encontrar à temperatura de ignição T_{ig} . Finalmente, na equação (8c) estão contabilizados os seguintes termos de absorção de calor pela partícula, em condições ideais de aquecimento uniforme e adoptando para os parâmetros ($c_s(T)$, c_{p_w} , T_{eb_w} , q_{v_w} , T_a , T_{ig}) os valores que se indicam no Quadro 1: absorção de calor sensível pelo material seco da partícula (controlada pelo calor específico do material, c_s , sendo $c_s(T)$ dada pela correlação empírica de DUNLAP 1912, para a madeira seca), correspon-

dendo ao seu aumento de temperatura, de T_a para T_{ig} ; absorção de calor sensível pela água (em fase líquida) contida na partícula, associada à sua subida de temperatura, de T_a para T_{eb_w} (temperatura de ebulição); e absorção de calor na vaporização completa desta água, a T_{eb_w} , a qual, uma vez vaporizada, se supõe libertar-se da partícula sem qualquer dispêndio energético adicional.

Resumindo, as relações (4), (5), (7) e (8) constituem a super-estrutura de relações físicas do modelo de Rothermel. Todas as restantes relações matemáticas incorporadas no modelo, aliás mais numerosas que as anteriores, são obtidas empiricamente. Daí o termos classificado este modelo como empírico. Apesar de tudo, a própria metodologia seguida por Rothermel para obter estas correlações empíricas, é guiada por algumas hipóteses físicas. As características mais salientes desta metodologia, as quais permitem uma economia substancial no número de experiências a realizar, são: o carácter modular das várias correlações empíricas, e a estrutura em árvore das suas relações de dependência. A título ilustrativo, mostram-se na Figura 5 os vários tipos de leitos combustíveis empregues nas experiências.

O conjunto ordenado de relações matemáticas do modelo é o seguinte:

$$R = \frac{I_p}{q_{ig_v}} ; \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_p = I_{p_0} \cdot (1 + \phi_w + \phi_s), \\ I_{p_0} = \xi \cdot I_{R_0} \end{cases} \quad (5a,b)$$

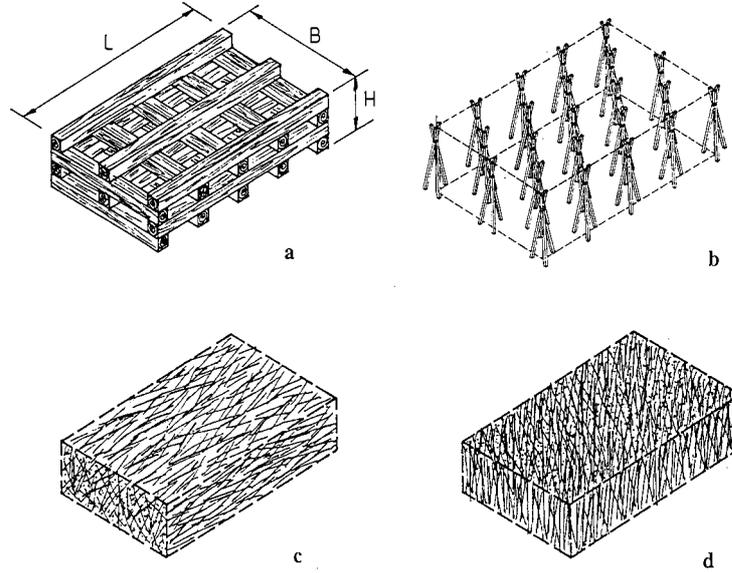


Figura 5 - (a) Leito com arranjo do tipo «crib». (b) Leito caracterizado por um arranjo geométrico regular de tripés. (c) Leitões formados por arranjos aleatórios estatisticamente homogêneos, respectivamente, de palitos e de carumas. (d) Leito de herbáceas em campo aberto (experiências de MCARTHUR, 1969, na Austrália)

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_w = a \cdot (197 \cdot u)^b \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_{opt}} \right)^{-c}, \beta_{opt} = \beta_{opt}(\sigma) \text{ (cfr. eq. 16c)} \\ a = 7,47 \cdot e^{-0,069 \cdot \sigma^{0,55}} \\ b = 0,01330 \cdot \sigma^{0,54} \\ c = 0,715 \cdot e^{-1,09 \times 10^{-4} \cdot \sigma} \end{array} \right. \quad (9a,b,c,d)$$

$$\phi_s = 5,275 \cdot \beta^{-0,30} \cdot m^2, \quad (10)$$

$$\xi = \frac{e^{(0,792+0,376 \cdot \sqrt{\sigma})(0,1+\beta)}}{192+0,0791 \cdot \sigma}, \quad (11)$$

$$I_{R_0} = h \cdot W_n \cdot \Gamma, \quad (7b)$$

$$W_n = \frac{W_0}{1+S_T}, \quad (12)$$

$$\Gamma = \eta_S \cdot \eta_M \cdot \Gamma', \quad (13)$$

$$\eta_S = 0,174 \cdot S_e^{-0,19}, \quad (14)$$

$$\eta_M = 1 - 2,59 \cdot \left(\frac{M_f}{M_x}\right) + 5,11 \cdot \left(\frac{M_f}{M_x}\right)^2 - 3,52 \cdot \left(\frac{M_f}{M_x}\right)^3, \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma^i = \Gamma^i_{\max} \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_{\text{opt}}}\right)^A \cdot e^{-A \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{\text{opt}}}\right)} \\ \Gamma^i_{\max} = \frac{0,0167 \cdot \sigma^{1,5}}{2940 + 0,0594 \cdot \sigma^{1,5}} \\ \beta_{\text{opt}} = 8,858 \cdot \sigma^{-0,8189} \\ A = \frac{1}{4,24 \cdot \sigma^{0,1} - 7,27} \end{array} \right. \quad (16a,b,c,d)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{ig_v} = \rho_b \cdot q_{ig_m} \\ q_{ig_m} = \varepsilon \cdot Q_{ig} \\ Q_{ig} = 581 + 2\,594 \cdot M_f \end{array} \right. \quad (8a,b,c)$$

$$\rho_b = \beta \cdot \rho_s \quad (17)$$

$$\varepsilon = e^{-\frac{453}{\sigma}} \quad (18)$$

Pelo seu interesse, justifica-se contar aqui, ainda que brevemente, a história deste modelo. O modelo encontra-se publicado originalmente no relatório de ROTHERMEL (1972), motivo pelo qual é conhecido como «modelo de Rothermel», mas integra-se num programa de investigação mais amplo, levado a cabo pelos Serviços Florestais dos Estados Unidos, sobretudo, no Northern Forest Fire Laboratory (NFFL). Este programa de investigação é notável a vários títulos: pela sua extensão no tempo (1958-...); pela dimensão dos recursos humanos, técnicos e financeiros que tem utilizado; pela sua estruturação; pela simbiose de investigação fundamental e aplicada que representa, capaz de gerar valiosos produtos aplicados, tais como os conhecidos programas de computador BEHAVE e FARSITE. As suas raízes mais profundas situam-se num projecto de investigação intitulado Project Model Fire, lançado em 1958. Este projecto foi liderado por Fons

até 1962 e, seguidamente, até ao seu final, em 1966, por Byram. No entanto, foi no período de 1965 a 1972 que se realizou a investigação mais directamente ligada com o modelo, a qual se encontra publicada, substancialmente, nos seguintes relatórios ou artigos: ROTHERMEL e ANDERSON (1966), PHILPOT (1968, 1970), ANDERSON (1969), e FRANSEN (1971, 1973). Posteriormente a 1972, o modelo foi melhorado e estendido segundo duas linhas principais de investigação: uma linha de refinamento do modelo, visando o seu fortalecimento científico e baseando-se em investigação mais fundamental; e uma linha de extensão do modelo, tendo em vista a sua aplicação em ambiente operacional, ligada a investigação mais aplicada. As principais propostas de refinamento do modelo, deixando de fora os efeitos do vento e do declive, encontram-se sintetizadas em ROTHERMEL (1990), e apoiam-se numa base de dados experimentais substancial-

mente mais extensa que a original, e, ainda, nos trabalhos de WILSON (1985, 1990) e de SUSOTT (1982a,b, 1984). Quanto às propostas de extensão do modelo, que aliás se encontram incorporadas no programa BEHAVE, limitamo-nos aqui a referir que se podem subdividir em três grupos: as que visam tornar o modelo aplicável às condições naturais mais comuns; as que se destinam a tornar mais fácil ao utilizador, a determinação dos parâmetros de entrada do modelo para leitos e ambientes naturais; e as que procuram estender o grupo de parâmetros de saída do modelo, para incluir, nomeadamente, o tempo de residência t_r [s] (ANDERSON, 1969), a profundidade D [m], a intensidade linear I_L [MW/m], e o comprimento das chamas L_f [m] (BYRAM, 1959), da frente. Nas propostas do primeiro grupo incluem-se o tratamento de leitos heterogéneos (ROTHERMEL, 1972, ALBINI, 1976b, BURGAN e ROTHERMEL, 1984, CATCHPOLE e CATCHPOLE, 1991, CATCHPOLE *et al.*, 1993), e, ainda, o tratamento de situações de não-paralelismo das direcções da normal à frente, de declive máximo e da velocidade do vento (ALBINI, 1976a, ROTHERMEL, 1983, ANDREWS, 1986). Contudo, é importante salientar que, sem menosprezo do seu valor, todas estas propostas têm um carácter científico bem menos fiável que o modelo original.

Por último, uma palavra sobre os esforços de validação do modelo até agora realizados. Para começar, WILSON (1990) tira partido do numeroso conjunto de ensaios laboratoriais em que se baseia para propor uma versão melhorada do modelo original (ver acima), embora apenas na ausência de vento e de declive do terreno, para realizar uma análise estatística de erros com certo interesse.

Dela se pode concluir, por exemplo, que, dentro do intervalo de velocidade de propagação (medida) da frente R , entre 0,02 e 1,3 m/min, existe uma probabilidade de 67% de que o modelo (modificado) preveja R com um erro relativo inferior a 41%, se se tratar de um erro por defeito, ou inferior a 70%, se se tratar de um erro por excesso. Mais recentemente, CATCHPOLE *et al.* (1998) submetem o modelo aos únicos testes laboratoriais independentes, aliás relativamente rigorosos e extensos, de que temos conhecimento. Não tendo aqui espaço para analisar os resultados destes testes, referimos apenas que estes não são muito abonatórios para o modelo.

Em relação ao numeroso grupo de ensaios de campo realizados, fazemos apenas dois comentários. Primeiro comentário: raramente as condições do leito e do ambiente satisfazem estritamente as condições de aplicação do modelo original, forçando os autores dos testes a empregar uma versão estendida do modelo. Uma das poucas excepções é constituída por um grupo de 9 ensaios de SNEEUWJAGT e FRANSEN (1977), em leitos de herbáceas mortas, terreno praticamente horizontal e velocidade do vento $U \approx 2$ m/s. Dada a variação de U durante os testes, estes autores obtiveram, para além de um valor médio, um intervalo plausível de incerteza de previsão do modelo, para R . Nestas circunstâncias, os erros relativos correspondentes, respectivamente, ao valor médio e ao intervalo de previsão, foram de +0,4% e [-45%, +28%], no «melhor» dos ensaios, e de +55% e [-18%, +150%], no «pior» deles. Segundo comentário: os processos de estimação a priori de alguns parâmetros de entrada do modelo são muito deficientes, possuindo incertezas desconhecidas. Para além disso, é

frequente que vários parâmetros de entrada (por exemplo, parâmetros do leito e velocidade do vento U) sejam ajustados a posteriori. Assim, mais do que uma verdadeira validação científica, estes testes visam determinar, empiricamente, os valores dos parâmetros de entrada (em particular, daqueles que descrevem o leito) que devem ser utilizados em situações naturais análogas, para obter, de forma expedita, previsões aceitáveis do modelo. Tais procedimentos são aliás sistematizados em ROTHERMEL e RINEHART (1983) e BURGAN e ROTHERMEL (1984).

Modelos físicos incompletos e semi-empíricos

Vamos começar por explicar a razão de ser da designação dos modelos de propagação desta segunda classe, como «modelos físicos incompletos e semi-empíricos». Em primeiro lugar, estes modelos são «físicos» porque se baseiam em leis físicas com carácter mais ou menos fundamental, a principal das quais exprime a lei de conservação de energia num volume de controlo (VC) situado na região do leito combustível ainda não queimado, adiante da frente de fogo. Neste ponto assemelham-se ao modelo empírico de Rothermel já apresentado. No entanto, estes modelos vão mais longe que o modelo de Rothermel sob dois pontos de vista: primeiro, porque usam formulações mais gerais e poderosas da lei de conservação de energia, empregando volumes de controlo com carácter infinitesimal (recorde-se que, pelo contrário, o VC utilizado por Rothermel é um paralelepípedo integral, com toda a altura do leito (H) e com profundidade L virtualmente infinita); segundo, porque também modelam fisicamente os termos

poço ($q_{ig,v}$) e fonte (I_p) de calor, daquela lei, ainda que de uma forma simplificada. Em segundo lugar, estes modelos são chamados «físicos incompletos» porque não modelam fisicamente os fenómenos, aliás bastante complexos, que ocorrem no interior da frente de fogo, nas brasas e nas chamas, os quais, naturalmente, são a origem dos termos fonte de calor da equação de conservação de energia de que falamos acima. Daí que sejam obrigados a incorporar algumas relações empíricas respeitantes a estes fenómenos, sob pena de terem de admitir como parâmetros de entrada algumas propriedades da frente que não podem ser conhecidas *a priori*. Por este motivo, e também porque em algumas das suas relações físicas aparecem coeficientes que, ou não têm significado físico, ou, pelo menos, devem ser determinados empiricamente, *a priori* ou mesmo *a posteriori*, estes modelos continuam a ter um carácter semi-empírico.

Esta classe de modelos é muito numerosa, existindo vários trabalhos de síntese que proporcionam perspectivas unitárias complementares sobre o seu conjunto (STEWART, 1974, CATCHPOLE e DE MESTRE, 1986, WEBER, 1991a, ANDRÉ *et al.*, 1992, CATCHPOLE, 1994). Assim, desta classe, limitamo-nos aqui a destacar os seguintes modelos: FONS (1946), EMMONS (1964), HOTTEL *et al.* (1965), THOMAS (1967,1971), FANG (1969), PAGNI e PETERSON (1973), ALBINI (1986) e DE MESTRE *et al.* (1989). Na década de 90 nota-se um claro decréscimo da investigação nesta linha, sendo interessante reparar que este ocorre em simultâneo com o crescimento da investigação em modelos físicos completos.

A título ilustrativo, vamos fazer uma descrição sucinta de um modelo desta

classe proposto por HOTTEL *et al.* (1965). Este modelo baseia-se na equação de conservação de energia no VC que se mostra na figura abaixo, escrita no referencial OX, móvel com a frente (estacionária). Neste referencial a frente aparece parada e o VC desloca-se à velocidade R, no sentido positivo do eixo OX. Este VC é dito integro-diferencial por se tratar de um paralelepípedo com a altura (H) do leito e largura 1 m, ambas finitas, mas com profundidade infinitesimal dx . O modelo é unidimensional porque se assume que a distribuição de temperatura das partículas do leito no interior do VC é, aproximadamente, uniforme, podendo ser bem caracterizada pelo seu valor médio $T(x)$. (Repare-se que, no referencial OX, a distribuição espacial de temperatura $T(x)$ não varia com o tempo, uma vez que a frente se propaga em condições estacionárias.) Supõe-se ainda que o terreno é horizontal e não há vento.

Na Figura 6 representam-se os vários termos de fluxo de calor contemplados no modelo, por meio de setas com o sentido dos fluxos (entrada/saída do VC), junto às faces do VC que atravessam. A seta é ondulada ou simples consoante se trate de um termo associado a um mecanismo de transmissão de calor de tipo radiante ou convectivo/conduutivo. Concretamente, o modelo considera cinco fluxos caloríficos [W], a saber: $d\dot{Q}_{b,r,a}$, a radiação emitida pelas brasas e chamas dentro do leito, efectivamente absorvida no VC, que atravessa as faces laterais do VC (entrada pela face esquerda e saída de parte pela face direita); $d\dot{Q}_{f,a}$, a radiação emitida pelas chamas acima do leito e absorvida na camada superior do VC; $d\dot{Q}_c$, o calor transmitido por contacto das chamas

com as partículas junto à face superior do VC; ($d\dot{Q}_{a,c}$, $d\dot{Q}_{a,r}$), o calor perdido pela face superior do VC, respectivamente, por convecção para o ar e por radiação para os corpos frios na vizinhança, um e outros à temperatura ambiente T_a . Cada um destes termos infinitesimais de fluxo se pode representar como um produto de uma densidade de fluxo [W/m^2], designada pelo mesmo símbolo do fluxo mas com letra minúscula, pela área da face do VC que atravessa. Assim, por exemplo, $d\dot{Q}_{b,r,a} = d\dot{q}_{b,r,a} \cdot (1 \cdot H)$ e $d\dot{Q}_{f,a} = \dot{q}_{f,a} \cdot (1 \cdot dx)$.

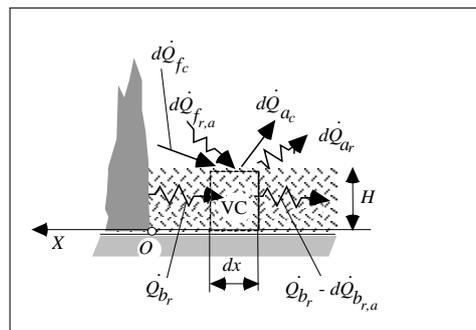


Figura 6 - Referencial, volume de controlo e fluxos caloríficos através das faces do VC, considerados num modelo proposto em HOTTEL *et al.* (1965)

Regra geral, estas densidades de fluxo calorífico, seja \dot{q} , dependem da coordenada x , directamente ou através de $T(x)$, de acordo com uma função $\dot{q}(x,T)$, que é especificada pelo modelo com base em leis físicas ou correlações empíricas mais ou menos gerais e bem estabelecidas. A densidade de fluxo calorífico radiante das chamas $\dot{q}_{f,a}$, por exemplo, é descrita pela função (repare-se que $x \leq 0$, cfr. Figura 6)

$$\dot{q}_{f,r,a}(x) = \frac{E_f}{2} \cdot \left(1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + L_f^2}} \right) \quad (19)$$

em que (E_f [W/m²], L_f [m]) são, respectivamente, o poder emissivo radiante e o comprimento (médios) das chamas da frente. Esta função resulta de leis físicas respeitantes à transmissão de calor por radiação, desde que se assuma que: as chamas radiam para o topo do leito ainda não queimado, como uma superfície plana vertical com altura L_f , emissividade unitária (superfície negra) e poder emissivo E_f , difuso e uniforme; o ar ambiente, situado entre as chamas e a superfície de topo do leito, é transparente à radiação térmica emitida pelas chamas; e a radiação das chamas é completamente absorvida numa camada relativamente fina do topo do leito (nomeadamente, com espessura bastante inferior à altura H do leito). Já a densidade de fluxo calorífico de perdas convectivas para o ar ambiente $\dot{q}_{a,c}$, é descrita por uma função com carácter físico mais empírico, a saber,

$$\dot{q}_{a,c}(T) = h_{a,c} \cdot (T - T_a), \quad (20)$$

sendo $h_{a,c}$ [W/°C·m²] um coeficiente de convecção a estimar pelo utilizador.

Dentro do termo poço de calor, o modelo apenas contempla o mecanismo de armazenamento de calor sensível nas partículas do VC, Q_s , associado à sua temperatura T através da relação

$$Q_s = \rho_b \cdot (1 \cdot dx \cdot H) \cdot c_s \cdot T, \quad (21)$$

onde: ρ_b [kg/m³] é a massa de partículas por unidade de volume do leito; e c_s [J/kg°C] é o calor específico do material das partículas, que aqui se considera constante e independente de T . Deste modo, a taxa de armazenamento de calor sensível no VC, (dQ_s/dt), é proporcional

à taxa de aumento da temperatura das partículas no seu interior, (dT/dt). Por outro lado, como, no referencial OX, a distribuição de temperatura das partículas no leito $T(x)$, não depende do tempo, a taxa de aumento de temperatura das partículas no interior do VC só pode ser devida ao facto deste se estar a aproximar da frente à velocidade R , isto é, (dT/dt) = (dT/dx)· R , pelo que, atendendo à equação (21),

$$\frac{dQ_s}{dt} = \rho_b \cdot c_s \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right) \cdot R \cdot (1 \cdot dx \cdot H). \quad (22)$$

Posto isto, a lei de conservação da energia implica que o fluxo líquido de entrada de calor no VC através das suas faces, seja igual à taxa a que o calor é absorvido no seu interior, o que, neste modelo, se exprime por

$$\frac{dQ_s}{dt} = d\dot{Q}_{b,r,a} + d\dot{Q}_{f,r,a} + d\dot{Q}_f - d\dot{Q}_{a,c} - d\dot{Q}_{a,r},$$

ou, dividindo toda a equação pela área da face superior do VC, ($1 \cdot dx$), por

$$\rho_b \cdot c_s \cdot R \cdot H \cdot \frac{dT}{dx} = \frac{d\dot{q}_{b,r,a}}{dx}(x) \cdot H + \dot{q}_{f,r,a}(x) + \dot{q}_f(x, T) - \dot{q}_{a,c}(T) - \dot{q}_{a,r}(x, T) \quad (23)$$

A equação (23) é, do ponto de vista matemático, uma equação diferencial, cuja solução é a função de distribuição (unidimensional) da temperatura no leito ainda não queimado, $T(x)$, com domínio $x \leq 0$. Nesta equação, a velocidade de propagação da frente R , aparece como um parâmetro (constante) a determinar. Por isso, para indicar que a função-solução da equação (23) depende de R , escrevemos $T(x|R)$. No entanto, para que esta função-solução seja única, é necessário impor-lhe uma condição de restrição nalgum ponto do seu domínio ($x \leq 0$), que é designada por condição de fronteira da equação diferencial (23).

Neste caso, a condição de fronteira exprime que a temperatura das

partículas longe da frente é igual à temperatura ambiente, o que se traduz simbolicamente por

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} T(x|R) = T_a \cdot \quad (24)$$

Por último, para determinar o parâmetro R , que é, afinal, o parâmetro de saída do modelo de propagação com maior interesse para o utilizador, torna-se necessário impor sobre a função $T(x|R)$ –por hipótese, já conhecida a menos R –, uma condição adicional. A mais comum, também adoptada por este modelo, consiste num critério térmico de ignição, a que já se aludiu acima, que, do ponto de vista da função $T(x|R)$, se traduz assim (T_{ig} é a temperatura de ignição assumida pelo utilizador):

$$T(0|R) = T_{ig} \quad (25)$$

Após a exposição do modelo de HOTTEL *et al.*, torna-se mais fácil entender as duas principais limitações dos modelos desta classe, na óptica do utilizador, até à data não superadas. Primeira: as suas condições de aplicação permanecem largamente desconhecidas ou, pelo menos, não estão traduzidas em termos observáveis, de fácil verificação prática. Por exemplo, a respeito das hipóteses simplificativas que estão por detrás da relação (19), não é fácil responder a questões como estas: «Em que condições do leito e do ambiente podem as chamas da frente ser tratadas como uma superfície radiante negra?» ou «Em dadas condições do leito e do ambiente, qual a espessura efectiva da camada superior do leito que absorve a radiação das chamas?». Segunda: as equações contêm parâmetros de entrada que não podem ser determinados *a priori*, porque são propriedades da própria frente de fogo. Veja-se, por exemplo, o caso do comprimento (L_f) ou do poder emissivo radiante (E_f) das chamas, que

aparecem na equação (19). Para além disso, existem parâmetros de entrada que, em princípio, se podem estimar *a priori*, como seja o coeficiente de convecção h_{ac} , na equação (20), mas que nem sempre são fáceis de obter. A estas limitações acresce a carência de testes de validação dos modelos, e de análises teóricas e experimentais comparativas entre eles, o que contribui para tornar este património de modelos bastante confuso e, em última análise, pouco interessante para um utilizador.

Modelos físicos completos ou compreensivos

Os modelos que designamos por «físicos completos ou compreensivos», caracterizam-se por visarem uma descrição físico-química o mais profunda e completa possível do conjunto de fenómenos intervenientes na propagação da frente de fogo. Examinemos com um pouco mais de detalhe o modo como este objectivo é visado nestes modelos, sob a tríplice perspectiva dos fenómenos que descrevem, da informação de saída que proporcionam, e das leis físico-químicas em que se baseiam, tomando como referência os modelos físicos incompletos e semi-empíricos.

Em relação aos fenómenos novos que são incorporados nestes modelos, temos: a pirólise e a combustão das partículas no interior da frente; a combustão em fase gasosa, nas chamas e dentro do leito, incluindo, eventualmente, a formação, o transporte e a posterior queima de partículas de fuligem; o movimento global e a mistura do ar e dos gases pirolisados e queimados, através do leito, dentro e fora da frente, e nas chamas e suas imediações, causados pelas forças de impulsão associadas às elevadas temperaturas nas

chamas e, quando exista, também pelo vento ambiente; a emissão, dispersão e absorção da radiação, pelos gases e partículas sólidas, dentro do leito e nas chamas. Por sua vez, a incorporação destes novos fenómenos permite fazer uma modelação física mais profunda – isto é, mais detalhada e baseada em leis físicas mais fundamentais– daqueles outros fenómenos que já são contemplados nos modelos incompletos, como sejam, por exemplo, os fluxos caloríficos radiantes e convectivos de aquecimento das partículas do leito ainda não queimadas. Doravante, utiliza-se o termo «campo de uma propriedade física» para designar a função que descreve a distribuição espacial da propriedade em questão.

Do ponto de vista da informação de saída proporcionada por estes modelos, devemos considerar, antes de mais, que eles dividem o espaço físico em redor da frente, em duas partes principais: uma fase gasosa, constituída por uma mistura localmente homogénea de gases simples que entram na composição do ar (p. e., oxigénio e azoto) e dos gases pirolisados e queimados (p. e., vapor de água, monóxido e dióxido de carbono); e um conjunto de fases sólidas, cada uma correspondendo a uma família de partículas com as mesmas propriedades físico-químicas (p. e., folhas ou ramos de um determinado tipo). Posto isto, os modelos fornecem como informação de saída, variável no tempo à medida que a frente se desloca: os campos de velocidade, pressão, temperatura, massa volúmica e composição química (expressa pelas fracções mássicas de cada componente gasoso simples), da fase gasosa, dentro e acima do leito; e os campos de temperatura, massa volúmica e composição química, das várias fases

sólidas. Quanto à resolução espacial destes campos, em cada ponto P do espaço, eles indicam apenas o valor médio da propriedade que lhes corresponde, dentro de uma região centrada em P , com um certo volume δV , na qual estão presentes as várias fases sólidas e gasosa, com proporções de ocupação em volume distintas entre si e variáveis de região para região ao longo do leito e no espaço em redor. Concretamente, (volume de uma partícula) $\ll \delta V \ll (1 \cdot 1 \cdot H)$, sendo H a altura (média) do leito. Desta informação de saída básica podem depois extrair-se muitas outras propriedades da frente de fogo, tais como, a sua velocidade de propagação e o comprimento e inclinação médios das chamas. Deste modo, a variedade de parâmetros de saída proporcionados por um modelo desta classe, assim como o nível de detalhe da descrição da sua distribuição espacial e temporal, excedem largamente o que é normalmente requerido nas aplicações mencionadas na introdução.

Por fim, em relação às leis físicas em que estes modelos se baseiam, podemos identificar, em primeiro lugar, uma super-estrutura de leis gerais de conservação expressas para um volume de controlo infinitesimal, para as seguintes propriedades físicas: massa global, quantidade de movimento (produto da massa pela velocidade), energia interna (armazenada na matéria) e energia radiante (transportada pelos feixes de ondas de radiação), e massas parciais dos vários componentes simples, da fase gasosa; e massa global, energia interna e massas parciais dos vários componentes simples, de cada fase sólida. Por contraste, deste primeiro grupo de leis, os modelos físicos incompletos retêm apenas uma: aquela que exprime a lei de conservação da energia para as partículas

do leito dentro do VC, assimiladas a uma única fase sólida equivalente, ficando o VC restringido à parte ainda não queimada do leito. Para além da super-estrutura anterior, existe ainda um numeroso grupo de hipóteses e leis físicas mais particulares, e até simples correlações empíricas, em que os modelos necessitam de se basear para construir sub-modelos, por exemplo: de secagem e pirólise das fases sólidas; de combustão em fase gasosa; de interacção da radiação com as partículas de uma fase sólida; de produção e emissão de radiação de partículas de fuligem nas chamas.

Historicamente, Anatoly Grishin e colaboradores, na Universidade Estatal de Tomsk (Rússia), parecem ter sido os precursores do desenvolvimento de modelos deste tipo, já no princípio dos anos 80. Infelizmente, até há muito pouco tempo - referimo-nos à recente edição em língua inglesa, da responsabilidade de F. Albini, da importante obra de GRISHIN (1997) -, no Ocidente, pouco se conhecia dos trabalhos deste grupo (p. e., GRISHIN *et al.*, 1983), maioritariamente publicados em russo. Mas, na Europa e nos EUA, é sobretudo na década de 90 que começam a aparecer contribuições importantes nesta área, bem patentes em trabalhos como os seguintes: LINN (1997), MARGERIT (1998), CLARK *et al.* (1998), PORTERIE *et al.* (1998), LARINI (1998), LYMBEROPOULOS *et al.* (1998) e PERMINOV (1998).

Quais são, no momento actual e no futuro previsível, as principais limitações de utilização destes modelos? Parece-nos que as três seguintes. A primeira limitação prende-se com as carências de conhecimentos fundamentais sobre vários fenómenos relevantes, como sejam, entre muitos outros: a combustão das brasas no interior da frente (FREY e

TIEN, 1979); a formação de fuligem e a sua influência no campo de radiação nas chamas (WILLIAMS, 1982); ou o movimento, em regime dito turbulento, dos gases na chama, o qual é fortemente influenciado pelas reacções químicas e pelos fortes gradientes térmicos que aí ocorrem (BILGER, 1989). O que estamos aqui a afirmar é que, mesmo em condições de propagação relativamente simples, nos parece que estes modelos estão ainda longe de produzir previsões quantitativamente fiáveis para os campos de parâmetros de saída, sem recorrerem a determinações empíricas *a posteriori* de alguns coeficientes livres (isto é, não definidos por leis físicas) dos sub-modelos que incorporam. Contudo, é possível que a qualidade preditiva de parâmetros de saída com carácter global, como seja a velocidade de propagação da frente R , nalguns casos, possa já ser bastante razoável. As validações experimentais disponíveis são, porém, ainda escassas para o poder afirmar com segurança. A este respeito, é digno de menção um resultado francamente encorajador apresentado por LARINI (1998), da simulação, com um modelo deste tipo, de uma frente de fogo propagando-se num leito de agulhas de pinheiro secas com 5 cm de espessura e 0,5 kg/m² de carga, em terreno horizontal, e sob vento uniforme e constante, com velocidade U inferior a 10 km/h. Este autor refere que o erro relativo de previsão da velocidade de propagação R - a qual variou entre 10 e 50 mm/s -, em confronto com dados experimentais obtidos em ensaios laboratoriais, não excede 20%. A segunda limitação é de carácter prático e deve-se à complexidade do problema matemático posto por um modelo desta classe, que é muito superior à que corresponde aos modelos

físicos incompletos, para não falar já dos modelos empíricos. Para o resolver é necessário dispor de um programa de computador expressamente construído para o efeito, o qual requer uma formação física e matemática não desprezável por parte do utilizador, e tem tempos de execução muito consideráveis. Para concretizar a questão do tempo computacional, tome-se o caso de um modelo referido por LARINI (1998), em que o cálculo da evolução da frente durante 2 min de «tempo real», realizada num computador pessoal vulgar, demorou cerca de 12 h. Se, por um lado, existem hoje computadores muito mais rápidos que este (sobretudo em centros de cálculo), e modelos nesta classe menos pesados que este, por outro lado, as condições do leito e ambientais em causa são das mais simples de entre aquelas que têm interesse prático. A terceira limitação assenta na dificuldade prática para o utilizador, de obter, para leitos e condições ambientais naturais, a numerosa e detalhada informação de entrada que estes modelos requerem. Por exemplo, a respeito do vento, não basta dar a velocidade média a uma altura de referência acima do solo, sendo necessário especificar o seu campo completo de velocidade (na ausência do fogo), numa região relativamente ampla em redor da frente. No entanto, é possível que boa parte da informação de entrada estritamente requerida pelos modelos possa ser estimada *a priori* com base num número bastante inferior de informações directamente solicitadas ao utilizador.

Para terminar, seguindo de perto LARINI (1998), abordamos a questão de quais os contributos principais que os modelos desta classe estão chamados a prestar à investigação neste domínio. A este respeito, parece-nos que os

principais contributos de um bom modelo deste tipo resultam de ele constituir um verdadeiro laboratório de experimentação sobre o comportamento da frente de fogo, capaz de proporcionar, para um leque variado e facilmente configurável de cenários de entrada, informação de saída muito rica e detalhada, qualitativamente e, sob certas restrições, também quantitativamente fiável. Com efeito, um tal laboratório está apto a prestar, em condições económicas, um sem número de serviços ao investigador interessado em construir modelos mais simples e adequados às aplicações, na medida em que lhe permite, por exemplo: identificar os fenómenos que controlam efectivamente a propagação da frente em certos regimes, e os seus parâmetros de entrada mais importantes; testar a pertinência e os limites de validade de hipóteses formuladas para simplificar a modelação física destes fenómenos; eventualmente, determinar o valor de alguns coeficientes livres destes sub-modelos simplificados; ou, até, obter directamente as equações do modelo simplificado (este é o caso do modelo de DUPUY e LARINI, 1998, relativamente ao de LARINI *et al.*, 1998).

Bibliografia

- ALBINI, F.A., 1967. A physical model for fire spread in brush. Proc. 11th Int. Symposium on Combustion pp. 553-560.
- ALBINI, F.A., 1976a. *Combining wind and slope effects on spread rate*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Northern Forest Fire Laboratory (Missoula). Memorandum to R.C. Rothermel (January 19).
- ALBINI, F.A., 1976b. *Computer-based models of fire behaviour: a user's manual*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station (Ogden, Utah). 68 pp.

- ALBINI, F.A., 1986. Wildland fire spread by radiation - A model including fuel cooling by natural convection. *Combustion Science and Technology* **45** : 101-113.
- ANDERSON, H.E., 1969. Heat transfer and fire spread. United States Department of Agriculture, Forest Service. Research Paper INT-69 : 20 pp.
- ANDRÉ, J.C.S., LOPES, A.G., VIEGAS, D.X., 1992. *A broad synthesis of research on physical aspects of forest fires*. Fluid Mechanics Group, Mechanical Engineering Department, Faculty of Science and Technology, University of Coimbra. *Cadernos Científicos sobre Incêndios Florestais* **3** : 148 pp.
- ANDRÉ, J.C.S., 1996. *A theory on the propagation of surface forest fire fronts*. PhD.Thesis (in portuguese). Mechanical Engineering Department, Faculty of Science and Technology, University of Coimbra. 330 pp.
- ANDREWS, P.L., 1986. *BEHAVE: fire behaviour prediction and fuel modelling system - BURN subsystem*, Part 1. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). General Technical Report INT-194 : 130 pp.
- BILGER, R.W., 1989. Turbulent diffusion flames. *Annual Review of Fluid Mechanics* **21** : 101-135.
- BURGAN, R.E., ROTHERMEL, R.C., 1984. *BEHAVE: fire behaviour prediction and fuel modelling system - FUEL subsystem*. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). General Technical Report INT-167 : 126 pp.
- BYRAM, G.M., 1959. In: DAVIS, K.P., 1959. *Forest fire: control and use*. (1st Ed.) Ed. McGraw-Hill. Chapters: *Combustion of forest fuels and Forest fire behaviour*.
- CARRIER, G.F., FENDELL, F.E., WOLFF, M.F., 1991. Wind-aided fire spread across arrays of discrete fuel elements. I theory. *Combustion Science and Technology* **75** : 31-51.
- CATCHPOLE, E.A., DE MESTRE, N.J., 1986. Physical models for a spreading line fire. *Australian Forestry* **49(2)** : 102-111.
- CATCHPOLE, E.A., CATCHPOLE, E.W.R., 1991. Modelling moisture damping for fire spread in a mixture of live and dead fuels. *Int. Journal of Wildland Fire* **1(2)** : 101-106.
- CATCHPOLE, E.A., CATCHPOLE, W.R., ROTHERMEL, R.C., 1993. Fire behaviour experiments in mixed fuel complexes. *Int. Journal of Wildland Fire* **3(1)** : 45-57.
- CATCHPOLE, E.A. 1994. A review of physical fire models, 1945-1975. In: *Elements of Bushfire Science*. Vol. 1: Fire Behaviour Models (PACKHAM, D.R., CATCHPOLE, E.A., CATCHPOLE, W.R., KRUSEL, N., VINEY, N., Eds.). 44 pp.
- CATCHPOLE, W.C., 1998. Fire behaviour research in Australia. Photocopies of the transparencies presented at the *Short Course on Forest Fire Behaviour Modelling* (Luso, 21/22 November). 25 pp.
- CATCHPOLE, W.C., CATCHPOLE, T., 1998. Laboratory based models. Photocopies of the transparencies presented at the *Short Course on Forest Fire Behaviour Modelling* (Luso, 21/22 November). 26 pp.
- CATCHPOLE, W.A., CATCHPOLE, E.A., ROTHERMEL, R.C., MORRIS, G.A., BUTLER, B.W., LATHAM, D.J., 1998. Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combustion Science and Technology* **131** : 1-37.
- CHENEY, N.P., GOULD, J.S., CATCHPOLE, W.R., 1998. Prediction of fire spread in grasslands. *Int. Journal of Wildland Fire* **8(1)** : 1-13.
- CLARK, T.L., COEN, J.L., RADKE, L., REEDER, M., PACKHAM, D., 1998. Coupled atmosphere-fire dynamics. Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 67-82.
- CURRY, J.R., FONS, W.L., 1940. Forest fire behaviour studies. *Mechanical Engineering* **62** : 219-225.
- DE MESTRE, N., CATCHPOLE, E., ANDERSON, D., ROTHERMEL, R., 1989. Uniform propagation of a planar fire front without wind. *Combustion Science and Technology* **65** : 231-244.
- DUNLAP, F., 1912. The specific heat of wood. United States Department of Agriculture, Forest Service (Washington DC). *Forest Service Bulletin* 110.

- DUPUY, J.L., LARINI, M., 1998. PIF97 model: a radiative and convective model for fire spread through a porous fuel bed including fire-induced flow effects. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research/14th Conference on Fire and Forest Meteorology* (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 779-799.
- EMMONS, H.W., 1964. Fire in the forest. *Fire Research Abstracts and Reviews* 5(3) : 163-178.
- FANG, J.B., 1969. *An investigation of the effect of controlled wind on the rate of fire spread*. PhD. Thesis. Chemical Engineering Department, University of New Brunswick (New Brunswick, Canada). 169 pp.
- FONS, W.L., 1946. Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Research* 72 : 93-121.
- FONS, W.L., BRUCE, H.D., PONG, W.Y., RICHARDS, S. S., 1960. *Project Fire Model - An experimental study of model fires*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Experiment Station (Macon, Georgia). Summary Progress Report.
- FONS, W.L., CLEMENTS, H.B., GEORGE, P. M., 1963. Scale effects on propagation rate of laboratory crib fires. *Proc. 9th Int. Symposium on Combustion*: 860-866.
- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP, 1992. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System*. Forestry Canada (Ottawa, Ontario). Information Report ST-X-3. 63 pp.
- FRANSEN, W.H., 1971. Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame* 16 : 9-16.
- FRANSEN, W.H., 1973. *Effective heating of fuel ahead of a spreading fire*. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). Research Paper INT-140.
- FREY, A.E., TIEN, J. S., 1979. A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics. *Combustion and Flame* 36 : 263-.
- GRISHIN, A.M., GRUZIN, A.D., ZVEREV, V.G., 1983. Mathematical modelling of the spreading of high-level forest fires. *Sovietic Physical Doklady* 28 : 328-330.
- GRISHIN, A.M., 1997. *Mathematical modelling of forest fires and new methods of fighting them*. (Translated by: CZUMA, M., CHIKINA, L., SMOKOTINA, L. Ed. by ALBINI, F.) Publishing House, Tomsk State University (Tomsk, Russia). 390 pp.
- HOTTEL, H.C., WILLIAMS, G.C., STEWARD, F.R., 1965. The modelling of fire spread through a fuel bed. *Proc. 10th Int. Symposium on Combustion*: 997-1007.
- LARINI, M., 1998. The complete physical models. Photocopies of the transparencies presented at the *Short Course on Forest Fire Behaviour Modelling* (Luso, 21/22 November). 160 pp..
- LARINI, M., GIROUD, F., PORTERIE, B., LORAUD, J.C., 1998. A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 41(6-7) : 881-897.
- LINN, R.R., 1997. *A transport model for prediction of wildfire behaviour*. PhD Thesis. Department of Mechanical Engineering, New Mexico State University (Las Cruces, New Mexico). Also: Los Alamos National Laboratory, Report N. LA-13334-T.
- LYMBEROPOULOS, N., TRYFONOPOULOS, T., LOCKWOOD, F.C., 1998. The study of small and meso-scale wind field - forest fire interaction and buoyancy effects using the AIOLOS-F simulator. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology* (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I: 405-418.
- MARGERIT, J., 1998. *Modelling and numerical simulations of the propagation of forest fires*. Ph D Thesis (in French).(U. Nancy, France).
- MC ALPINE, R.S., STOCKS, B.J., VAN WAGNER, C.E., LAWSON, B.D., ALEXANDER, M.E., LYNHAM, T.J., 1990. Forest fire behaviour research in Canada. *Proc. Int. Conference on Forest Fire Research* (Coimbra, Portugal). Communication A.02. 12 pp..
- MCARTHUR, A.G., 1966. Weather and grassland fire behaviour. *Australian Forest and Timber Bureau*. Leaflet n. 100.

- MCARTHUR, A.G., 1969. The Tasmanian bushfires of the 7th February 1967, and associated fire behaviour characteristics. In: The Technical Co-operation Programme. *Mass Fire Symposium* (Canberra, Australia, 1969). Vol. I, Defence Standards Laboratories (Maribyrnong, Victoria). 23 pp..
- NELSON, R.M., ADKINS, C.W., 1988. A dimensionless correlation for the spread of wind-driven fires. *Canadian Journal of Forest Research* **18**: 391-397.
- PAGNI, P.J., PETERSON, T.G., 1973. Flame spread through porous fuels. Proc. *14th Int. Symposium on Combustion*: 1099-1107.
- PERMINOV, V.A., 1998. Mathematical modelling of crown forest fire initiation. Proc. *III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology* (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I: 419-431.
- PHILPOT, C.W., 1968. *Mineral content and pyrolysis of selected plant materials*. United States Department of Agriculture, Forest Service. Research Note INT-84. 4 pp..
- PHILPOT, C.W., 1970. Influence of mineral content on the pyrolysis of plant materials. *Forest Science* **16**(4) : 461-471.
- PORTERIE, B., MORYAN, D., LORAUD, J.C., LARINI, M., 1998. A multiphase model for predicting line fire propagation. Proc. *III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology* (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I : 343-360.
- ROTHERMEL, R.C., ANDERSON, H. E., 1966. *Fire spread characteristics determined in the laboratory*. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). Research Paper INT-30.
- ROTHERMEL, R.C., 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). Research Paper INT-115. 40 pp..
- ROTHERMEL, R.C., 1983. *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report INT-143. 161 pp..
- ROTHERMEL, R.C., RINEHART, G.C., 1983. *Field procedures for verification and adjustment of fire behaviour predictions*. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). General Technical Report INT-142.
- ROTHERMEL, R.C., 1990. Modelling fire behaviour. Proc. *Int. Conference on Forest Fire Research* (Coimbra, Portugal). Closing Conference. 19 pp..
- SNEEUWJACT, R.J., FRANDBSEN, W.H., 1977. Behaviour of experimental grass fires vs predictions based on Rothermel's fire model. *Canadian Journal of Forestry Research* **2** : 357-367.
- STEWART, F.R., 1974. Fire spread through a fuel bed. In: *Heat transfer in fires: thermophysics, social aspects, economic impact*. BLACKSHEAR, P.L. (ed.). Ed. Scripta Book Company (Washington DC): 317-378.
- SUSOTT, R.A., 1982a. Characterization of the thermal properties of forest fuels by combustible gas analysis. *Forest Science* **28**(2) : 404-420.
- SUSOTT, R.A., 1982b. Differential scanning calorimetry of forest fuels. *Forest Science* **28**(4) : 839-851.
- SUSOTT, R.A., 1984. *Heat of preignition of three woody fuels used in wildfire modelling research*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station (Ogden, Utah). Research Note INT-342. 4 pp..
- THOMAS, P.H., 1967. Some aspects of the growth and spread of fire in the open. *Journal of Forestry* **40**(2) : 139-164.
- THOMAS, P.H., 1971. Rates of spread of some wind-driven fires. *Journal of Forestry* **44**(2): 155-175.

- VAN WAGNER, C.E., 1987. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Canadian Forest Service (Ottawa). Technical Report 35.
- VAZ, G.C., ANDRE, J.C.S., VIEGAS, D.X., 1998. *Proc. III Int. Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology* (Luso, 16/20 November 1998), Vol. I: 547-564.
- WEBER, R.O., 1991a. Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science* **17** : 67-82.
- WILLIAMS, F.A., 1982. Urban and wildland fire phenomenology. *Progress in Energy and Combustion Science* **8** : 317-354.
- WILSON, R.A., 1985. Observations of extinction and marginal burning states in free burning porous fuel beds. *Combustion Science and Technology* **44** : 179-193.
- WILSON, R.A., 1990. *Reexamination of Rothermel's fire spread equations in no wind and no slope conditions*. United States Department of Agriculture, Forest Service (Ogden, Utah). Research Paper INT-434. 13 pp..

Entregue para publicação em Maio de 2001
Aceite para publicação em Setembro de 2001