

Comportamento do Fogo e Segurança Pessoal

por

Domingos Xavier Viegas

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Portugal
xavier.viegas@dem.uc.pt

Lição apresentada nas:

Jornadas de Prevencion de Riesgos Laborales y Ambientales

Sevilha, 23 a 27 de Janeiro de 2006

1. Introdução

A luta contra os incêndios florestais constitui uma actividade de risco, porque envolve uma grande diversidade de tarefas que são susceptíveis de colocar a segurança das pessoas envolvidas em perigo. Desde a utilização de meios de transporte terrestres e aéreos, da exposição a fumos, ao calor, a condições meteorológicas adversas, à fadiga do esforço físico e ao stress do contacto permanente com as condições de perigo, são muitos os riscos que ameaçam as pessoas que têm de lidar com os incêndios florestais, quer sejam ou não combatentes.

Nesta lição vamo-nos ocupar do perigo que representa a propagação do fogo, em especial para os que têm a tarefa de o combater. Infelizmente é muito longa a lista das pessoas que perderam a vida ou que ficaram gravemente feridas ao serem expostas ao calor de um incêndio florestal. Por isso iremos tratar de alguns aspectos gerais relacionados com o comportamento dos incêndios e depois iremos dedicar uma atenção muito especial a aspectos relacionados com o comportamento extremo de um incêndio, que se encontram frequentemente associados à ocorrência de acidentes fatais.

Partes do conteúdo desta lição foram publicadas pelo autor num capítulo de um livro editado pelo Instituto Superior de Agronomia (2006) e como um artigo na Revista da Escola Nacional de Bombeiros (cf. Viegas, 2005a).

2. Modos de propagação e factores condicionantes

2.1. Caracterização do Comportamento do Fogo

Uma particularidade dos incêndios florestais é a de que evoluem ao longo do espaço e do tempo, de uma forma complexa, em resultado de um conjunto de fenómenos de natureza física e química que dependem de múltiplos factores. Na base da propagação do fogo está o facto de que a reacção de combustão, que o caracteriza, necessita de combustível para se alimentar e manter. No caso dos espaços florestais ou rurais, o combustível disponível num dado espaço é em geral limitado, pelo que ao fim de algum tempo o fogo tem de se propagar ao combustível adjacente, caso contrário extingue-se.

O comportamento do fogo durante a sua evolução condiciona de uma forma marcante todos os aspectos que com ele se relacionam. Desde a prevenção até à mitigação dos efeitos, passando naturalmente pelo combate, é o comportamento do fogo, potencial ou real, que determina as medidas a tomar e as técnicas a empregar. Por este motivo o estudo e a compreensão do comportamento do fogo constitui um elemento central de toda a gestão dos incêndios florestais em qualquer parte do mundo.

Compreende-se assim que um dos desideratos de quantos estudam os incêndios florestais seja a capacidade de modelizar e de prever o comportamento de um incêndio florestal. Tal capacidade tem obviamente vantagens na altura de definir as medidas de prevenção a adoptar, face a cenários possíveis de comportamento do fogo; permite também planear com antecedência as acções de combate, de forma a localizar e utilizar os recursos disponíveis de uma forma mais racional e segura; a modelação do comportamento é ainda importante quando se pretende estimar o impacte de um incêndio num dado ecossistema, de forma a planear as medidas a adoptar para mitigação dos efeitos.

Dada a sua complexidade é usual considerar os incêndios como sendo imprevisíveis, querendo-se com isto dizer que o seu comportamento é difícil de prever. Na verdade, apesar do extenso esforço de estudo que tem sido realizado no passado, não se dominam por completo todos os mecanismos que estão envolvidos na propagação de um incêndio florestal. Devido ao conhecimento parcial que se tem dos fenómenos e dos factores que os condicionam, a capacidade actual de modelizar o comportamento do fogo é muito incompleta e limitada. Em boa parte os conhecimentos existentes são baseados em observações de natureza empírica, realizados

em programas que são pela sua própria natureza incompletos e limitados. Mesmo os modelos baseados em leis físicas e que empregam capacidades computacionais enormes são incapazes de prever o comportamento do fogo em tempo real, dada a dificuldade em abranger a multiplicidade de escalas de espaço e de tempo e os fenómenos envolvidos, como se mostra na figura 1.

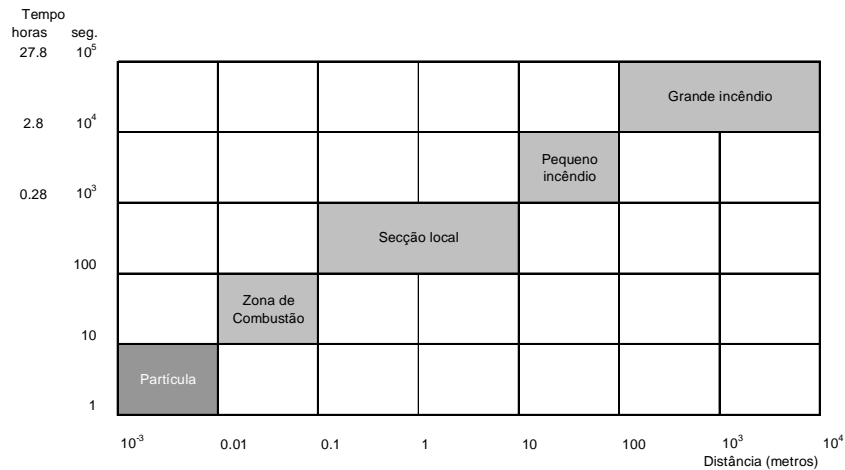


Figura 1. Escalas de espaço (comprimento) e de tempo envolvidas na descrição dos fenómenos relacionados com a propagação de um incêndio florestal.

Cientes destas limitações, iremos abordar o problema da modelação do comportamento do fogo, na perspectiva de um utilizador dos referidos modelos. As matérias que se apresentam são baseadas na experiência de investigação do autor e do seu grupo neste tema, pelo que incorporam alguns conceitos originais e porventura divergentes de algumas das concepções usuais que existem sobre este assunto.

2.2. Modos de propagação

Um incêndio florestal, à semelhança de um ser vivo, tem uma origem ou nascimento, cresce, atinge eventualmente a maturidade, decai e morre, como se mostra na figura 2.

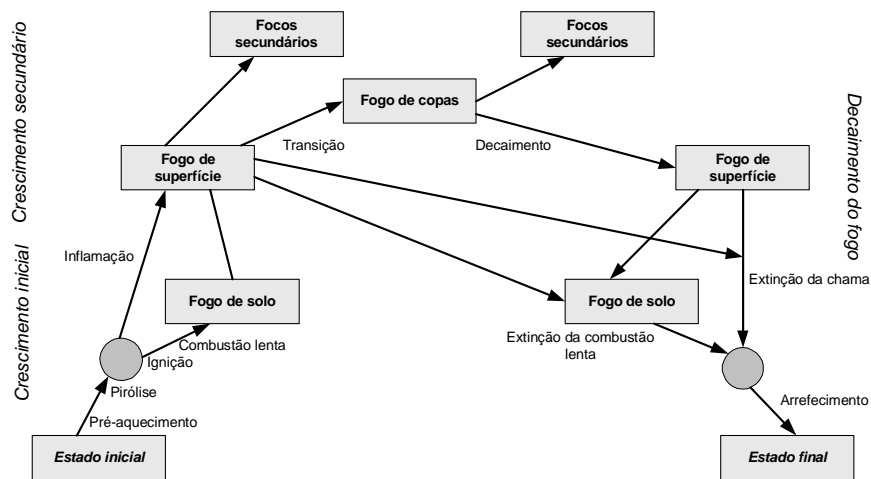


Figura 2. Fases de evolução do fogo e modos de propagação.

Estas fases podem ser observadas num dado local em instantes sucessivos de tempo; em alternativa podem ser observadas num dado instante em diversos locais de um mesmo incêndio.

Uma partícula de combustível exposta a uma fonte de calor irá elevar a sua temperatura e sofrerá um processo de decomposição química. Primeiro perderá a água que exista na sua estrutura, passando depois a libertar componentes inflamáveis que entrarão em reacção directa com o oxigénio do ar numa reacção que se designa por combustão. Se esta reacção se der na fase gasosa produzir-se-á uma chama com gases a altas temperaturas; se a reacção se der entre o oxigénio e o combustível sobre a superfície deste dá-se uma combustão sem chama. Esta última designa-se também por combustão lenta, ao passo que a anterior se designa por viva.

Para produzir a ignição inicial do combustível é necessária uma fonte de calor com suficiente energia, para produzir as transformações que foram descritas. A capacidade de um combustível entrar em ignição é designada por inflamabilidade. Quanto menor for a energia necessária para se produzir a ignição de um combustível diz-se que mais inflamável ele é. Um modo de avaliar a inflamabilidade de diversos combustíveis consiste em sujeitá-los ao efeito de uma fonte de calor fixa, tal como um radiador, de fluxo de calor constante. A inflamabilidade do combustível pode-se caracterizar pelo tempo que demora a ocorrer a ignição, desde que a partícula é exposta ao fluxo de calor. Os combustíveis mais inflamáveis entrarão em ignição ao fim de menos tempo do que os menos inflamáveis.

Um fogo pode propagar-se por meio de combustão lenta, consumindo materiais sólidos tais como raízes, troncos ou ramos e também resíduos existentes no solo, tais como folhada ou húmus. A velocidade de propagação destes fogos – ditos de solo ou subterrâneos – é muito baixa e por isso não são considerados quando se aborda o problema da modelação do comportamento do fogo. Apesar de os fogos de solo não serem muito relevantes para a evolução geral de um incêndio, podem criar problemas particularmente difíceis para a sua supressão, uma vez que podem manter-se, mesmo depois de um incêndio ser dado como extinto e vir a reacender-se produzindo danos ainda maiores do que o incêndio original.

Um fogo com combustão viva, na sua propagação, consome as partículas finas da vegetação morta e viva que encontra em sua volta. Se o fogo eclodir junto do solo consumirá os combustíveis que se encontram junto da superfície, incluindo folhada, herbáceas, arbustos e pequenas árvores, designando-se por isso por fogos de superfície.

Em condições favoráveis, o fogo de superfície poderá evoluir de forma a envolver também a folhagem da copa das árvores. Nestas condições a dimensão vertical da frente de chamas e os níveis de energia postos em jogo tornam-se claramente superiores aos anteriores. Quando o fogo se propaga consumindo as copas temos o chamado fogo de copas.

Para além dos três modos de propagação já referidos existe um quarto, que se produz quando se verifica a projecção de partículas incandescentes transportadas pelas correntes de convecção produzidas pelo fogo e pelo vento, dando origem aos focos secundários.

Se bem que tanto os fogos de copas como os focos secundários sejam manifestações de fenómenos que ocorrem igualmente em fogos de superfície, podem assumir características que os tornam particularmente perigosos e difíceis de controlar. Do ponto de vista científico constituem dois modos de propagação que se encontram pouco estudados.

Devido à maior importância relativa dos fogos de superfície e ao melhor conhecimento que existe acerca deles as considerações que se seguem incidirão essencialmente sobre este modo de propagação.

Antes de prosseguirmos convém chamar a atenção para o facto de que o processo evolutivo de um fogo num dado local não é irreversível. Como já se referiu, desde a ignição, a partícula pode arder em combustão lenta, passando depois a combustão viva. Quando esta cessa volta a ocorrer combustão lenta, que persiste até se consumir o combustível disponível. É

comum considerar-se o incêndio como extinto quando se atinge a fase de supressão da combustão com chama, visto que efectivamente termina assim a fase de propagação mais rápida do incêndio. Se não tiver havido o cuidado de suprimir completamente a combustão – mesmo a combustão lenta – por meio do rescaldo, em determinadas condições que o favoreçam, o fogo poderá reacender-se, voltando a propagar-se como um fogo de superfície ou até mesmo de copas, retomando o ciclo de crescimento e decaimento que foi descrito atrás.

2.3. Factores condicionantes: o quadrado do fogo

Como se viu antes, existem diversas fases de evolução e modos de propagação de um incêndio florestal. A questão que agora se irá abordar é a de conhecer os factores que irão condicionar cada um destes processos ou determinar a transição de uns para outros.

De acordo com o conhecimento tradicional é usual considerar os factores condicionantes do comportamento do fogo agrupados em três classes, que definem o bem conhecido “triângulo do fogo”:

- O combustível
- A topografia e
- A meteorologia.

Cada um destes factores é caracterizado por um conjunto de parâmetros cuja descrição detalhada está para além dos objectivos do presente trabalho. Mais adiante falaremos mais um pouco acerca das propriedades do leito combustível. Quanto à topografia iremos reter duas propriedades básicas: o declive do terreno (traduzido pelo ângulo α de inclinação média local) e a sua concavidade.

Os factores meteorológicos revestem-se de uma importância fundamental na definição do comportamento do fogo. No seu conjunto afectam quer a inflamabilidade quer a combustibilidade do leito combustível. Fazem-no antes de mais por condicionarem o teor de humidade das partículas combustíveis; esta resulta do equilíbrio entre a partícula (viva ou morta) e o ambiente, que por sua vez é afectado pela temperatura, pela humidade relativa do ar, pelo vento, pela radiação solar e pela precipitação. A relação entre o teor de humidade dos combustíveis e os parâmetros meteorológicos pode ser realizada através de índices como os que

são proporcionados pelo sistema Canadano de indexação do perigo de incêndio (cf. Viegas et al., 2004).

O principal factor meteorológico que afecta a propagação do fogo é o vento, que se caracteriza em cada ponto e em cada instante de tempo, por um valor da velocidade e da direcção. O vento varia no espaço e no tempo em função de um grande número de parâmetros, o que torna a sua modelização uma tarefa extremamente complexa. Por convenção determina-se a velocidade e direcção do vento a dez metros de altura do solo, a fim de caracterizar as condições meteorológicas de um dado lugar. O relevo, a vegetação, a presença de obstáculos e os fenómenos de natureza térmica podem modificar o campo de ventos, pelo que a medição num dado ponto – por muita precisão que tenha – pode ser pouco representativa do que se passa noutros locais, mesmo que relativamente próximos.

Como se sabe, a velocidade do vento varia com a distância ao solo; é necessariamente nula na superfície e cresce rapidamente, até atingir um valor praticamente constante a uma altura de cerca de 300 a 900 m. Dada a rápida variação da velocidade junto ao solo, põe-se a questão de se saber qual a velocidade do vento que melhor caracterize a sua interacção com a frente de chamas. Por razões práticas Rothermel (1972) propôs que se adoptasse para este efeito a velocidade do vento a meia altura das chamas. Compreende-se que quando se pretende determinar as características de propagação do fogo, sem se conhecer a priori a altura das chamas – como é usual – persiste alguma incerteza acerca desta questão. A fim de ultrapassar este problema Viegas e Neto (1991) propuseram o emprego da tensão de atrito produzida pelo vento sobre a superfície do combustível para caracterizar esta interacção. No que se segue iremos admitir que existe uma velocidade U , característica desta interacção e que é possível determiná-la, apesar das limitações de ordem teórica e prática que foram referidas. De agora em diante utilizaremos a notação “negrito” para representar grandezas vectoriais.

Existe um quarto factor que é ignorado nos textos correntes, mas que consideramos fundamental para a descrição do comportamento do fogo. Trata-se da variável tempo, a qual intervém de uma forma explícita no comportamento de um incêndio. Como se verá adiante o comportamento do fogo é dinâmico, isto é, mesmo com condições fronteiras permanentes – não variáveis com o tempo – as características de propagação vão-se alterando ao longo do tempo.

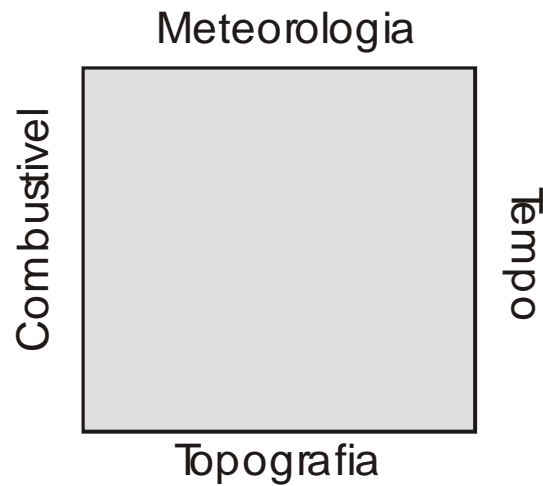


Figura 3. O quadrado do fogo.

Como se mostra na figura 3 o quadrado do fogo tem nos seus quatro lados cada um dos factores que foram descritos.

3. Comportamento Eruptivo do Fogo

3.1. Noção de comportamento eruptivo

Um fenómeno que se observa por vezes nos incêndios florestais consiste no rápido desenvolvimento de uma frente de chamas cuja velocidade de propagação aumenta subitamente. Este aumento de intensidade é acompanhado por correntes de ar muito fortes, que surpreendem os que se encontram na sua vizinhança e que têm causado muitos acidentes fatais em todo o mundo. Este fenómeno ocorre em particular em desfiladeiros ou em encostas com elevado declive e é conhecido vulgarmente por “efeito de chaminé” devido à aspiração de ar que é induzida pelo fogo, à semelhança do que ocorre numa chaminé. Na literatura inglesa este fenómeno é designado por “blow-up”, o que corresponde a uma espécie de explosão, que parece verificar-se no comportamento do fogo nestas circunstâncias. Dada a dificuldade em traduzir de uma forma simples este termo para as línguas de origem latina, como é o caso do português, proponho a designação de “erupção” para este fenómeno, dada a semelhança que apresenta, em termos qualitativos, com a erupção de um vulcão, em que também subitamente se desencadeia um processo convectivo de elevada intensidade.



Figura 4. Observação do comportamento eruptivo num incêndio florestal ocorrido próximo da Sertã a 31 de Julho de 2003.

Como se disse, o comportamento eruptivo dos incêndios florestais tem estado associado no passado a muitos acidentes fatais, quer em Portugal quer no estrangeiro. Entre os casos que se encontram documentados na literatura técnica encontram-se os de Mann Gulch, ocorrido em 1949 nos Estados Unidos da América, no qual perderam a vida 13 bombeiros (cf. Rothermel, 1993) e o de South Canyon, ocorrido em 1994, no qual faleceram 14 combatentes (cf. Butler et al. 1998). Num outro acidente, ocorrido também nos Estados Unidos, mas em 2001, em Thirtymile, morreram 4 pessoas na sequência de uma erupção de fogo (cf. Furnish et al. 2001). Infelizmente a lista é muito longa e torna-se impossível reproduzi-la aqui na sua totalidade. Também em Portugal o autor pode reportar situações similares, algumas delas envolvendo a perda de vidas. Dada a complexidade da orografia de uma boa parte do território nacional, que propicia o aparecimento deste tipo de fenómeno, o comportamento eruptivo constitui uma situação que é relativamente comum nos incêndios florestais portugueses. Na figura 4 mostra-se um exemplo recolhido num dos grandes incêndios ocorridos próximo da Sertã, no dia 31 de Julho de 2003, sendo perfeitamente visível o elevado desenvolvimento vertical da coluna de convecção que se formou de súbito na encosta em que o fogo progredia.

Apesar da importância deste fenómeno, quer em termos de comportamento do fogo quer sobretudo em termos de segurança pessoal, não se encontram na literatura muitos estudos a ele

dedicados. O autor e a sua equipa também não encontraram nos trabalhos consultados explicações físicas convincentes para o mesmo. Por essa razão têm vindo a dedicar, desde há alguns anos, uma particular atenção ao estudo deste efeito, com vista a melhorar a compreensão do mesmo e assim contribuir para uma maior segurança dos que se encontram na frente de um incêndio florestal. Com base em experiências laboratoriais, de campo e na observação de situações reais, complementadas por estudos de natureza numérica e analítica, o autor e a sua equipa desenvolveram um modelo matemático que explica e prediz o fenómeno.

Neste texto procura-se explicar, numa linguagem simples e sem entrar em formalismos matemáticos, os processos que se encontram associados à formação de uma erupção de fogo.

3.2. Modelo de Comportamento

Uma falsa ideia que se encontra enraizada em muitas pessoas é a de que para umas dadas condições de terreno, de vegetação e de vento, uma frente de fogo se propaga com uma velocidade fixa, que pode ser determinada através de modelos mais ou menos complexos. Um dos modelos mais utilizados é o de Rothermel (1972), que tem servido de base a muitos sistemas de apoio à decisão. Os estudos realizados pelo autor, no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF), mostram que não é bem assim e que para umas dadas condições do ambiente o fogo se pode propagar com velocidades muito diversas (cf. Viegas, 2004a). Observa-se que o comportamento do fogo é dinâmico, isto é, a sua velocidade de propagação varia ao longo do tempo. Na figura 5 mostra-se uma das estruturas existentes no LEIF, destinada a estudar o comportamento do fogo em desfiladeiros de configuração geométrica arbitrária (cf. Viegas e Pita, 2004). Nesta e noutras montagens semelhantes foi realizado ao longo dos passados anos um estudo sistemático deste fenómeno que permitiu desenvolver um modelo original para o explicar e prever (cf. Viegas, 2005a). As observações efectuadas em ensaios laboratoriais têm sido corroboradas em ensaios de campo na Gestosa, desde 1998 até ao presente (cf. Viegas, 2004b).



Figura 5. Estrutura para estudo laboratorial do comportamento eruptivo do fogo existente no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais.

No caso geral de fogos em encostas ou com vento, a velocidade de propagação não é fixa. Mesmo que as condições ambientais permaneçam constantes, a velocidade de propagação varia constantemente devido à convecção induzida pelo próprio fogo.

Neste artigo vamos concentrar a nossa atenção no caso de uma encosta ou de um desfiladeiro, na situação em que não existe vento.

Se um fogo se iniciar na base de uma encosta ou de um desfiladeiro, começará por ter uma forma aproximadamente circular e a propagar-se muito lentamente. Ao fim de algum tempo, a cabeça do fogo, situada na parte mais elevada do perímetro do fogo, começará a intensificar-se ao receber o calor de toda a zona do incêndio que se situa abaixo dela. Por este motivo a altura das chamas na cabeça do fogo aumentará e com ela a sua velocidade de propagação. O aumento da altura das chamas, por sua vez, induz mais vento junto da frente e produz um novo aumento de velocidade e assim por diante.

Tomando por referência a velocidade básica de propagação do fogo R_0 , quando este se propaga em terreno horizontal e na ausência de vento, a velocidade de propagação que o fogo pode atingir numa encosta ou num desfiladeiro, em caso de erupção, pode ser cerca de cem vezes

superior a R_0 . Nalguns casos estudados pelo autor este aumento de velocidade cifrou-se mesmo pelas centenas de vezes em relação àquele valor (cf. Viegas, 2005a).

O fogo pode então percorrer em poucos minutos uma extensão de terreno muito grande, com uma capacidade destruidora que é absolutamente incontrolável. Este fenómeno, que é induzido pela convecção produzida pelo fogo, como se disse, manifesta-se pela ocorrência súbita de ventos de grande intensidade e que produzem o característico roncar do incêndio, que os que combatem o fogo bem conhecem. O aparecimento deste vento intenso induz muitas pessoas a reportar a ocorrência de “ventos erráticos, vindos de todas as direcções” ou a pensar que foi uma súbita rajada de vento ou um outro qualquer fenómeno atmosférico a produzir a erupção de fogo.

Tal convicção é completamente errada: o comportamento eruptivo deriva do próprio comportamento do fogo e não requer qualquer outra contribuição externa. Se houver uma encosta coberta de combustível e se na sua base houver um foco de incêndio, o fogo irá aumentando a sua intensidade, até atingir a erupção, independentemente do que suceder à sua volta. Quanto mais inclinada for a encosta e quanto mais fino e seco for o combustível, mais depressa se atingirá a erupção. Se a encosta for pouco inclinada ou pouco extensa pode suceder que o fogo não acelere suficientemente para se atingir a erupção.

O resultado deste processo é um comportamento extremamente dinâmico do fogo, que se traduz numa variação (aumento) continuado da velocidade de propagação ao longo do tempo. Com base em estudos laboratoriais o autor desenvolveu um modelo matemático para justificar esta evolução, cujo resultado se encontra representado na figura 6.

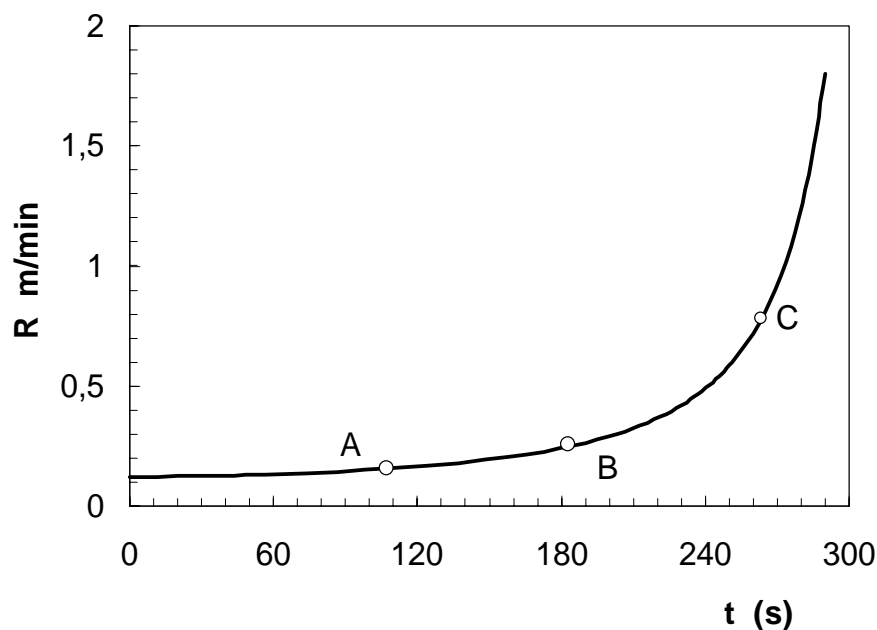


Figura 6. Previsão do crescimento da velocidade de propagação do fogo numa encosta, de acordo com o modelo de comportamento eruptivo. Esta curva refere-se a um leito de agulhas de pinheiro bravo secas com uma carga de 0,6 kg/m².

A curva que se mostra na figura 6 foi obtida a partir de ensaios laboratoriais com caruma de pinheiro bravo. Como se pode observar naquela figura, mesmo que a vegetação seja homogénea, que o declive da encosta (ou do desfiladeiro) seja constante e que não exista vento ambiente – como era o caso nos ensaios realizados – a velocidade de propagação varia, chegando a uma determinada fase em que aumenta bruscamente, podendo atingir valores extremamente elevados.

A velocidade de propagação inicial do fogo varia com o declive da encosta. Por exemplo, numa encosta com 10° de declive (18%) a velocidade inicial de propagação é a que corresponde ao ponto A no gráfico, ao passo que para declives de 20° (36%) e de 30° (58%) as velocidades iniciais são as representadas pelos pontos B e C, respectivamente. Como se pode ver nesta figura, o tempo necessário para a ocorrência da erupção é tanto menor quanto mais elevado for o declive da encosta.

No caso de uma encosta com 30° de inclinação ou em desfiladeiros muito fechados, o fogo atingirá a fase de erupção quase imediatamente após a sua ignição.

Algo de similar se passa com outros combustíveis, se bem que a escala dos tempos seja diferente de um combustível para outro. Um combustível mais pesado – como é o caso de uma

vegetação arbustiva – terá um tempo de reacção superior ao de um combustível mais ligeiro – como uma vegetação herbácea – mas o comportamento é em tudo semelhante. Enquanto a fase de erupção pode demorar cinco a dez minutos a ser atingida em vegetação herbácea, para umas dadas condições, o tempo requerido em vegetação arbustiva poderá ser de vinte a trinta minutos, para as mesmas condições.

Está ainda em curso uma investigação para estabelecer completamente estas relações para diferentes combustíveis e configurações do terreno.

3.3. Consequências práticas

O comportamento do fogo, que foi descrito acima, em especial na sua fase inicial, explica a ocorrência de muitos dos acidentes fatais associados ao fenómeno eruptivo.

Quando uma equipa de combate chega junto de um fogo nascente na base de uma encosta, ao observar o seu comportamento relativamente lento, considera a possibilidade de o circunscrever sem grande dificuldade, com os recursos disponíveis e provavelmente em pouco tempo. Atacando o fogo pela retaguarda e avançando pelos flancos, os elementos da equipa vão subindo a encosta de forma a envolver o perímetro do fogo. Nalguns casos alguns elementos da equipa deslocam-se pela encosta a fim de se situarem acima do fogo, porventura nalgum caminho ou estrada, a partir do qual possam suprimir o fogo, num ataque frontal. Se esta tarefa não tiver sido realizada com suficiente rapidez e se o fogo tiver entretanto atingido o estágio de erupção, toda esta manobra poderá conduzir a um desastre. O súbito aumento da velocidade e da intensidade de propagação, para além de poder surpreender as pessoas envolvidas, tornam qualquer esforço de ataque ao fogo inútil, uma vez que não existe capacidade física para combater frentes de chama com velocidades da ordem de 10 a 50 metros por minuto, com alturas da ordem de 10 a 20 m e com intensidades de propagação superiores a 4000 kW/m.

Por este motivo a decisão de iniciar o combate a um foco de incêndio, mesmo que pequeno, na base ou a meio de uma encosta deve ser tomada com extrema cautela.

Por alguma razão uma das regras base de segurança manda que nunca se combata o fogo – nem sequer se permaneça – numa encosta, estando acima do fogo e com vegetação de permeio.

Não havendo recursos suficientes não se deve sequer tentar o ataque ao fogo, devendo antes retirar-se e adotar qualquer outra estratégia, que não envolva fazer face ao incêndio em plena encosta. Em caso algum devem colocar-se meios humanos acima da linha do fogo enquanto este estiver activo.

O que se disse antes é aplicável mesmo para o pessoal que se encontre em pontos altos ou em cristas ou planaltos situados acima de uma encosta que se encontra a arder ou em vias de arder. Se ocorrer uma erupção, os gases quentes produzidos pelo fogo e os fluxos de radiação produzidos, quando este se aproximar, poderão pôr em perigo a vida dos que se encontrem em tal localização. Nestes casos nem sequer uma zona de segurança muito extensa – como um aceiro – poderá ser suficiente para garantir a segurança pessoal dos que ali se encontrarem. Por este motivo, se se prever a possibilidade de ocorrência de um tal fenómeno, é preferível retirar todos os meios e o pessoal dessa área, com antecedência, para não incorrer em riscos desnecessários. Nestas situações, as próprias casas poderão não constituir lugares seguros para se permanecer, ao contrário do que sucederia num caso de comportamento normal do fogo. A localização dos postos de vigia, de antenas de operadores de comunicações e de centrais eólicas em locais altos, torna estas estruturas particularmente vulneráveis a comportamentos eruptivos dos incêndios nas encostas acima das quais se localizam. No caso concreto dos postos de vigia a decisão de abandonar o posto deve ser tomada com muita antecedência, a fim de se evitar situações de elevado risco pessoal.

4. Alguns casos

4.1. *South Canyon*

Este acidente ocorreu nos Estados Unidos da América, em 6 de Julho de 1994 e dele resultaram 14 mortes. Este acidente encontra-se bem descrito em Butler et al. (1998) e em McLean (1999). A zona em que ocorreu o acidente está mostrada na figura 7. Um grupo de cerca de quarenta bombeiros combatia um flanco do incêndio que havia começado dois dias antes, devido a uma descarga eléctrica, na crista do monte, no ponto assinalado como “ignition point”. A frente vinha a descer a encosta que estava coberta com vegetação arbustiva, que ardia muito lentamente. Com o aumento da velocidade do vento, cerca das 16.00h ocorreram alguns focos secundários do flanco do incêndio para o local assinalado com uma cruz no lado esquerdo em

baixo “spot fire”. Alguns combatentes fugiram para a zona já queimada, outros permaneceram na zona designada “luch spot”, mas um grupo decidiu correr ao longo do caminho a meio da encosta, em direcção ao cimo da encosta “zero point”, mas foram sendo alcançados pelo fogo. Alguns deles ainda utilizaram as suas tendas abrigo (“fire shelter”), mas sem resultado devido á passagem das chamas com elevada intensidade pelos locais em que se encontravam.

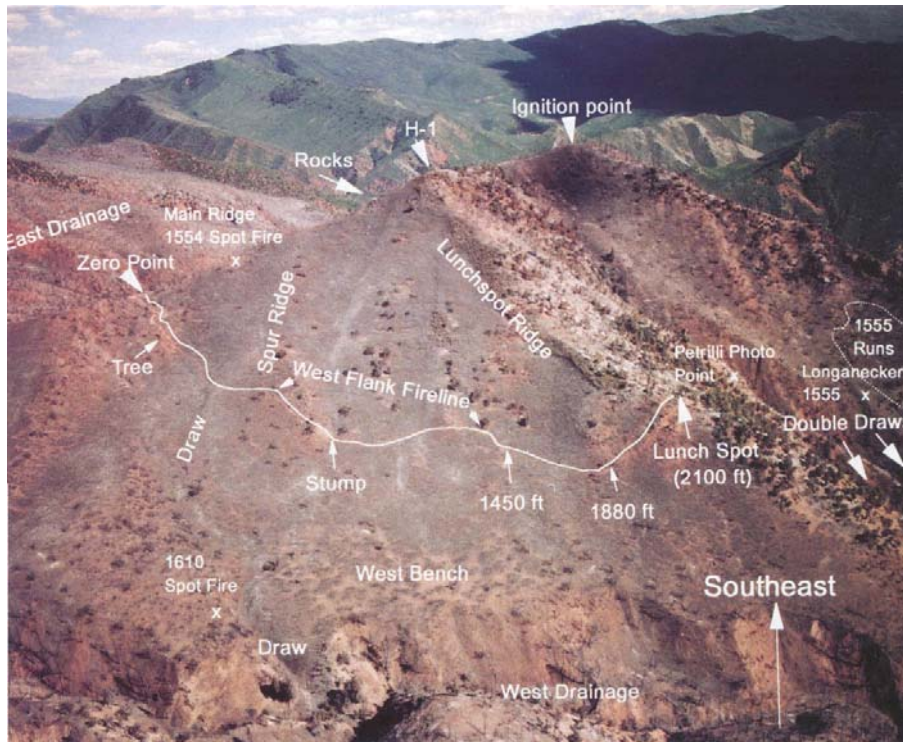


Figura 7. Vista geral da área do acidente de South Canyon, em 1994.

Os valores da velocidade de propagação do fogo foram calculados com base nos dados que se encontram no relatório e mostram-se de forma adimensional na figura 8. Nessa figura comparam-se os valores registados com os previstos pelo modelo de comportamento eruptivo, do autor, com um bom acordo. Como se pode observar a frente do incêndio chegou a atingir valores da velocidade cerca de mil vezes superiores aos que haviam sido observados na mesma vegetação, nos dias anteriores, quando o fogo descia a encosta.

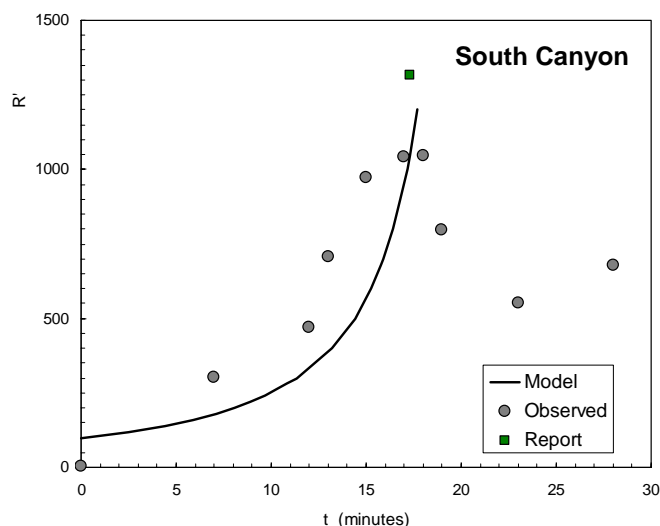


Figura 8. Valores observados e calculados da velocidade de propagação da frente principal no acidente de South Canyon. A velocidade adimensional R' é dada pelo quociente entre a velocidade de propagação e a velocidade básica de propagação. Os círculos correspondem a valores calculados pelos autores com base em Butler *et al.* (1998); o símbolo quadrado corresponde a um valor que é dado directamente naquele trabalho; a linha curva corresponde á previsão do modelo.

4.2. Freixo

Para ilustrar os conceitos expostos vamos considerar um caso concreto, que ocorreu no dia 5 de Agosto de 2003, em Freixo-de-Espada-à-Cinta, do qual resultou infelizmente a morte de um jovem casal de proprietários florestais. Na investigação dos acidentes fatais ocorridos nos incêndios do Verão de 2003, que o autor realizou (cf. Viegas, 2004c) este caso resultou ser um dos que mais dramaticamente ilustram e documentam o fenómeno eruptivo que foi descrito. Neste, como em outros casos investigados, o autor contou com o apoio das estruturas de Bombeiros locais e de outras entidades, que se aproveita para agradecer.

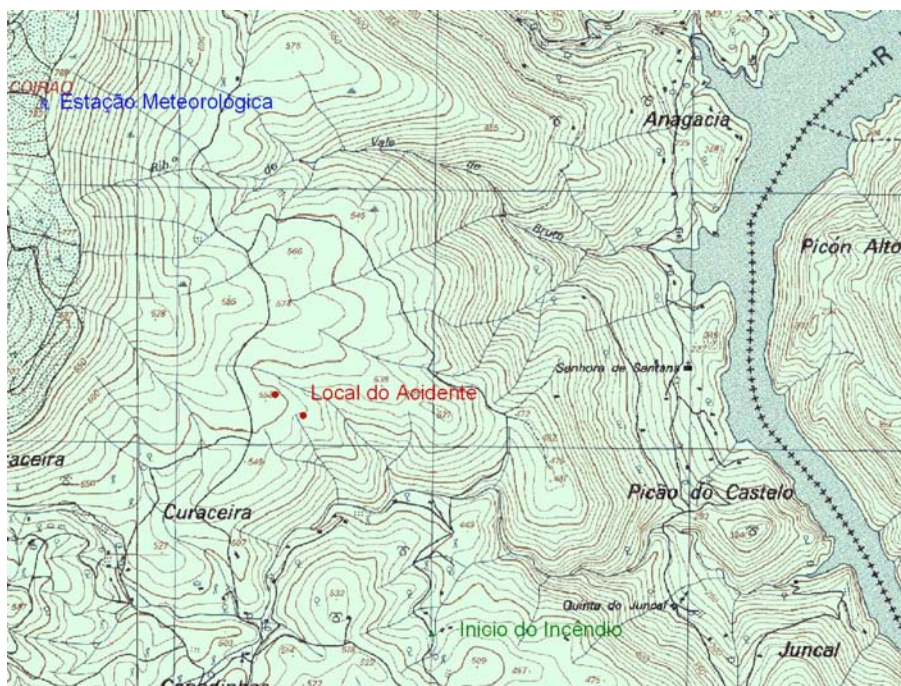


Figura 9. Mapa topográfico do Concelho de Freixo-de-Espada-à-Cinta, da zona em que ocorreu o acidente que é descrito no texto. A quadrícula do mapa tem um quilómetro de lado.

Na figura 9 mostra-se a carta topográfica da área do acidente, uma encosta situada a pouca distância de Freixo-de-Espada-à-Cinta, sobranceira ao Rio Douro, na fronteira com a Espanha. Um incêndio foi iniciado no ponto A, cerca das 14.30 horas, tendo os bombeiros de Freixo-de-Espada-à-Cinta acorrido imediatamente. Apesar das condições adversas, o incêndio foi sendo controlado e circunscrito, tendo sido levado para o fundo da encosta, em direcção ao rio.

Em determinada altura, cerca das 17.00 horas, o incêndio encontrava-se praticamente circunscrito e considerado como extinto, com excepção de uma pequena frente, com menos de 30 metros de extensão, na base do desfiladeiro, junto ao ponto B na figura 9.

O casal de proprietários viera de sua casa, para ver se o incêndio não estaria a pôr em risco um projecto de florestação que tinham naquela área, junto do ponto C.

No local em que se encontravam, a mais de 2 km de distância da frente de chamas que faltava extinguir, e sem a poderem sequer ver, devido à configuração do terreno, sentir-se-iam seguros, uma vez que o incêndio principal lhes parecia – como a todos – estar quase extinto. Por este motivo terão mesmo iniciado o retorno ao seu automóvel, que haviam deixado um pouco mais acima, para regressarem a casa.

Foi nesta altura que se deu a erupção do fogo. Em cerca de 20 minutos, o pequeno foco de incêndio que faltava extinguir na base do desfiladeiro e da encosta, transformou-se numa frente colossal, com algumas centenas de metros que literalmente varreu toda a encosta até ao cimo.

Neste trajecto colheu o casal de proprietários e só por milagre não vitimou mais algumas das dezenas de bombeiros e de civis, que ainda se encontravam nessa altura em volta do incêndio.

No alto da encosta, no ponto D, encontrava-se uma estação meteorológica automática, que foi literalmente varrida pela onda de calor produzida pelo incêndio. Na sequência de diligências realizadas, a pedido do autor, pelo Comandante dos Bombeiros Voluntários de Freixo-de-Espada-à-Cinta e por deferência da empresa proprietária dos dados, tivemos acesso aos registos da estação, que contêm a assinatura do que se passou naquela tarde naquele local, nomeadamente da erupção do fogo.

Na figura 10 reproduz-se a evolução da temperatura do ar durante o dia do acidente. Os valores indicados são as médias, de dez em dez minutos, registadas pela estação.

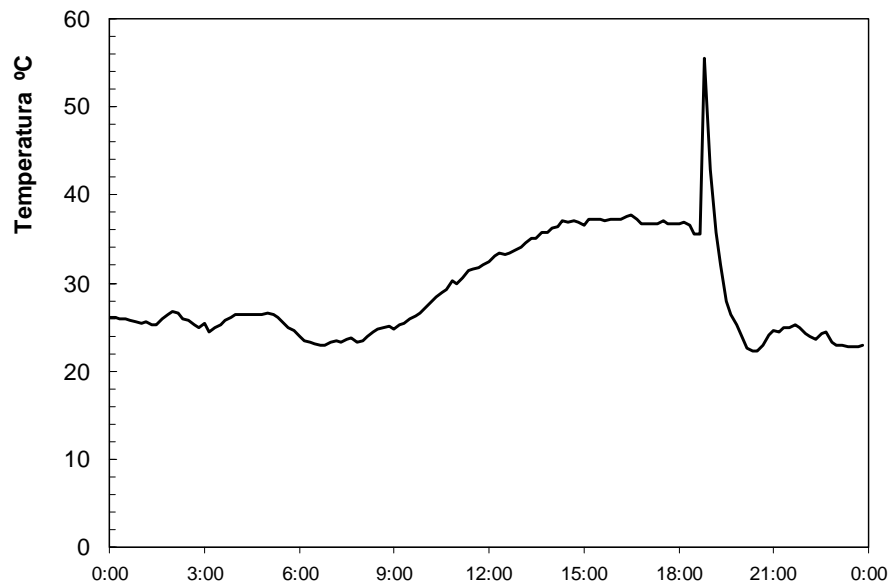


Figura 10. Valores médios da temperatura do ar registados na estação meteorológica de Freixo, no dia 5 de Agosto de 2003, podendo-se observar o súbito aumento de temperatura na altura em que ocorreu a erupção do incêndio.

Como se pode observar, pelas 18.30 horas, a temperatura do ar subiu bruscamente, em cerca de 20 minutos, até atingir o valor de 55 °C. Uma pessoa que estivesse exposta aos gases com esta temperatura média, dificilmente poderia escapar sem lesões sérias, sendo mesmo duvidosa a sua possibilidade de sobrevivência.

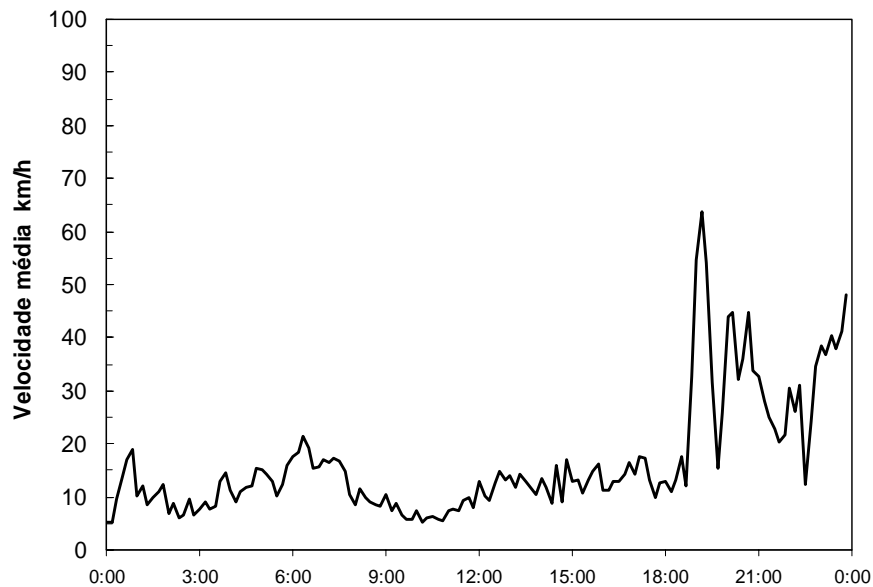


Figura 11. Valores médios da velocidade do vento, registados na estação meteorológica de Freixo, no dia 5 de Agosto de 2003, sendo igualmente visível o súbito aumento da velocidade do vento induzido pela erupção do incêndio.

Na figura 11 reproduz-se a evolução da velocidade média do vento. Como se pode ver a velocidade, que rondava naquele dia os 10 a 15 km/h, aumentou bruscamente para valores médios da ordem de 65 km/h, tendo-se registado uma velocidade máxima de 96 km/h.

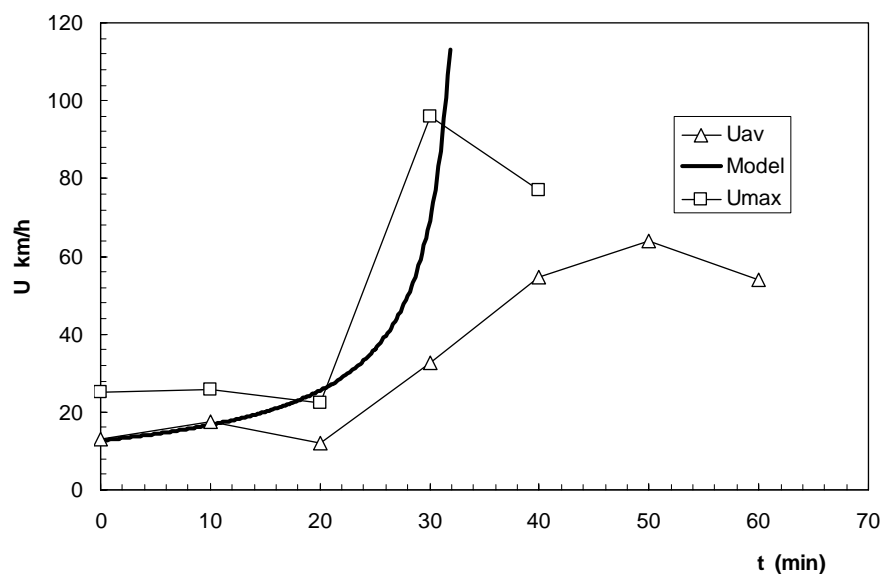


Figura 12. Comparação entre a evolução da velocidade do vento, desde o início da erupção, de acordo com o modelo proposto e os registos de velocidade média e máxima observados na estação meteorológica.

Na figura 12 mostra-se a evolução da velocidade do vento induzido pelo incêndio, de acordo com o modelo matemático proposto pelo autor, desde o início do comportamento eruptivo, em comparação com os valores registados da velocidade média e máxima do vento registados na estação meteorológica no mesmo intervalo de tempo. Como se vê, o modelo prevê adequadamente o crescimento brusco da velocidade do vento durante a erupção.

Na opinião do autor, estes dados ilustram melhor do que muitas palavras o poder do fogo e o seu potencial destruidor. Neste caso ocorreram duas vítimas mortais. Seria desejável que não mais ocorressem vítimas em acidentes como este.

4.3. Guadalajara

Infelizmente aquele desiderato não tem sido cumprido e os acidentes envolvendo o comportamento eruptivo têm-se repetido por todo o mundo, com consequências dramáticas. Um dos mais graves acidentes dos últimos anos na Europa ocorreu em Guadalajara, Espanha, no dia 17 de Julho de 2005. O autor teve a oportunidade de colaborar com colegas seus na análise deste acidente tendo as conclusões obtidas sido reportadas em Viegas et al. 2005. Apresenta-se em seguida uma síntese deste estudo.

Um incêndio foi iniciado no dia 16 de Julho na Gruta dos Casares, proximo de Riba de Saelices, por um descuido na realização de um churrasco. Particulas incandescentes que se libertaram do assador, com o vento, atingiram uma extensão de restolho muito seco que se encontrava ao lado, dando origem a um foco de incendio que ficou rapidamente fora de controle. Uma vez pegado esse foco, num ou em mais pontos quase simultaneamente, com o forte vento existente na altura, é compreensível que o mesmo se tivesse propagado muito rapidamente. Medições realizadas no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (cf. Rossa, 2005) , mostram que neste tipo de combustível se atingem facilmente velocidades da ordem de 300 a 400 m/h com velocidades do vento da ordem de 10 a 15km/h.

Uma vez que o fogo subiu a encosta e depois entrou no vale da estrada para Ciruelos del Pinar, tornou-se virtualmente impossível de combater por um ataque frontal. A extrema secura da vegetação, o vento e o acidentado do terreno tornavam difícil e perigoso o ataque directo, em especial nas frentes principais. Apesar destas condições terá sido tentado nalguns locais um ataque frontal, mas o que restava fazer seria efectivamente criar linhas de contenção, atacar nos flancos ou fazer contra-fogos, onde fosse possível e seguro.

O acidente viria a ocorrer no dia seguinte pelas 17.30h. Na figura 13 mostra-se o local em que este ocorreu. Uma Brigada composta por doze pessoas que se deslocavam em cinco viaturas, duas das quais eram auto-tanques, dirigiu-se por uma estrada no cimo da encosta para atacar um flanco do incendio, que tinha a direcção geral de SO-NE, no canto superior direito



Figura 13. Vista geral da Encosta Sul na zona do acidente.

A Brigada começou por posicionar as viaturas preparadas para sair, em caso de emergência, pelo mesmo caminho por onde haviam entrado. Poucos minutos depois de iniciarem o trabalho de combate, com os meios disponíveis nos dois auto-tanques deu-se uma erupção de fogo na encosta à sua direita, ao longo do pinhal que se vê na figura.

Perante o perigo, decidiram retirar-se nas viaturas, deixando um dos auto-tanques no local onde estava. Quando se retiravam pela estrada de acesso foram colhidos por uma segunda erupção, que ocorreu na encosta por baixo da estrada (lado esquerdo da foto), que se encontrava coberta de mato. Esta propagação deverá ter sido muito rápida e terá ocorrido logo a seguir à primeira. Note-se que a distancia a percorrer pelas viaturas da Brigada para atingir uma zona segura era de cerca de um kilometro. Tendo em conta que esta distancia pode ser feita em menos de dois minutos num carro, podemos concluir que a velocidade de propagação do fogo nesta encosta terá sido muito elevada.

Na figura 14 pode ver-se a posição em que ficaram as três viaturas. O Chefe da Brigada deslocava-se na viatura da frente e percorreu cerca de 300 metros antes de se imobilizar, certamente por perda de visibilidade, devido ao fumo. Veio a falecer a pequena distancia da viatura. O mesmo sucedeu com outro Terrano, que transportava três ocupantes, que ficou cerca de 90 metros atrás, tendo os seus ocupantes igualmente saído da viatura, mas não tiveram qualquer possibilidade de atingir um local seguro. A viatura Defender, que transportava sete membros da Brigada tomou outra direcção, para fugir da frente principal, mas viria a chocar com um pequeno muro de pedra, tendo ficado imobilizada. Dois dos seus ocupantes pereceram dentro da viatura, enquanto os outros cinco seriam colhidos pelo fogo a pequena distância da viatura.



Figura 14. Vista da localização das três viaturas que participaram na fuga. Em primeiro plano está a viatura do Chefe da Brigada. No lado direito está o outro *Terrano*, que transportava tres pessoas e no lado esquerdo está o *Defender* que levava sete pessoas.



Figura 15. Vista lateral do auto-tanque pesado. Como se pode observar, a vegetação no seu lado esquerdo era escassa. O sobrevivente Jesus Abad refugiou-se por baixo da parte traseira deste veículo.

O único sobrevivente deste acidente foi Jesus Abad, condutor do outro auto-tanque que por se ter atrasado na saída, com a sua viatura, com o fumo e o calor perdeu o controle da viatura. Quando esta se dirigia para um barranco conseguiu saltar e foi refugiar-se debaixo do

outro auto-tanque. Felizmente para ele naquela zona havia pouca vegetação, pelo que o fogo praticamente não o atingiu. Conseguiu assim salvar-se e testemunhar que vira o fogo “Vir desde lejos, a por nosotros”.

Conclusão

Entre as situações de comportamento extremo de um incêndio florestal, a erupção do fogo constitui uma das que comporta um risco potencial mais elevado. A sua ocorrência depende essencialmente da configuração do terreno e é muito pouco dependente das condições meteorológicas e até mesmo do coberto vegetal. Como se disse, basta que haja um foco de incêndio e uma extensão suficiente da encosta para que o processo eruptivo se desenvolva.

Pelo que foi exposto, com base nos estudos desenvolvidos pelo autor e pela sua equipa, pode afirmar-se que o fenómeno eruptivo é um dos mais previsíveis que se pode encontrar no âmbito do comportamento extremo de um incêndio florestal.

Ainda assim continua a acontecer que pessoas experientes e conhecedoras do fogo são surpreendidas pela sua ocorrência.

Espera-se que a presente descrição deste fenómeno e a explicação física e matemática que para ele foi encontrada possam contribuir para que não se corram riscos desnecessários no combate ao fogo e para que acidentes como os que foram mencionados neste trabalho não voltem a repetir-se.

Agradecimentos

O autor deseja manifestar o seu reconhecimento aos membros da equipa do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF) que colaboraram ao longo dos anos na realização dos ensaios laboratoriais e de campo, em particular ao Eng.º Luis P. Pita, Eng.º Luis M. Ribeiro, Eng.º Pedro Palheiro, Eng.º Carlos Rossa, Sr. Nuno Luís e ao Sr. António Cardoso.

O autor exprime o seu reconhecimento muito particular ao Comandante Mamede dos Bombeiros Voluntários de Freixo-de-Espada-à-Cinta e à empresa Quantific pelo apoio prestado no estudo o acidente ocorrido naquela localidade.

Agradece aos colegas Dr. David Caballero e Dr. Miguel G. Cruz pela colaboração prestada na análise do acidente de Guadalajara. O apoio concedido pelo Governo de Castilla-la-Mancha para a realização daquele estudo é também reconhecido.

Agradece ainda o apoio prestado ao programa de investigação que permitiu obter os resultados presentes, pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, no âmbito do projecto Winslope (contrato POCTI/34128/EME/2000), e pela Comissão Europeia, no âmbito do projecto SPREAD (contrato EVG1-CT2001-00043).

Bibliografia

- Butler, B. W.; R. A. Bartlette; L. S. Bradshaw; J. D. Cohen; P. L. Andrews; T. Putnam and R. J. Mangan (1998) Fire Behaviour Associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado.
- Furnish, J.; A. Chockie; L. Anderson; K. Connaughton; D. Dash; J. Duran; B. Graham; G. Jackson; T. Kern; R. Lasko; J. Prange; J. Pincha-Tulley and C. Withlock (2001) Thirtymile Fire Investigation. Factual Report and Management Evaluation Report. USDA, Forest Service, October 2001.
- Mc Lean, J.N. (1999) Fire on the Mountain. W. Morrow and C., Inc, New York, 275 pp.
- Rossa , C. (2005) Fire Line Rotation Model. Relatório interno ADAI.
- Rothermel, R. (1972) A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland fuels. USDA, Forest Service, Research Paper, INT-115.
- Rothermel, R. (1993) Mann Gulch Fire: A Race that couldn't be won. USDA Intermountain Research Station, General Technical Report INT-299.
- Viegas, D. X. (2004a) On the Existence of a Steady State on Fire Behaviour. *International Journal of Wildland Fire* 13(1): 101-117.
- Viegas, D. X. (2004b) Slope and Wind Effects on Fire Propagation. *International Journal of Wildland Fire*. 13(2): 143-156.
- Viegas, D. X. (2004c) Cercados pelo fogo. Editorial Minerva, Coimbra, 283 pp.
- Viegas, D. X. (2005a) A Mathematical Model for Forest Fire Blow-up. *Combustion Science and Technology*, 177:1-25.
- Viegas, D.X. (2005b) Comportamento Eruptivo de um Incêndio Florestal. Revista da Escola Nacional de Bombeiros, nº 33, pp. 19 a 25, Sintra, 2005.

- Viegas D. X. e L. P. Neto (1991) Wall Shear-Stress as a Parameter to Correlate the Rate of Spread of a Wind Induced Forest Fire. *International Journal of Wildland Fire* 1 (3): 177-188.
- Viegas, D. X.. e L. P. Pita (2004) Fire spread in canyons. *International Journal of Wildland Fire*,13(3):1-22.
- Viegas D. X., R. M. Reis, M.G. Cruz e M. T. Viegas (2004) Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio para aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*. Vol. 12, nº1, Junho 2004.
- Viegas, D. X., D. Caballero, M. G. Cruz e P. Palheiro (2005) Análisis del Incendio de Guadalajara. ADAI .