



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo da Propagação de um Incêndio Florestal num Duplo Desfiladeiro

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Nuno Marques Almeida Simões

Orientador

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Co-orientador

Jorge Rafael Nogueira Raposo

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Jorge Campos da Silva André
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Coimbra, Setembro, 2015

O único lugar onde sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

[Albert Einstein]

Agradecimentos

Com a chegada ao fim desta complexa tarefa, que apenas foi possível completar graças ao apoio e disponibilidade de algumas pessoas, às quais quero deixar o meu apreço e muita gratidão.

Em lugar de destaque, o meu obrigado ao Professor Doutor Domingos Xavier Viegas por ter aceitado ser meu orientador nesta minha dissertação de mestrado, também num elevado patamar nestes meus agradecimentos, a ADAI, pela excelente equipa que me acolheu e me deu a conhecer esta temática bastante importante que é os incêndios florestais.

Um especial agradecimento ao Jorge Raposo, investigador da ADAI, pela disponibilidade para me dar apoio nos ensaios laboratoriais, pelos ensinamentos que me transmitiu e que me permitiram uma melhor resposta no que ao tratamento de dados diz respeito, e por todo o auxílio prestado ao longo de todo o meu trabalho.

Também uma palavra de apreço para o técnico de laboratório Nuno Luís e Ricardo Oliveira, muitas vezes presentes no auxílio à realização dos ensaios experimentais, e à Ana Rosário pela preciosa ajuda na análise de resultados.

Aos meus amigos de curso, que ao longo destes seis anos de vida académica me acompanharam nos bons e maus momentos.

Por fim os meus agradecimentos mais especiais e sinceros, a toda a minha família, em particular aos meus pais por tudo o que fizeram e aguentaram para que tudo isto fosse possível de alcançar.

A todos, um muito obrigado.

Resumo

Neste trabalho foi estudada a propagação do fogo num duplo desfiladeiro, configuração esta que representa uma das situações mais perigosas no combate de incêndios florestais. O comportamento dinâmico do fogo que ocorre nesta tipologia de incêndio a propagar-se em desfiladeiros, chamado fogo eruptivo, torna fundamental o correto posicionamento dos operacionais em segurança, a fim de evitar situações de encurralamento pelo fogo, devido ao repentino avanço do fogo.

Este problema foi estudado com base em ensaios realizados numa mesa que permite a simulação de várias configurações de duplo desfiladeiro, sendo que esta ao apresentar quatro painéis distintos permite uma maior aproximação à topografia complexa encontrada em situações reais.

Nos ensaios realizados em laboratório com condições controladas, foram tidos em conta três ângulos distintos, que permitem caracterizar geometricamente a topografia que se pretende simular, sendo assim possível criar dois desfiladeiros em simultâneo, adicionando desta forma duas linhas de água secundárias através da inclinação independente dos painéis em relação à linha de água principal da mesa. Por uma questão de simplificação neste trabalho foi mantida simetria em relação à linha de água central, sendo as duas linhas de água secundárias simétricas entre si.

Com um número considerável de ensaios realizados, foi possível a análise detalhada do incremento da velocidade de propagação do fogo, tendo em conta a direção que esta toma. Por fim, foi feita a comparação de resultados para que se pudesse verificar quais as condições mais propícias à propagação do fogo e em contrário mais desfavorável ao seu combate identificando-se desta forma situações potencialmente perigosas.

Palavras-chave: Sistema de proteção coletivo, Incêndios florestais, Veículos de combate aos incêndios, Segurança em incêndios.

Abstract

In this work was studied the fire spread on a double canyon, this configuration represent one of the most dangerous situation in the fighting operations of Forest fires. The dynamic fire behavior which always occurs in this type of fire spreading in canyons makes crucial the safety positioning of operational people and means avoiding the entrapment of them due to the sudden increment of the rate of spread of the fire, characteristic of this fires so called as eruptive fires.

This problem was studied on a test rig which enables the simulation of various configurations of a double canyon. The test rig have four independent panels that allows the recreation of the complex topography found in real situations.

The experiments performed in a laboratory, with controlled conditions, were taken into account three distinguished angles that allow to set a topography with two canyons, adding to more water lines tilting independently the panels in relation to the main water line of the test rig. To simplify the problem was maintained the symmetry in relation to the central water line, and so the two additional water lines secondary are symmetrical between themselves.

With the considerable number of tests performed, it was possible a detailed analysis of the increment of the rate of spread taking in account que direction taken by the fire. Also by the comparison of the results of the experiments was possible to identify the most favorable conditions for the propagation of Fire and contrary to the successful combat identifying potentially dangerous situations.

Keywords Eruptive-fire, Canyon, Dynamic fire behaviour, Forest fires.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas	ix
1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Motivação e âmbito de estudo	10
1.2. Objetivos em estudo.....	11
1.3. Dificuldades	12
2. ESTADO DA ARTE	13
2.1. Visão Global	13
2.2. Comportamento Eruptivo	16
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	18
3.1. Componente Laboratorial	18
3.2. Descrição Geométrica.....	19
3.3. Esquemática dos Ensaios Laboratoriais.....	21
3.4. Recolha e Tratamento de dados	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Velocidade de Propagação.....	27
4.1.1. Configurações com $\alpha=0^\circ$	28
4.1.2. Configurações com $\alpha=15^\circ$	30
4.1.3. Configurações com $\alpha=30^\circ$	32
4.2. Comparação de velocidades.....	33
4.2.1. Configurações com $\alpha=0^\circ$	33
4.2.2. Configurações com $\alpha=15^\circ$	36
4.2.3. Configurações com $\alpha=30^\circ$	38
5. CONCLUSÕES	40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO A	42
ANEXO B	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Desfiladeiro de Gudalajara onde ocorreu o acidente em 2005	11
Figura 2: Mesa de testes e área de queima, formada pelos 4 painéis independentes.	19
Figura 3: Representação do ângulo β , formado entre o painel A e a mesa.	19
Figura 4: Representação do ângulo θ , formado entre o painel C e a mesa.....	20
Figura 5: Representação do ângulo α , formado entre a mesa e a horizontal.....	20
Figura 6: Ângulos γ , δ e ξ	20
Figura 7: Ponto de ignição dos ensaios.	21
Figura 8: Medidor de humidade da A&D.....	23
Figura 9: Determinação da velocidade básica de propagação, R_0	23
Figura 10: Imagens de IV do ensaio DD-DE3-01	25
Figura 11: Contornos da frente de fogo.....	25
Figura 12: Direções de propagação da frente de fogo $D1$, $D2$ e $D3$	26
Figura 13: Velocidade adimensional de propagação em função do tempo, caso $\alpha = 0$	28
Figura 14: Velocidade adimensional de propagação em função do tempo, caso $\alpha = 15$...	30
Figura 15: Velocidade adimensional de propagação em função do tempo, caso $\alpha = 30$...	32
Figura 16: Velocidades segundo $D1$, correspondentes a $\alpha=0$	34
Figura 17: Velocidades segundo $D2D3$, correspondentes a $\alpha=0$	35
Figura 18: Velocidades segundo $D1$, correspondentes a $\alpha=15$	36
Figura 19: Velocidades segundo $D2D3$, correspondentes a $\alpha=15$	37
Figura 20: Velocidades segundo $D1$, correspondentes a $\alpha=30$	38
Figura 21: Velocidades segundo $D2D3$, correspondentes a $\alpha=30$	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio Realizados	18
Tabela 2 - Dados representativos de cada ensaio.	24
Tabela 3 - Ângulos secundários.....	45

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

<i>Símbolo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Definição</i>
α	°	Ângulo entre a mesa e o chão do laboratório
β	°	Ângulo entre os painéis A,B e a mesa
θ	°	Ângulo entre os painéis C,D e a mesa
γ	°	Ângulo entre a diagonal formada pelos planos A,C e B,D e o plano horizontal da mesa
δ	°	Ângulo entre a diagonal dos planos C,D na direção de propagação $\overline{D_2D_3}$ e o plano horizontal da mesa
ξ	°	Ângulo entre a diagonal dos planos A,D na direção de propagação $\overline{D_2D_3}$ e o plano horizontal da mesa
D_1		Direção de propagação desde a ignição ao topo da mesa na vertical
D_2		Direção de propagação desde a ignição ao topo da mesa na diagonal até ao vértice superior do painel A
D_3		Direção de propagação desde a ignição ao topo da mesa na diagonal até ao vértice superior do painel A
$\overline{D_2D_3}$		Direção de propagação média entre D_2 e D_3
R'		Velocidade de propagação adimensional
R_1	cm/s	Velocidade de propagação na direção D_1
R_2	cm/s	Velocidade de propagação na direção D_2
R_3	cm/s	Velocidade de propagação na direção D_3
$\overline{R_2R_3}$	cm/s	Velocidade de propagação na direção entre D_2 e D_3
R_0	cm/s	Velocidade básica de propagação
H_{comb}	%	Humidade do combustível
HR	%	Humidade relativa do ar
T	°C	Temperatura do ar
P	kg	Peso total de caruma usado em cada ensaio

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LEIF – Laboratório de Estudos Sobre Incêndios Florestais

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e âmbito de estudo

Uma das características dos incêndios florestais é a de que evoluem ao longo do espaço e do tempo de uma maneira bastante complexa, isto devido a um grupo de fenómenos quer de natureza física, quer de natureza química, ambos dependentes de múltiplos fatores. Na base de propagação do fogo está o facto de que a reação de combustão, que o caracteriza, necessita de combustível para se alimentar, o que no caso de incêndios florestais onde o combustível é em geral limitado, o fogo terá de se propagar ao combustível adjacente, caso contrário extinguir-se-á.

É durante a fase de propagação que o comportamento do fogo condiciona de uma maneira bastante significativa todos os aspetos que se relacionam com os incêndios. Para a prevenção, redução de efeitos causados e mais importante, o combate, o comportamento do fogo é o principal fator condicionante.

Existem assim, dois tipos principais na caracterização do comportamento do fogo, o normal e o extremo.

O comportamento do fogo do tipo normal caracteriza-se por não oferecer grandes dificuldades para o seu combate pois não apresenta grandes velocidades nem variações de comportamento, são exemplos deste tipo fogos de solo e fogos de superfície.

Por outro lado o comportamento do fogo do tipo extremo é o que mais problemas causa, quer em termos de previsibilidade quer no próprio combate. Este tipo de comportamento engloba fogos de copas, focos secundários, encontros de frentes, tornados de fogo e o tipo de fogo no qual este trabalho está inserido, o comportamento eruptivo.

De todos os tipos de comportamento de fogo, o tipo eruptivo é na grande maioria das vezes o que está associado à ocorrência de vítimas. Este é caracterizado por um rápido desenvolvimento de uma frente de chamas, cuja velocidade de propagação aumenta subitamente acompanhada de correntes de ar muito fortes, surpreendendo quem se encontra na sua vizinhança e estando assim na origem de bastantes acidentes.

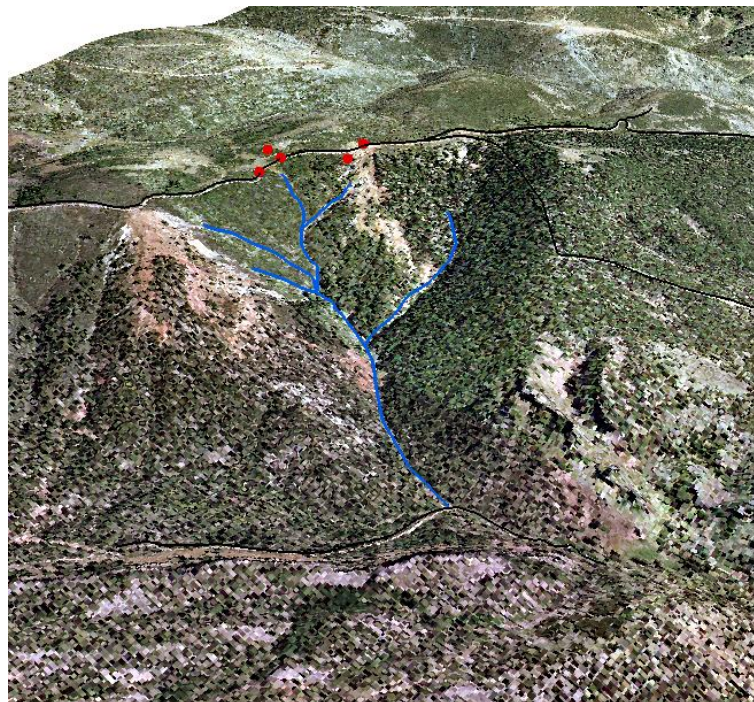


Figura 1: Desfiladeiro de Gudalajara onde ocorreu o acidente em 2005

1.2. Objetivos em estudo

Este trabalho tem como objetivo o estudo da propagação de um incêndio florestal num duplo desfiladeiro, comportamento este do tipo eruptivo. O estudo foi realizado com base em ensaios levados a cabo no laboratório do CEIF na Lousã.

Na preparação dos ensaios foram tidas em conta várias variáveis, tais como a temperatura e humidade do ar. Para o tipo de combustível a utilizar foi escolhida a caruma, sendo que antes de cada ensaio, uma pequena amostra deste combustível era colocada numa balança de determinação de teor de humidade para que pudesse depois ser calculada a massa total de combustível a ser utilizada na mesa de ensaios.

Os ensaios foram realizados numa mesa de duplo desfiladeiro (DE – 3) composta por quatro painéis independentes, acionados hidraulicamente, permitindo assim um elevado número de configurações. Por motivos de simplificação numa posterior análise de resultados, quer por uma redução no número de ensaios, foi definido que apenas se realizariam ensaios numa configuração simétrica. Também o local de ignição foi comum para todos os ensaios, o que permitiu uma mais fácil comparação entre eles.

Os principais aspetos estudados nestes ensaios foram a velocidade e a direção de propagação do fogo, para que tal fosse possível, todos os ensaios foram registados de duas maneiras diferentes, câmara de Infra Vermelhos e fotografia. Os dados registados pelas câmaras foram posteriormente analisados por software informático.

1.3. Dificuldades

Na realização deste trabalho foram várias as dificuldades a ultrapassar, sendo a maioria relacionadas com software informático.

O facto do início deste trabalho coincidir com meses de inverno, o que naturalmente significa chuva, veio condicionar os dias possíveis para a realização dos ensaios, pois com chuva não é possível a utilização do extratores de fumo existentes no laboratório. Também na obtenção do combustível aos meses de chuva tiveram um fator preponderante ao impedir a sua recolha.

Outro fator que requereu algum tempo a solucionar esteve relacionado com a câmara de Infra Vermelhos, para este tipo de registo o LEIF adquiriu uma nova câmara, permitindo assim filmar numa frequência de aquisição superior, bem como uma maior capacidade de zoom. Os problemas surgiram aquando da conceção ao computador, pois verificou-se uma incompatibilidade com o programa da anterior câmara, isto somado também aos problemas existentes no próprio computador utilizado.

A própria configuração da mesa de ensaios levantou problemas, principalmente na sua preparação antes de cada ensaio e na própria configuração possível. Devido à forma como esta foi soldada, uma face estava sempre condicionada pela posição da outra.

Todos estes aspetos contribuíram para uma redução do número de ensaios que estava inicialmente previsto.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Visão Global

Os incêndios florestais são um fenómeno, não exclusivo de uma determinada região ou país, mas sim um acontecimento recorrente por todo o mundo. Em anos mais recentes o número de ocorrências, bem como do impacto causado tem vindo a aumentar consideravelmente. Para isto, têm contribuído fatores como a desertificação, o aquecimento global, ou questões de ordenamento de território.

De modo a que a interação que existe entre o Homem e o fogo não resulte em situações que coloquem em perigo vidas e bens, é necessário ter um conhecimento vasto sobre o fogo e o seu comportamento, uma vez que muitos dos acidentes relacionados com incêndios florestais se devem a um conhecimento insuficiente sobre o fogo e o seu comportamento (Viegas D.X., 2011)

Para compreender a dinâmica de um incêndio é bastante importante conhecer e compreender os fenómenos de natureza físico-química que estão na sua origem, a combustão e a transferência de calor. Em Bryam (1959) é analisado, do ponto de vista do comportamento do fogo, o processo de combustão. Trata-se de um processo em cadeia, ocorrido a altas temperaturas, composto por três elementos: o combustível, a energia de ativação e o comburente, que na grande maioria das situações se trata de oxigénio, este conceito é apelidado de Triângulo do Fogo. A falta ou diminuição de um dos elementos é o bastante para que o processo de combustão não se realize, pois provoca uma quebra na reação em cadeia, diminuindo assim a intensidade do fogo.

A transferência de calor ocorre em três processos distintos: Convecção, Radiação e Condução. Na Convecção é necessária a existência de um fluido através do qual ocorrerá a transferência de calor, devido aos fluxos gerados pelas diferenças de densidade no fluido, devido aos gradientes de temperatura no mesmo. Para que exista transferência de calor por Radiação não é necessária a presença de um meio para que a energia calorífica passe de um corpo para o outro, uma vez que a transferência de energia se dá sob a forma de uma onda eletromagnética. Por fim, o fenómeno de transferência de calor por Condução implica a existência de um meio sólido para ser possível a transferência de calor entre corpos a temperaturas diferentes, ou num mesmo corpo com gradientes de temperatura. De uma maneira geral, estes três processos são responsáveis em

igual forma para que o incêndio se propague, sendo que, dos três, é a Condução que menor grau de importância apresenta.

Segundo o Canadian Interagency Forest Fire Centre (CIFFC, 2003), a definição do comportamento do fogo é descrita como “o modo como o combustível entra em ignição, como a chama se desenvolve e se propaga, determinado pela interação entre o combustível, o clima e a topografia”. De acordo com Beck et al.(2005), e indo ao encontro do que foi anteriormente referido, os principais fatores que influenciam o comportamento do fogo são precisamente os mesmos três, sendo por isso conhecidos como triângulo do comportamento do fogo. O tipo, quantidade, carga, distribuição e teor de humidade são propriedades do combustível, relevantes neste caso. Na envolvente meteorológica estão inseridas propriedades com a humidade relativa, a temperatura, a velocidade e direção do vento, e a quantidade de precipitação. Já no que diz respeito à topografia, o comportamento do fogo sofre alterações, sendo condicionado pela elevação do terreno, configuração, inclinação das encostas e respetiva orientação, esta última está relacionada com a exposição solar, sendo esta responsável pelo tipo de vegetação presente.

Analisando a forma de propagação do fogo e tendo em conta o tipo de combustível envolvido no processo de combustão, é possível classificar os incêndios florestais em três tipos: fogos de superfície, fogos subterrâneos e fogos de copas. Contudo, em (Viegas D.X., 2011) propõe-se uma classificação complementar a esta, separando assim o comportamento normal do extremo. Assim, no comportamento de fogo normal incluem-se os fogos subterrâneos e os fogos de superfície. Já no comportamento extremo do fogo são englobados os fogos eruptivos, fogos de copas, frentes convergentes e projeção de partículas. A estes estão associadas elevadas velocidades de propagação, bem como dificuldades nas ações de controlo direto a incêndios com este tipo de comportamento.

Os fogos subterrâneos apresentam com principal característica a ausência de chama, consumindo a camada orgânica que se encontra abaixo do nível do solo. Já os fogos de superfície (usualmente os mais frequentes nos incêndios florestais) consomem o material combustível que se encontra sobre o solo dependendo, por isso, as suas características das condições de humidade e da carga do combustível (Beck et al., 2005).

Associado a uma imagem marcante e comportamento mais impressionante, o fogo de copas, uma vez que o fogo avança sobretudo da copa de uma árvore para outra, queimando apenas a sua folhagem, podendo assim a área em contacto com o solo não ser

afetada. A sua forma de propagação e a dependência do fogo de superfície, permitiu a Van Wagner (1977) dividi-los em três tipos: passivo, ativo e independente.

A projeção de partículas, conhecida internacionalmente como *Spotting*, consiste na geração de partículas pelo fogo, no seu transporte, em combustão, por ação do vento e, por fim, na sua queda noutra leito de combustível com possível ignição do mesmo.

O estudo do comportamento do fogo baseado em ensaios experimentais teve como primórdios Curry and Fons (1938, 1940), tendo sido a partir deste que houve a intenção de produzir modelos que tivessem em conta todos os fenómenos decorrentes dos incêndios florestais. Contudo, o estudo destes fenómenos e do comportamento do fogo remonta ao início do século XX, com Hawley (1926) e Gisborne (1927, 1929) que, de uma forma mais teórica e baseados na observação, analisaram os fatores que influenciam os fogos florestais, tentando prever os seus efeitos. É nestes estudos que se encontra a base para toda a investigação realizada nas décadas seguintes, nesta área.

Um modelo pode ser descrito por um conjunto de equações cujas soluções fornecem valores numéricos correspondentes aos parâmetros que caracterizam as propriedades de propagação do fogo (Pastor *et al.*, 2003), por isto, é natural a sua utilização para prever e explicar o comportamento do fogo, funcionando também como uma ferramenta na gestão de incêndios florestais. De acordo com a definição apresentada em Sullivan (2009,a) estes modelos são classificados em três tipos distintos: físicos, semi-físicos, empíricos e semi-empíricos.

- Físicos, os que fazem uso das leis da química, da combustão, e da transferência de calor, e podem ser extrapoláveis para uma enorme variedade de situações reais.
- Semi-Físicos, os que fazem uso das leis da transferência de calor mas não têm em conta os processos químicos.
- Empíricos, usam a descrição estatística simples dos dados experimentais, sem incorporação de processos físicos.
- Semi-empíricos, os quais combinam dados físicos ou matemáticos com correlações estatísticas obtidas a partir de incêndios reais ou testados laboratorialmente para os relacionar com a velocidade de propagação.

No modelo empírico proposto por McArthur (1966) são estudados parâmetros que condicionam o comportamento do fogo, nomeadamente a sua velocidade de

propagação, em florestas de eucalipto. Os parâmetros de entrada deste modelo são as características do combustível, a velocidade do vento, o teor de humidade, o declive, a instabilidade atmosférica e o fenómeno de spotting. McArthur desenvolveu ainda o Forest Fire Danger Meter com base em resultados experimentais, um índice constituído por 5 classes de perigosidade que correspondem ao grau de dificuldade encontrado na supressão de um incêndio florestal.

2.2. Comportamento Eruptivo

Um fenómeno por vezes observado nos incêndios florestais consiste no rápido desenvolvimento de uma frente de chamas, à qual corresponde uma velocidade de propagação que aumenta subitamente. Este aumento de intensidade faz-se acompanhar por correntes de ar muito fortes, que muitas vezes ao surpreender quem se encontra por perto origina graves acidentes. Esta situação verifica-se em particular em desfiladeiros ou em encostas com elevada inclinação, devido à aspiração de ar que é induzida pelo fogo, situação semelhante à que ocorre numa chaminé, foi-lhe dado o nome de “Efeito de Chaminé”. Na literatura anglo-saxónica este fenómeno é conhecido como *blow-up*, significando uma espécie de explosão, o que para alguns parece mesmo verificar-se.

Segundo (Viegas D.X., 2011), a fim de estabelecer uma tradução para este termo, é proposta a designação de “erupção”, dada a semelhança que apresenta, em termos qualitativos, com a erupção de um vulcão, na qual também subitamente se desencadeia um processo convectivo de elevada intensidade.

Por todas estas características acima referidas, o comportamento do tipo eruptivo dos incêndios florestais tem estado associado a muitos acidentes florestais, quer em Portugal quer um pouco por todo o mundo.

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, 1983) e o de South Canyon, ocorrido em 1994, no qual faleceram 14 combatentes (Butler, 1998).

Em Portugal, dada a orografia do nosso país é muito frequente encontrar fogos deste tipo, estando este na origem dos principais acidentes com registo de vítimas mortais. Em Freixo de Espada à Cinta, a 5 de agosto de 2003, causou a morte a duas pessoas (Viegas, Cercados Pelo Fogo, 2004). Em Mortágua, no dia 28 de fevereiro de 2005,

morreram 4 bombeiros (Viegas, Cercados Pelo Fogo, 2004). Um dos mais graves em Portugal é que tem sido base de Estudos por parte do CEIF é o incêndio de Armamar, no ano de 1985, que tirou a vida a 14 bombeiros (Viegas, Cercados pelo Fogo em Armamar, 2013).

Contudo, e sendo este fenómeno de uma importância tao elevada, tanto no estudo do comportamento do fogo, quer no que à segurança das pessoas diz respeito, não se encontram muitos estudos a ele dedicados.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Componente Laboratorial

O Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF) da Universidade de Coimbra foi peça chave na elaboração deste projeto. Situado na Lousã, foi neste laboratório que os ensaios experimentais foram realizados, uma vez que se trata de uma infraestrutura com condições e ferramentas únicas a nível internacional. Estas características concedem ao LEIF um notável reconhecimento no estrangeiro na área de investigação experimental do comportamento do fogo.

Para analisar a propagação de um incêndio florestal num duplo desfiladeiro em função do declive foram realizados 15 ensaios laboratoriais, sendo que os parâmetros destes se encontram na tabela 1. Para a sua identificação foi criado um código alfanumérico que fornece as seguintes informações: a situação em estudo (Duplo Desfiladeiro – DD), a mesa onde foi realizado (Mesa de Desfiladeiro Inclinado 3) e a ordem da sua realização. Assim, como exemplo, o ensaio DD-DE3-01 refere-se a um ensaio de duplo desfiladeiro, realizado na mesa DE3 em primeiro lugar. Na tabela abaixo são apresentados os ensaios realizados no decorrer deste trabalho.

Ensaio	α [°]	β [°]	θ [°]
DD-DE3-01	0	10	0
DD-DE3-02	0	20	10
DD-DE3-03	0	30	20
DD-DE3-04	0	40	30
DD-DE3-05	15	10	0
DD-DE3-06	15	20	10
DD-DE3-07	15	30	20
DD-DE3-08	15	40	30
DD-DE3-09	30	10	0
DD-DE3-10	30	20	10
DD-DE3-11	30	30	20
DD-DE3-12	30	40	30
DD-DE3-13	0	0	0
DD-DE3-14	15	0	0
DD-DE3-15	30	0	0

Tabela 1- Ensaios Realizados

3.2. Descrição Geométrica

Uma vez que todos estes ensaios foram realizados na mesa DE3, é necessária uma descrição das características que esta apresenta. Esta mesa é formada por quatro painéis, acionados hidráulicamente, montados numa plataforma também esta acionada por hidráulico proporcionando assim três ângulos de configuração distintos. A área de queima (parte que é formada pelos 4 painéis independentes) corresponde à de um quadrado de 2,9 m de lado, o que corresponde a uma área de 8,41 m². A cada um destes painéis foi atribuída uma respetiva letra de A, B, C, e D (fig.2).

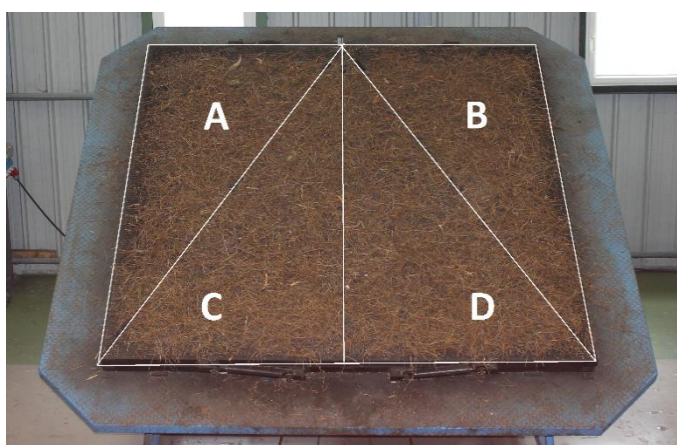


Figura 2: Mesa de testes e área de queima, formada pelos 4 painéis independentes.

Ao ângulo formado entre o painel A e a mesa foi atribuída a letra β , (fig. 3), o mesmo se verifica para o ângulo formado entre B e a mesa, uma vez que ficou estabelecido que as configurações a utilizar seriam sempre simétricas.



Figura 3: Representação do ângulo β , formado entre o painel A, e a mesa.

No caso dos painéis C e D, o ângulo por eles formado com a mesa tem a designação de θ . Para ambos, os valores variam entre 0 e 40 graus (fig.4).



Figura 4: Representação do ângulo θ , formado entre o painel C e a mesa.

A inclinação principal, neste caso entre a mesa e a horizontal corresponde à letra grega α , variando entre 0 e 30 graus (fig.5).



Figura 5: Representação do ângulo α , entre a mesa e a horizontal.

Para uma análise mais detalhada, foram tidos em conta mais três ângulos: γ , δ e ξ .

Sendo γ o ângulo entre a diagonal formada pelos planos A,C e B,D e o plano horizontal da mesa, δ o ângulo entre a diagonal dos planos C,D na direção de propagação $\overline{D_2D_3}$ e o plano horizontal da mesa e ξ o ângulo entre a diagonal dos planos A,D na direção de propagação $\overline{D_2D_3}$ e o plano horizontal da mesa figura a baixo, sendo que os seus valores se encontram na tabela 2 no anexo B.

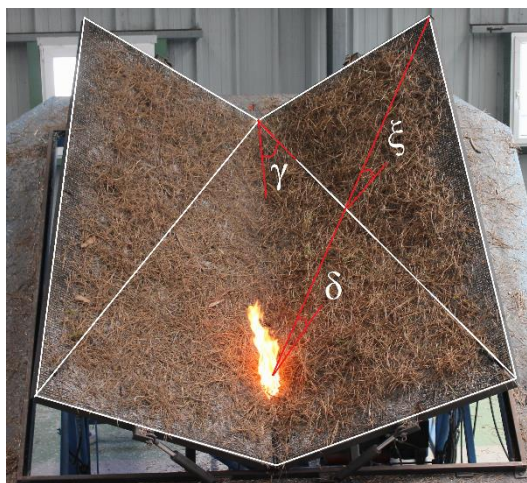


Figura 6: Ângulos γ , δ e ξ

3.3. Esquemática dos Ensaios Laboratoriais

Os ensaios realizados com a função do estudo da propagação de um incêndio florestal num duplo desfiladeiro, são preparados com a mesma carga e tipo de combustível, bem como ponto de ignição. Assim, a grande variável em causa é o declive de cada desfiladeiro.

Os ensaios podem ser divididos em três grandes grupos, sendo estes diferenciados pelo valor de α correspondente a 0, 15 e 30 graus. Deste modo, para uma melhor comparação, cada um destes grupos principais se subdivide em cinco outros grupos com β a variar de 0° a 40° e θ a variar da 0° a 30°, ambos em intervalos de 10°. Toda esta esquemática pode ser novamente vista na figura1. Para evitar uma tendência nos resultados os ensaios foram realizados com variações de declive de forma aleatória.

Com foi referido anteriormente, o ponto de ignição dos ensaios foi comum para todos. O local da ignição foi situado na linha de água principal, criada por α , com uma distancia à base da mesa de 50 cm. Para realizar a ignição foram utilizadas bolas de algodão embebidas em gasolina, (fig.7).

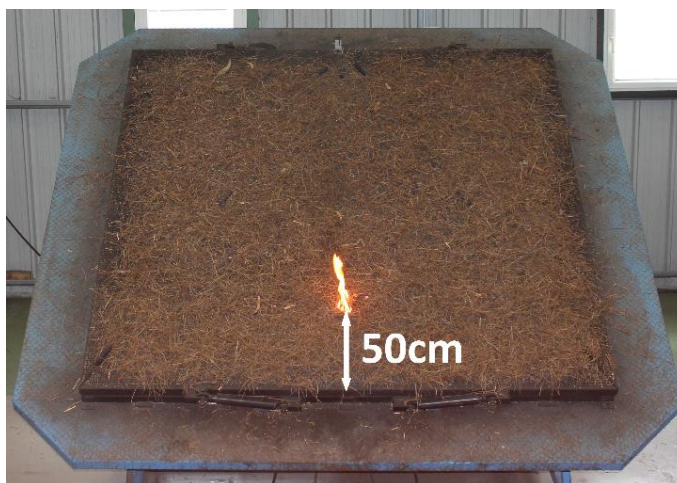


Figura 7: Ponto de ignição dos ensaios.

Antes de se iniciar cada ensaio foram registados os valores de humidade relativa do ar e temperatura que se verificavam no laboratório, valores apresentados na Tabela2.

Entre cada ensaio era dado um intervalo de tempo, para o arrefecimento da mesa, de acordo com o protocolo (Rossa, 2009).

O tipo de combustível utilizado é caracterizado como sendo do tipo fino morto, neste particular caruma (*pinnus pinaster*). A fim de uniformizar todos os ensaios, a carga de combustível foi mantida constante, situando-se no valor de 0,6 kg/m² em base seca, uma vez que este valor se aproxima com o observado na natureza.

À semelhança de todos os outros ensaios levados a cabo no LEIF, também estes foram preparados de acordo com o protocolo proposto (Rossa, 2009).

Diretamente dependentes das condições existentes no interior do laboratório à hora de início da realização de cada ensaio estão características como a temperatura e humidade relativa do ar, assim como forma de solucionar qualquer entrave proveniente destes parâmetros, houve o cuidado de os monitorizar antes e durante a realização dos ensaios. Em contrário, condições como carga de combustível, em particular na sua densidade e homogeneidade, foram controladas a fim de se poder assumir que se mantinham constantes durante todo o procedimento.

Para calcular o peso de combustível a utilizar para cada ensaio, foram tidos em conta três parâmetros: área da mesa, carga de combustível e teor de humidade. Sendo que os dois primeiros se mantem constantes é o teor de humidade que necessita de monitorização antes de cada ensaio.

Para a medição do teor de humidade foi utilizada uma balança de determinação de teor de humidade (fig.8), na qual o combustível era seco a 105°C durante dez minutos. O valor lido na balança foi inserido numa folha de cálculo Excel, juntamente com os restantes dados respetivos à área e carga de combustível, e assim foi obtido o valor do peso exato a utilizar. Depois de pesado o combustível, este foi cuidadosamente e de forma homogénea distribuído sobre a mesa de ensaios, a fim de evitar excessos ou algumas partes em falta. Também impurezas ou outro tipo de combustível que pudessem estar colocados no leito foram retirados. No caso de pausas prolongadas entre ensaios, quase sempre relativas ao período para almoço, o teor de humidade era novamente calculado.

Parâmetro bastante importante, a velocidade básica de propagação da frente de fogo, ou R_0 , foi calculada sempre que o teor de humidade se alterava, pelo que se efetuavam em média duas medições por dia.



Figura 8: Medidor de humidade da A&D.

Para o cálculo de R_0 foi utilizada numa mesa própria com a forma de um quadrado com um metro de lado, onde foram colocados fios de algodão separados por uma distância de 10cm. A mesa era formada por um total de 8 fios, sendo que o procedimento consistia em incendiar uma das extremidades e cronometrar o tempo que o fogo demorava entre cada fio até atingir outra ponta (fig.9). A velocidade de propagação foi posteriormente determinada recorrendo a uma folha de cálculo EXCEL, com os valores cronometrados em função da distância utilizando a função DECLIVE. Este foi o método utilizado devido à sua simplicidade e rapidez, o valores de R_0 respetivos a cada ensaio encontram-se na Tabela2 .



Figura 9:Determinação da velocidade básica de propagação, R_0 .

É ainda de salientar que em todos os ensaios foram usados equipamentos de proteção individual, conforme protocolo (Rossa, 2009).

3.4. Recolha e Tratamento de dados

Em relação aos processos utilizados na recolha de dados referentes a cada ensaio, foram utilizados dois tipos de captação, câmara de infravermelhos e câmara fotográfica. Para a utilização dos aparelhos foi utilizada uma plataforma extensível que se encontra no laboratório, a fim de se conseguir filmar toda a mesa de ensaio, pois as diferentes configurações não permitiam que as imagens fossem recolhidas ao nível do solo.

Dos dois métodos utilizados, o recurso à câmara de infravermelhos foi o mais revelante para este estudo, pois permitiu a elaboração de fotogramas mostrando de maneira sequenciada a evolução da frente de fogo ao longo da mesa de ensaios. Os restantes dados de cada ensaio como a temperatura do ar, humidade relativa, humidade do combustível, peso e valores dos ângulos foram tabelados.

Tabela 2 - Dados representativos de cada ensaio.

Ensaio	α [°]	β [°]	θ [°]	T [°C]	HR [%]	Hcomb [%]	Peso [Kg]	R0 [cm/s]
DD-DE3-01	0	10	0	36,9	20,0	9,70	5,59	0,16
DD-DE3-02	0	20	10	34,9	28,0	10,50	5,64	0,12
DD-DE3-03	0	30	20	33,8	30,0	10,50	5,64	0,12
DD-DE3-04	0	40	30	30,9	35,0	10,60	5,64	0,09
DD-DE3-05	15	10	0	22,8	62,0	12,00	5,73	0,10
DD-DE3-06	15	20	10	29,5	37,0	10,70	5,65	0,06
DD-DE3-07	15	30	20	27,9	39,0	10,60	5,64	0,09
DD-DE3-08	15	40	30	26,0	43,0	10,60	5,64	0,09
DD-DE3-09	30	10	0	26,5	42,0	10,70	5,65	0,06
DD-DE3-10	30	20	10	24,4	50,0	10,80	5,66	0,12
DD-DE3-11	30	30	20	34,8	28,0	10,50	5,64	0,12
DD-DE3-12	30	40	30	33,5	30,0	9,00	5,55	0,10
DD-DE3-13	0	0	0	33,5	29,0	10,00	5,61	0,14
DD-DE3-14	15	0	0	36,1	26,0	10,00	5,61	0,14
DD-DE3-15	30	0	0	22,7	45,0	10,40	5,63	0,11

Para o tratamento de dados foram utilizados três programas, ThermaCAMTM, Researcher, Microstation e Excel 2013.

O ThermaCAMTM é o programa utilizado para a leitura dos vídeos captados pela câmara de infravermelhos, permitindo assim a captura de imagens de infravermelhos em intervalos de tempo correspondentes a 10% do tempo total do ensaio. Por exemplo, na Figura 10 estão representadas imagens do ensaio DD-DE3-01.

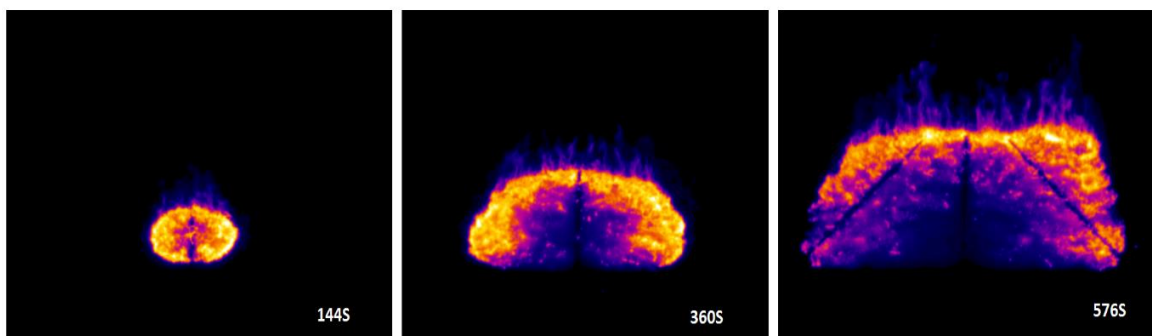


Figura 10: Imagens de IV do ensaio DD-DE3-01

Estas imagens foram depois utilizadas no programa Microstation, sendo sobrepostas de maneira a criar uma nova figura que retém os contornos da frente de fogo nos intervalos de tempo estipulados, como podem ser visível na Figura 11, referente ao ensaio utilizado como exemplo no parágrafo anterior.

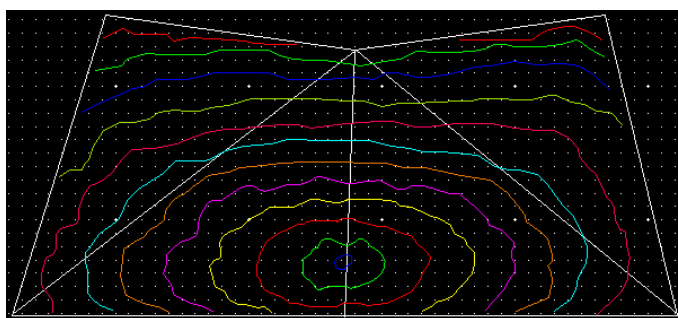


Figura 11: Contornos da frente de fogo.

Com estas imagens foi então possível o estudo das velocidades de propagação das chamas.

Nestes ensaios foram analisadas velocidades correspondentes a três direções de propagação da frente de fogo D_1 , D_2 e D_3 , a estas velocidades foram atribuídos os nomes de R_1 , R_2 e R_3 , (fig.12). Estes valores foram obtidos a partir da medição das distâncias entre

linhas de avanço do fogo consecutivas, em função do tempo, aplicando a fórmula, $R = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Para ser obtido um valor adimensional de velocidade de propagação R' , dividiu-se R por R_0 , obtendo-se assim aquilo que se designa por velocidade básica de propagação e que permite a comparação entre ensaios. As diferentes direções de análise podem ser observadas na figura a baixo.

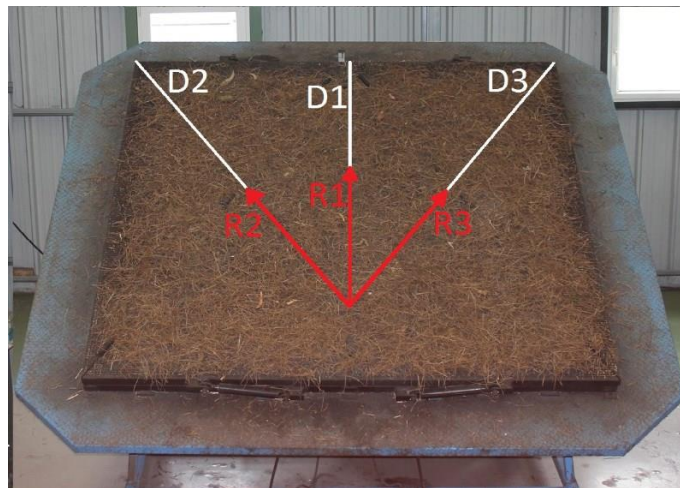


Figura 12: Direções de propagação da frente de fogo D_1 , D_2 e D_3 .

Uma vez que a mesa apresenta simetrias para todas as configurações, optou-se por uma combinação entre as velocidades R_2 e R_3 , assim para todos os ensaios foram apenas tidas em consideração as seguintes velocidades:

$$D_1 = R_1$$
$$\overline{D_2 D_3} = \overline{R_2 R_3}$$

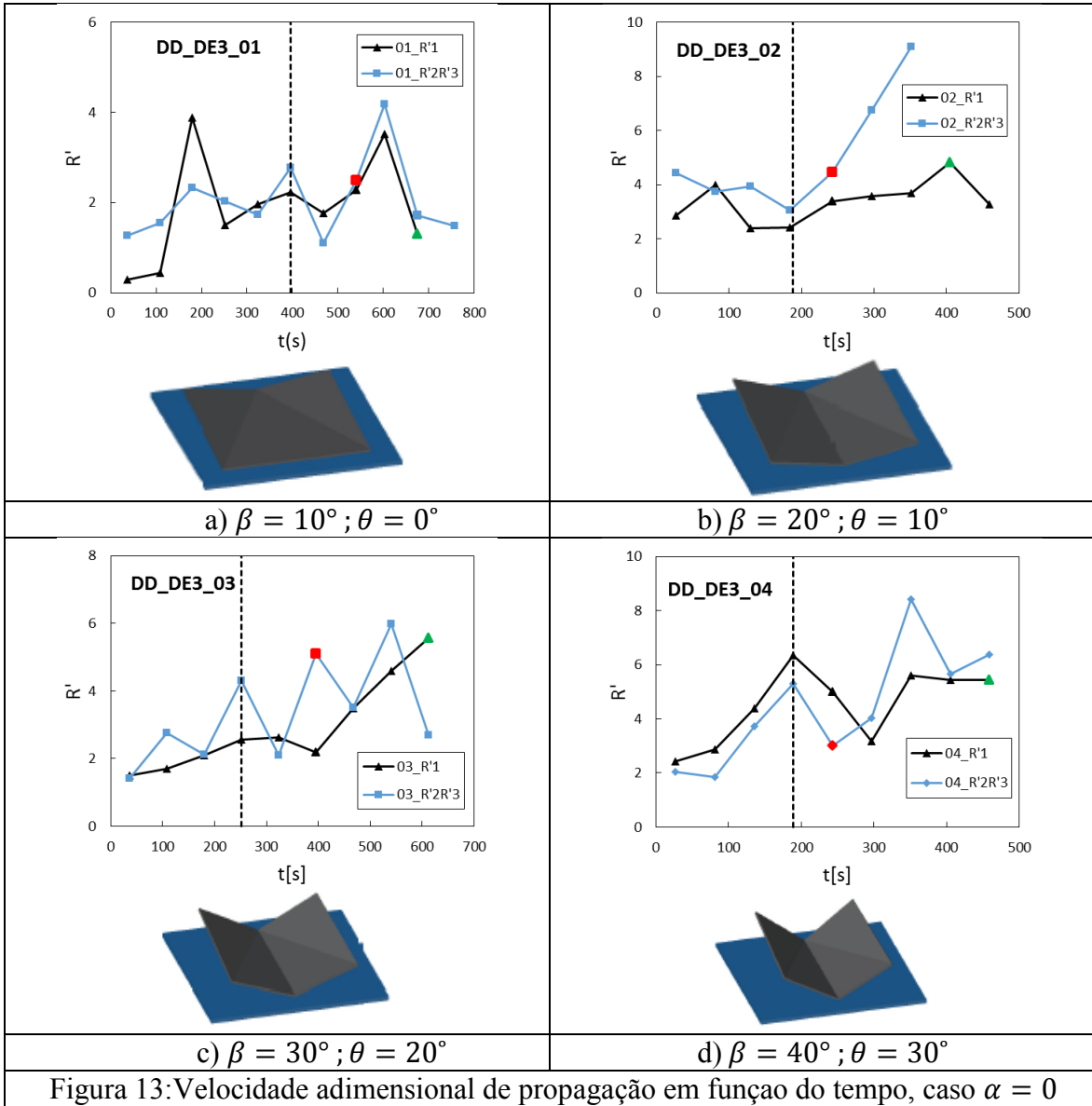
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Velocidade de Propagação

De acordo com as configurações definidas no capítulo anterior, foram elaborados gráficos com as variações da velocidade adimensional de propagação em função do tempo, para ensaios representativos do conjunto de geometrias testadas. Para uma melhor análise, estes foram agrupados consoante o valor de α . Assim em todos os gráficos estão assinalados três momentos fulcrais, a linha a tracejado corresponde ao momento em que o fogo transita de painel, ou seja, para um declive maior. Os pontos com maior relevo assinalam o instante de contacto das chamas com as extremidades da mesa, sendo que o vermelho corresponde à extremidade lateral e o verde à superior.

4.1.1. Configurações com $\alpha=0^\circ$

O primeiro conjunto representado na Figura 13, corresponde a situação de $\alpha = 0^\circ$.



Iniciando a análise pela Figura 13 a), observa-se que inicialmente ocorre um pico de velocidade segundo a linha de água central, correspondente à direção D_1 , na ordem de $R' = 4$, sendo seguido pelo incremento da velocidade segundo a direção $\overline{D_2D_3}$, atingindo um máximo quando o fogo passa para o maior declive reduzindo depois a velocidade para perto de $R' = 1$, neste ensaios as duas velocidades atingem os seu valores

máximos perto de 4 depois do fogo atingir a extremidade lateral da mesa, desacelerando em seguida.

Na Figura 13 b) é bastante marcante o aumento de velocidade na direção $\overline{D_2D_3}$ causado pela mudança de painel para um declive mais elevado, na direção D_1 apenas um pequeno pico aquando do início, acelerando depois de maneira constante até o fogo atingir o limite superior da plataforma.

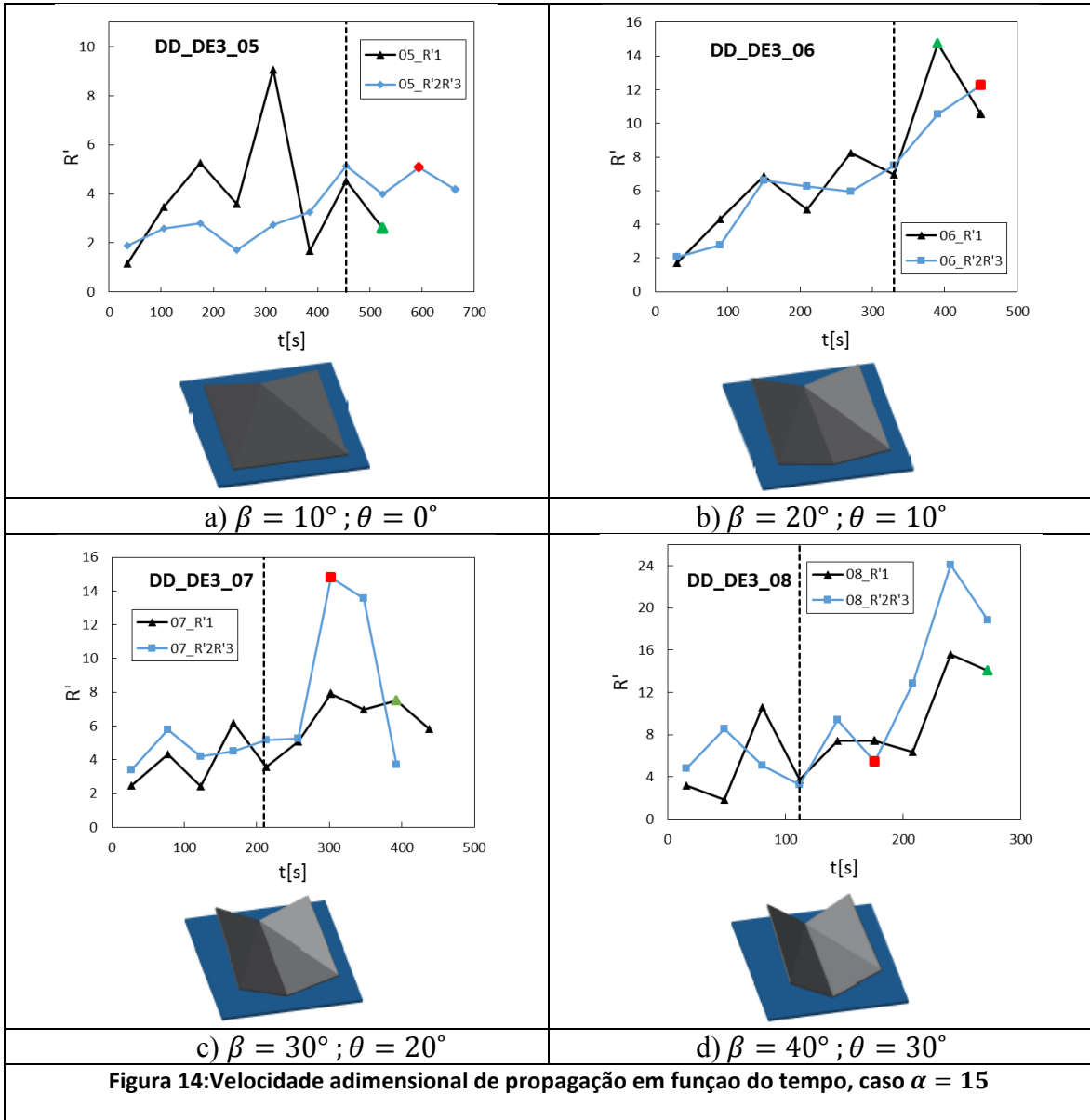
Passando agora para a figura seguinte, Figura 13 c) é de notar, na direção D_1 uma velocidade com ligeira aceleração, reduzindo depois da mudança de painel e aumentando rapidamente a partir do momento em que o fogo atinge a extremidade lateral da mesa, concentrando-se assim apenas numa direção.

Por fim no último gráfico, Figura 13d) as duas velocidades apresentam um comportamento bastante semelhante, com máximos na mudança de declive e uma grande aceleração depois de atingida a extremidade lateral da mesa.

Apos a análise dos quatro gráficos, nas Figura 13 b e c) é possível observar o comportamento eruptivo do fogo, no qual a velocidade de propagação da cabeça do fogo aumenta repentina e continuamente quando o desfiladeiro é muito fechado ou o declive é muito grande.

4.1.2. Configurações com $\alpha=15^\circ$

O segundo conjunto de gráficos representados na figura a baixo corresponde agora à situação de $\alpha = 15^\circ$.



Partindo do gráfico inicial representado na Figura 14 a), é de notar uma grande diferença entre as velocidades em estudo, enquanto a variante segundo D_1 apresenta uma variação bastante reduzida mantendo-se quase constante até ao contacto com a extremidade da mesa, na velocidade segundo $\overline{D_2 D_3}$, verifica-se uma elevada aceleração até

à mudança de painéis, tendo um máximo perto de 5, valor igual ao obtido aquando do contacto com a lateral da mesa.

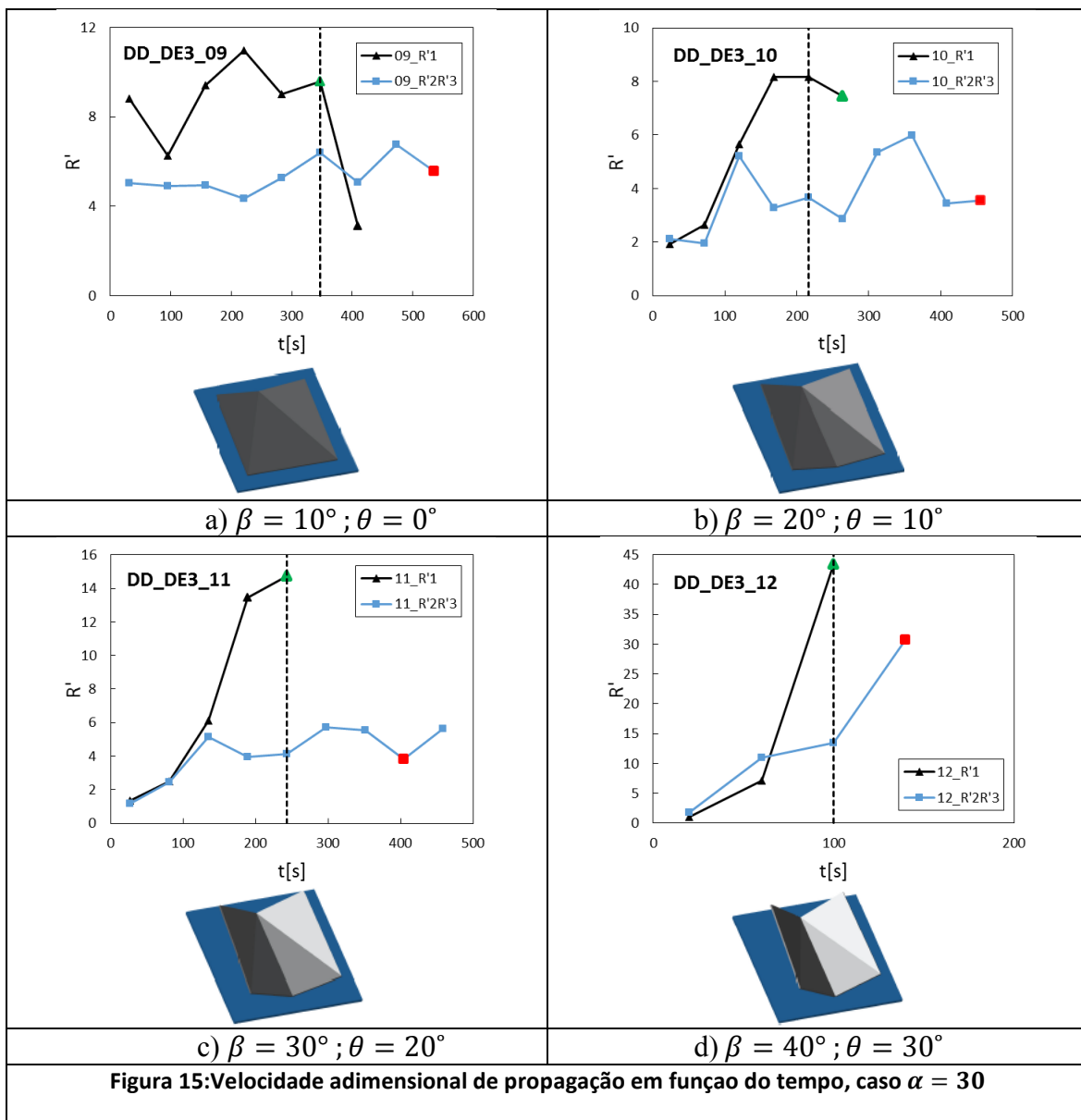
Na situação seguinte, Figura 14 b), as velocidades apresentam um comportamento muito semelhante, apresentando um máximo perto de 14 para D_1 e 12 para $\overline{D_2D_3}$, sendo que em ambos os casos, estes máximos se verificam quando o fogo atinge as extremidades da mesa.

Para o caso representado em c), verifica-se num instante inicial muita semelhança, até á mudança de declive, onde aqui a velocidade que segue a direção $\overline{D_2D_3}$, tem um avanço repentino atingindo um máximo de cerca de 15 aquando do contacto com a lateral da mesa, reduzindo depois a velocidade até ao final do ensaio.

No último caso, correspondente a maior inclinação nos painéis, retratado em d), é de notar que se passa o oposto do verificado em c), ou seja, ligeira aceleração inicial para as duas até à transição de declive onde se encontra um mínimo comum. Seguidamente nova aceleração, sendo que a partir daqui se nota a maior diferença entre elas, na direção D_1 esta aceleração tem valores constantes para depois apresentar um aumento até final, na direção $\overline{D_2D_3}$, a aceleração é apenas momentânea, pois verifica-se um mínimo bastante significativo correspondente ao momento de contacto com a lateral da mesa, contrariado depois por uma grande aceleração para o máximo do ensaio de 24.

4.1.3. Configurações com $\alpha=30^\circ$

Por fim, na figura abaixo encontram-se representados os gráficos que correspondem à situação de $\alpha = 30^\circ$.



Iniciando na fase de declive menos acentuado representado na Figura 15 a), é de notar uma regularidade segundo a direção $\overline{D_2D_3}$, apenas com uma ligeira elevação aquando da mudança de declive, contrariamente segundo D_1 verifica-se um grande pico inicial, sendo depois contraposto pelo mínimo registado nesta situação, a partir daqui volta a aumentar, estagnando perto do instante do contacto com a parte superior da mesa.

A análise dos casos representados em b) e c) podem ser descritos em simultâneo devido à sua semelhança. Nestes casos é notável a elevada aceleração inicial verificada na direção D_1 , estagnando instantes antes da mudança de declive, mas é importante referir que o valor máximo registado no ensaio com mais declive, neste caso o representado em c), corresponde ao dobro da velocidade do representado em b). Na análise da variação segundo $\overline{D_2 D_3}$, apesar de declives diferentes os valores registados são muito semelhantes, com máximo perto de 6. Regista-se uma parte inicial com aumento significativo, estagnando aquando da mudança de declive para depois registar um comportamento igual ao inicial.

Por fim o gráfico presente em d), de notar mais uma vez uma grande semelhança entre as duas direções em causa, neste caso em ambas se verifica uma situação de aceleração constante desde a parte inicial até ao momento do contacto do fogo com as extremidades da mesa.

Em conclusão verifica-se que em b), c) e d) a componente da velocidade segundo D_1 apresenta comportamento do tipo eruptivo.

4.2. Comparação de velocidades

De forma a uma melhor análise do comportamento do fogo em cada ensaio, decidiu-se criar dois gráficos, respetivos a cada uma das direções em estudo. Para todos os gráficos foi escolhida a mesma configuração e esquema de cores, assim, aos pontos que se destacam a cor preta dizem respeito ao momento em que o fogo entra no painel seguinte, ou seja, para um declive maior e os pontos a laranja correspondem ao instante em que as chamas atingem a extremidade lateral da mesa.

4.2.1. Configurações com $\alpha=0^\circ$

Neste ponto serão analisados os casos correspondentes a $\alpha = 0$ para as velocidades correspondentes às duas direções em estudo.

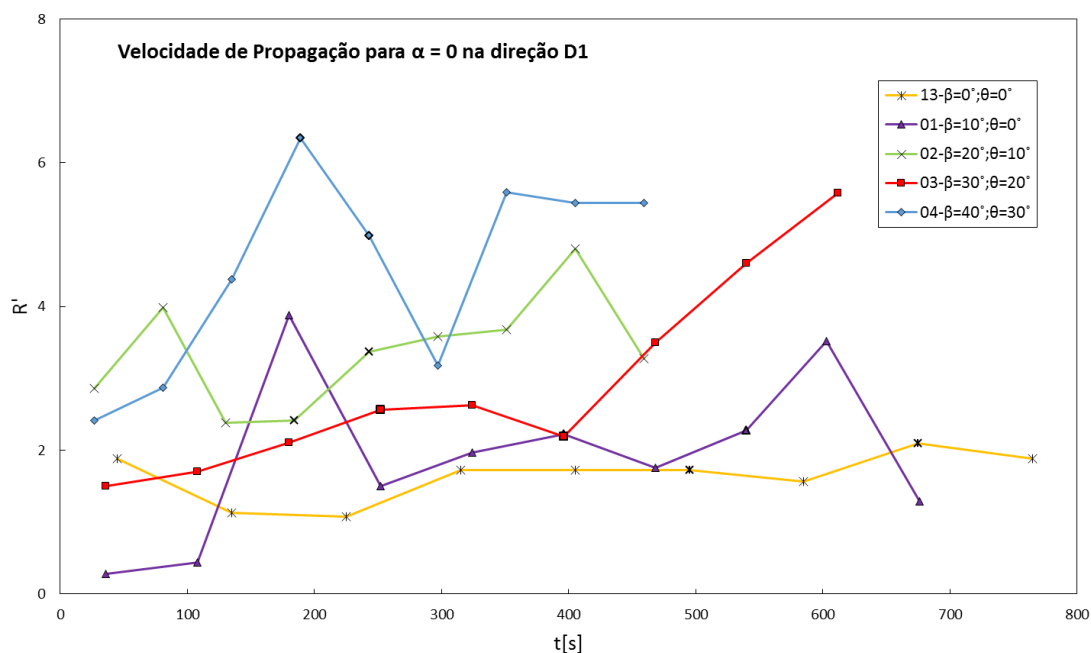


Figura 16: Velocidades segundo D1, correspondentes a $\alpha=0$

Da observação do gráfico acima, destaca-se que, à exceção do ensaio 13, todos apresentam um pico de aceleração inicial, sendo de notar que este valor é mais elevado para o ensaio que apresenta maiores valores de inclinação. Este ensaio, em conjunto com o 3, contrariamente aos restantes apresentam um máximo aquando da mudança de declive, sendo que nos outros casos se verifica uma situação contrária. Destes casos, apenas o ensaio 3 apresenta um comportamento do tipo eruptivo, correspondente à sua elevada aceleração ao entrar num declive mais elevado.

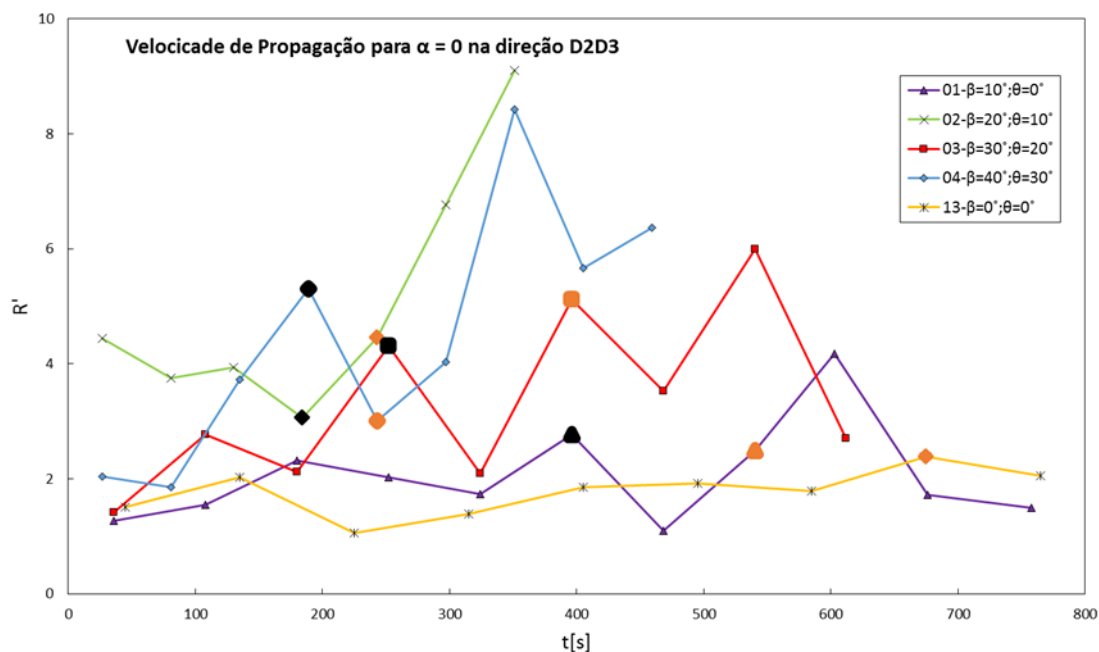


Figura 17: Velocidades segundo D2D3, correspondentes a $\alpha=0$.

Nos casos representados acima, de notar que os ensaios 1, 3 e 4 apresentam um comportamento em tudo semelhante, ambos com valores de velocidade oscilatórios mas com um aumento ao longo do ensaio. Também nestes ensaios entre a transição de declive e contacto com a extremidade lateral se nota uma redução acentuada de velocidade. Em total oposto, o ensaio 2, apesar de não apresentar os valores mais elevados este apresenta um tipo de comportamento correspondente ao tipo de comportamento eruptivo, com uma grande aceleração após a mudança para um declive superior.

4.2.2. Configurações com $\alpha=15^\circ$

Neste ponto serão analisados os casos correspondentes a $\alpha = 15^\circ$ para as velocidades correspondentes às duas direções em estudo.

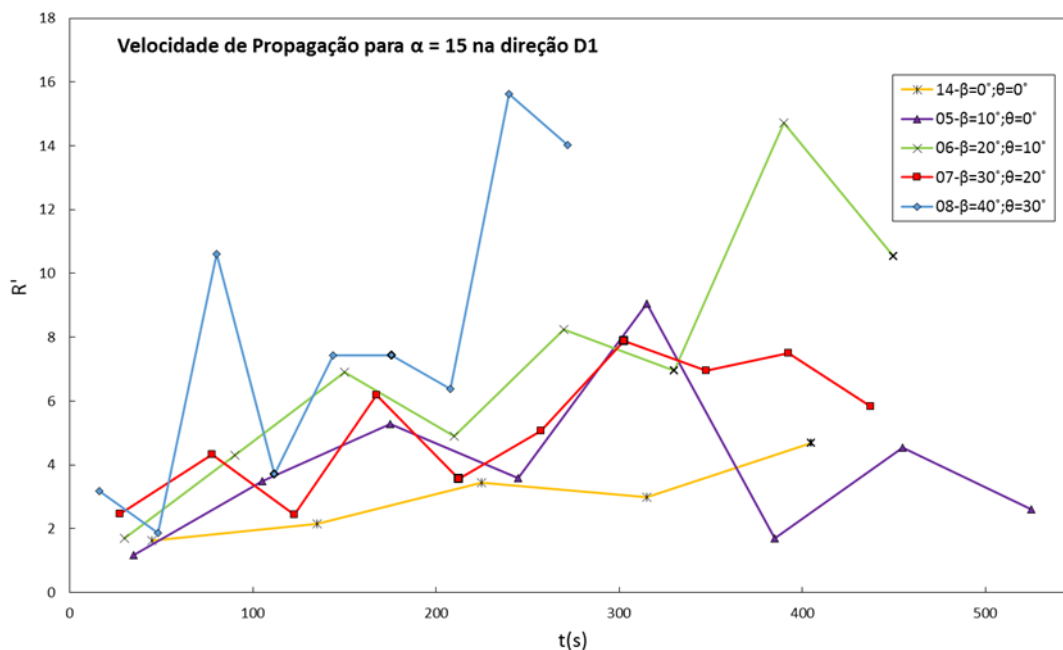


Figura 18: Velocidades segundo D1, correspondentes a $\alpha=15^\circ$.

Analisando a figura acima, salta à vista o ensaio 5 pois este ensaio apesar de corresponder a valores de declives superiores ao ensaio 14, que corresponde à mesa sem inclinação, apresenta valores de velocidade bastante reduzidos. Os restantes três ensaios apresentam semelhante comportamento com valores de velocidade superior após a transição para um declive superior.

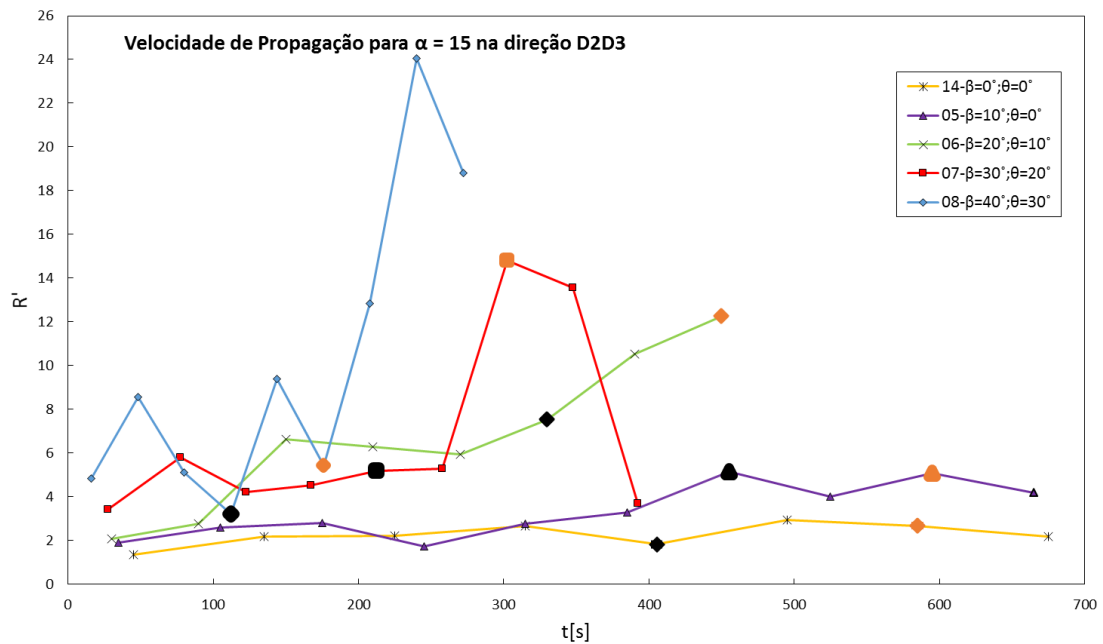


Figura 19: Velocidades segundo D2D3, correspondentes a $\alpha=15$.

Do gráfico acima, de notar uma grande semelhança entre os dois ensaios com menor declive e ensaio base correspondente à mesa sem inclinações. Os ensaios com maior declive apresentam valores opostos, em particular após o contacto do fogo com a extremidade lateral, sendo que no caso com maior declive a velocidade aumenta bastante considerável para um máximo superior ao registado nos outros ensaios.

4.2.3 Configurações com $\alpha=30^\circ$

Neste ponto serão analisados os casos correspondentes a $\alpha = 30^\circ$ para as velocidades correspondentes às duas direções em estudo.

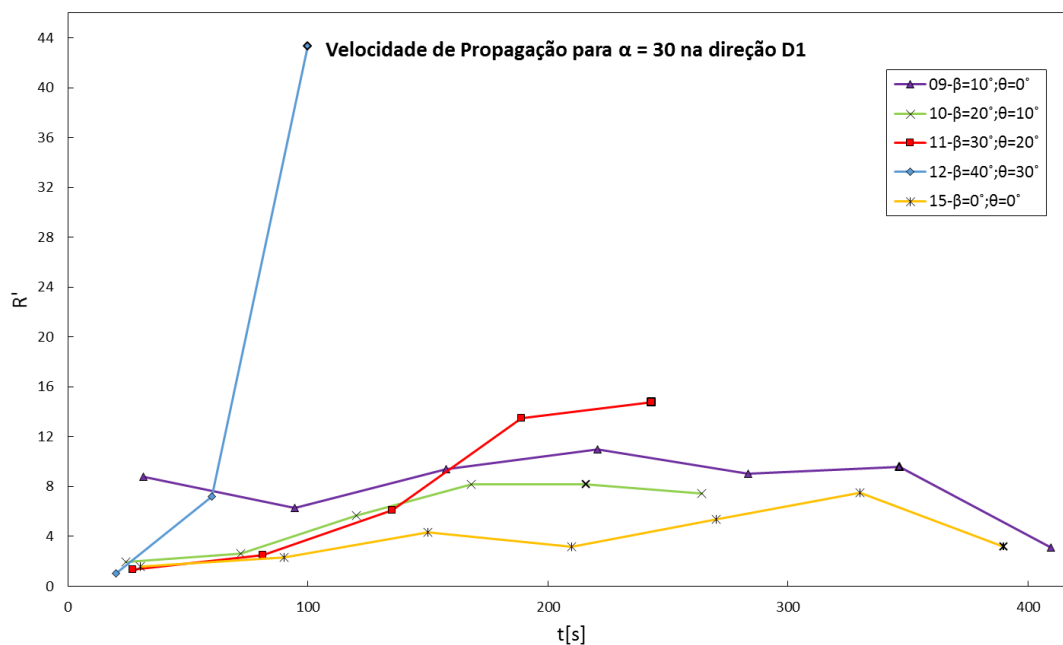


Figura 20: Velocidades segundo D1, correspondentes a $\alpha=30$.

Neste último gráfico relativo às velocidades segundo a direção D_1 , é destacável uma enorme diferença entre o máximo registado no ensaio que corresponde aos maiores valores de inclinação de todos os realizados, é o perfeito exemplo do comportamento do tipo eruptivo. Nos restantes casos apenas uma ligeira diferença para o caso do ensaio 9, pois este apresenta elevada aceleração inicial para depois reduzir drasticamente, quase que estagnando, para depois voltar a aumentar, ao contrário dos restantes que apresentam uma aceleração contínua.

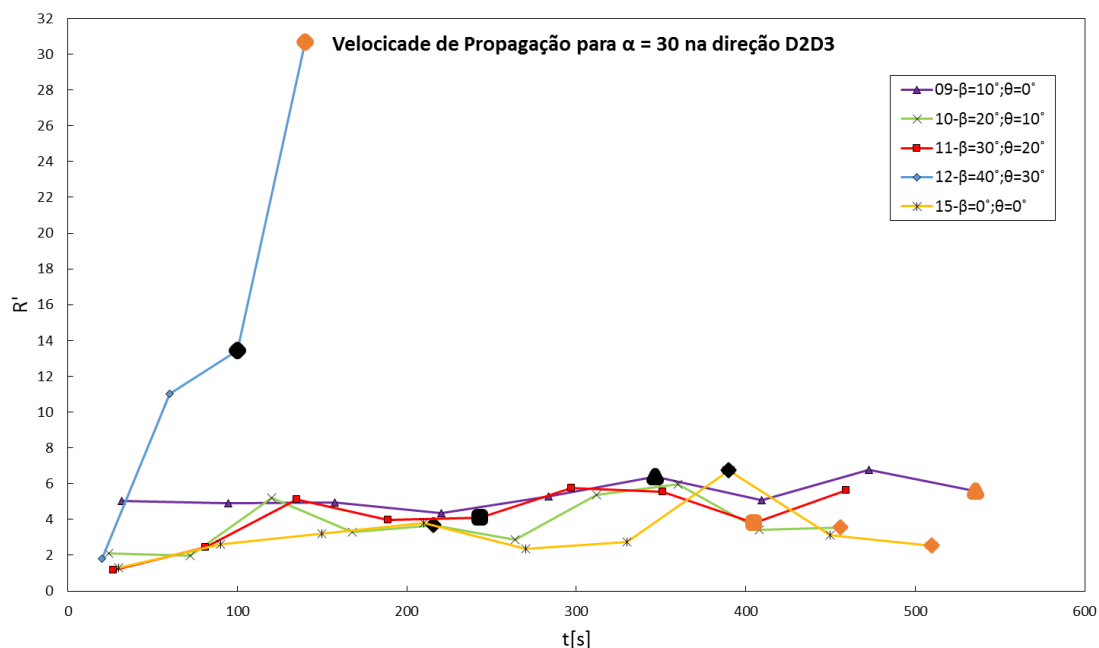


Figura 21: Velocidades segundo D2D3, correspondentes a $\alpha=30$.

Nesta última figura em análise, é evidente a semelhança entre esta e a figura anterior (fig.21), em ambos os casos, o ensaio com maior declive apresenta uma combustão total num curto período de tempo com velocidade máxima bastante elevada perto dos 32. Ainda a destacar o facto de o ponto de contacto do fogo com a extremidade lateral da mesa, para todos os ensaios à exceção do 11, ser o último ponto de registo do ensaio.

Estes valores tão baixos podem ser explicados da seguinte forma, ao alcançar a extremidade superior da mesa as chamas passam a seguir apenas nas direções laterais, uma direção que é contrária ao sentido natural ascendente do fogo, assim este perde velocidade, deslocando-se lentamente até às extremidades laterais. Isto é contrariado apenas no caso de elevado declive de painéis, ou seja, desfiladeiros mais fechados.

5. CONCLUSÕES

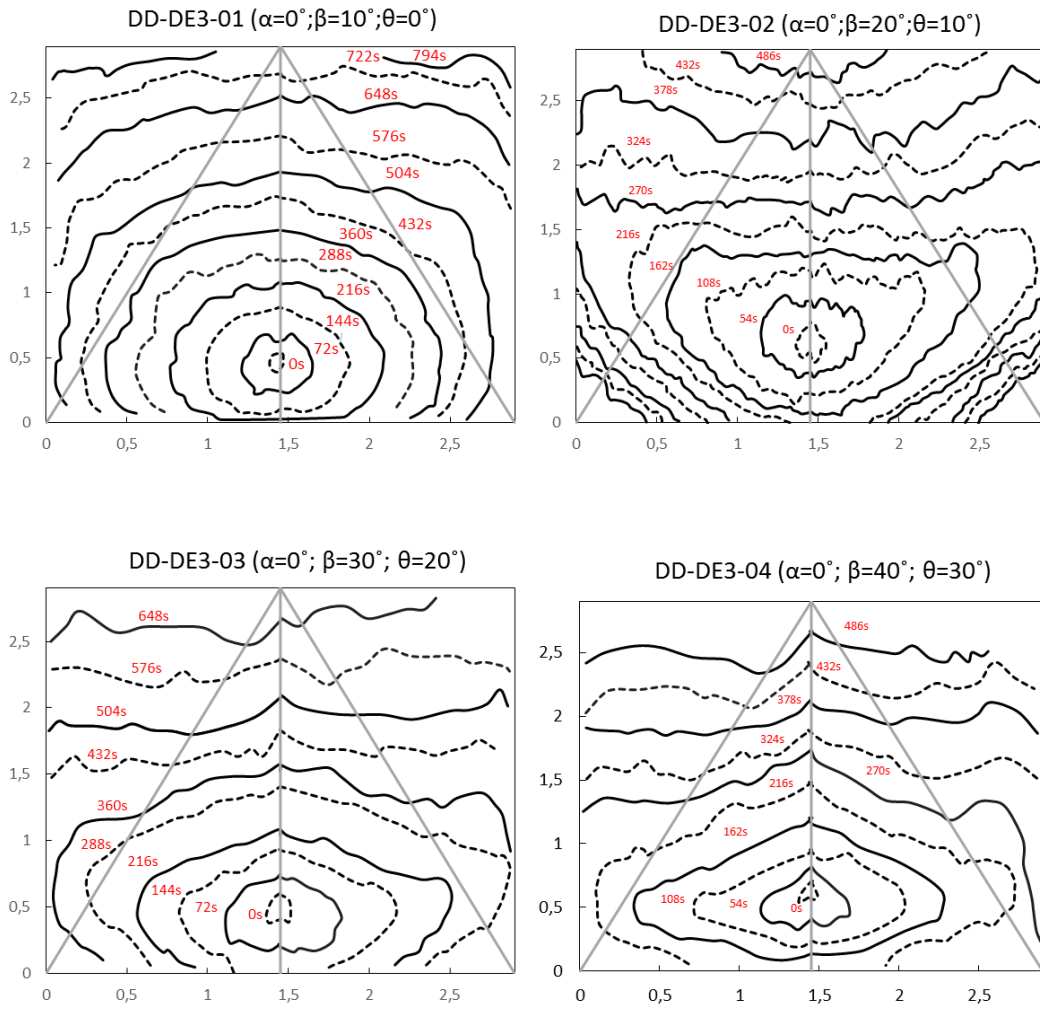
Neste estudo conclui-se que existem configurações mais propícias ao comportamento do tipo eruptivo, que correspondem a desfiladeiros complexos com transições de declive mais acentuados, que levam a que os desfiladeiros sejam mais fechados, favorecendo assim o aparecimento de correntes convectivas que originam o tipo de comportamento dinâmico do fogo, tratado nesta tese. Conclui-se também que no caso de desfiladeiros muito abertos, apesar de um declive acentuado na linha de água principal, este tipo de comportamento em estudo não é tão evidente.

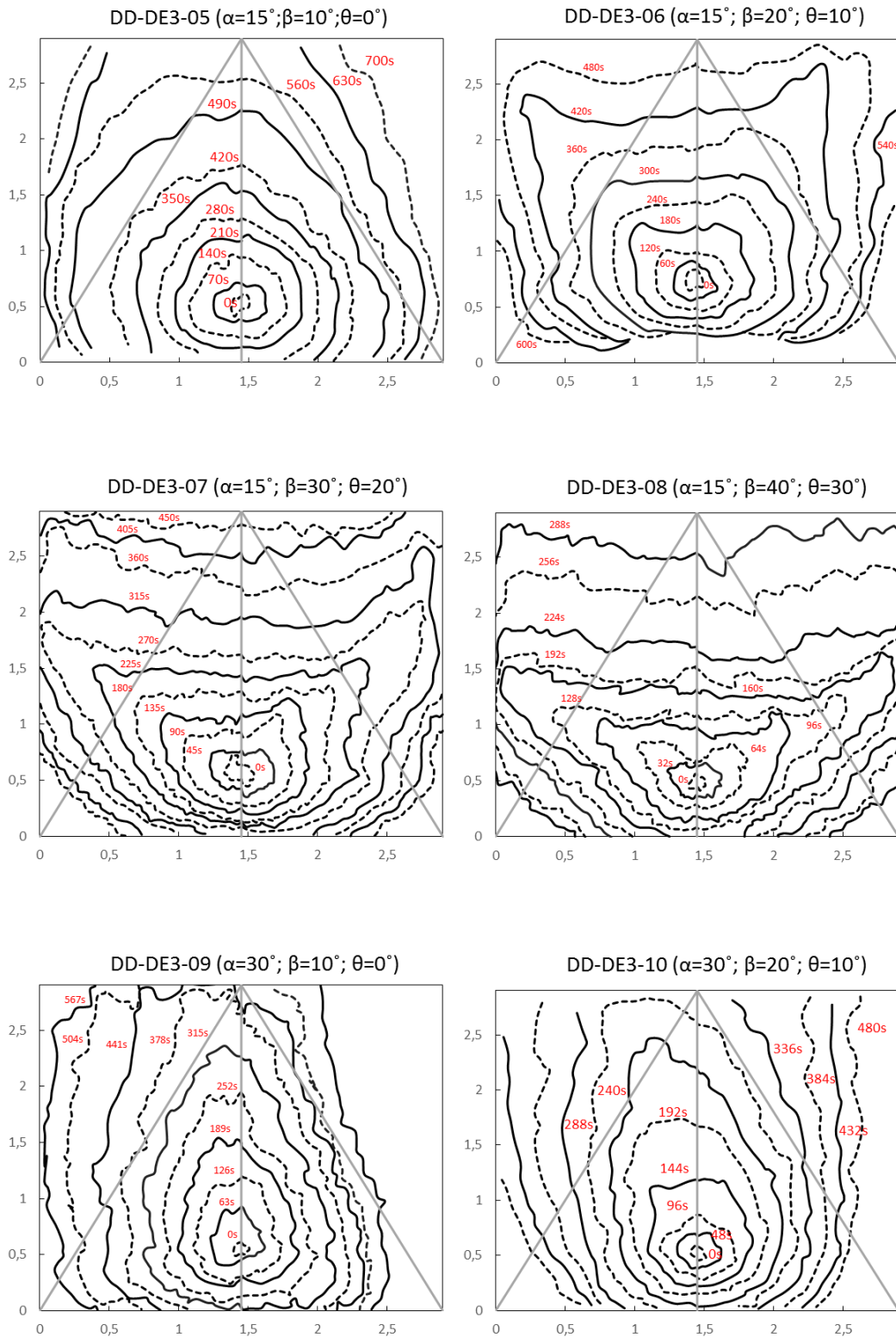
Quanto à mesa de utilizada para este estudo, apesar de o número de ensaios realizados não ter sido muito elevado, as metas para este estudo foram atingidas. Contudo um estudo mais aprofundado e exaustivo torna-se necessário para compreender e parametrizar este comportamento de fogo em topografia complexa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

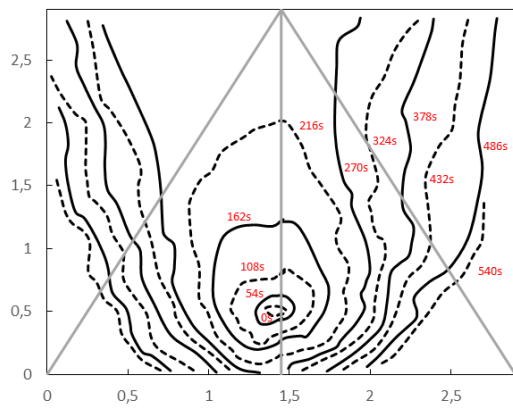
- Beck, J., Parminter, J., Alexander, M., MacDermid, E., Van Nest, T. and Beaver, A. "Fire Ecology And Management." *Forestry handbook for British Columbia*. Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada: 5th edition., 2005. 485-521.
- Butler, B. W., Bartlette, R. A., Bradshaw, L. S., Cohen, J. D., Andrews, P. L., Putnam, T., & Mangan, R. J. "Fire behavior associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain." *Forest Service*, 1998.
- Byram, G.M. "Some Principles Of Combustion And Their Significance In Forest Fire Behavior." *Reprinted from: Fire Control Notes*, 1959: 18(2),47-57.
- Curry, J. R. and Fons, W. L. "Forest-fire behavior studies." California Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California. 7pp., 1940.
- Giborne, H.T. "The objectives of forest fire-weather research." *Journal of Forestry* (Journal of Forestry, 24(4)), 1927: 25(4),452-456.
- Hawley, L.F. "Theoretical Considerations Regarding Factors Which Influence Forest Fires." *Journal of Forestry*, 1926: 24, 756-763.
- McArthur, A.G. "Weather and grassland fire behaviour." *Australian Forestry and Timber Bureau Leaflet No. 100. Forestry and Timber Bureau Department of National Development*. Canberra, Australia, 1966. 23pp.
- Nichols, D, A Canderle, I Knight, e J Leonard. "Development of Fire Fighting Vehicle Crew Protection Systems." *3rd International Wildland Fire Conference*, (CSIRO), 2003.
- Pastor, E., Zárata, L., Planas, E., and Arnaldos, J. "Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour." *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003: 29, 139-153.
- Rossa, C.G., *Dynamic model for fire behaviour prediction. PhD Thesis*. Departamento de Energia Mecânica, Universidade de Coimbra, Portugal. 188pp, 2009.
- Rothermel, R. C. "How to Predict the Spread." *Fire Behaviour Course by Boyse Interagency Fire center*, 1983: 1-5.
- Sullivan, A. L. "Wildland surface fire spread modelling; 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models." *International Journal of Wildland Fire*, 2009a: 18(4), 349-368.
- Van Wagner, C.E. "Effect of slope on fire spread rate." *Canadian Forestry Service Bymonthly Research Notes*,, 1977: 33 (1), 7-8.
- Viegas, D.X. *Cercados Pelo Fogo*. Coimbra: Minerva Coimbra, 2004.
- . *Cercados pelo Fogo em Armamar*. Coimbra: Minerva Coimbra, 2013.
- . *Cercados Pelo Fogo Parte 2*. Coimbra: Minerva Coimbra, 2009.
- Viegas, D.X., C. Rossa, e L.M Ribeiro. *Incêndios Florestais*. Lisboa: Verlag Dashhöfer Edições Profissionais, Unip., Lda., 2011.

ANEXO A

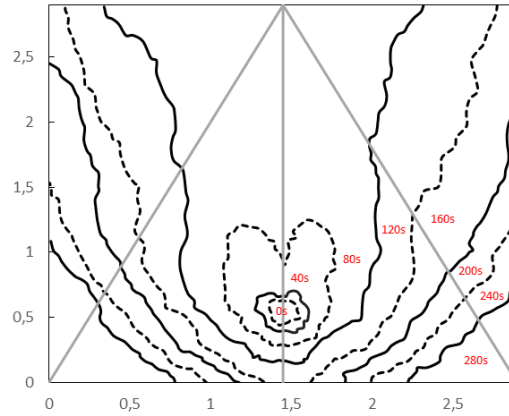




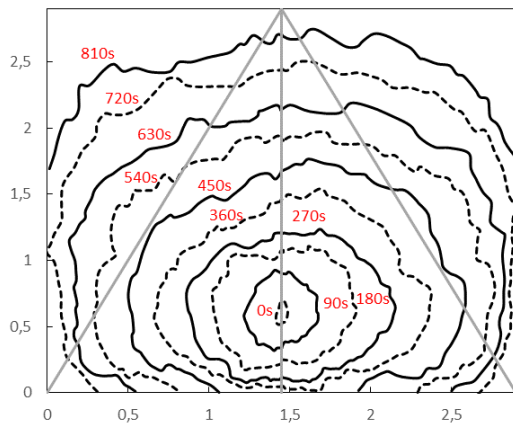
DD-DE3-11 ($\alpha=30^\circ; \beta=30^\circ; \theta=20^\circ$)



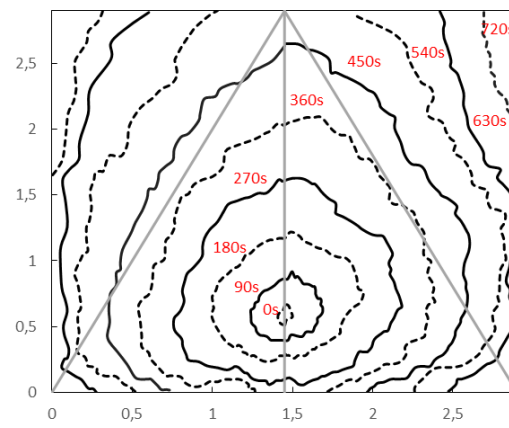
DD-DE3-12 ($\alpha=30^\circ; \beta=40^\circ; \theta=30^\circ$)



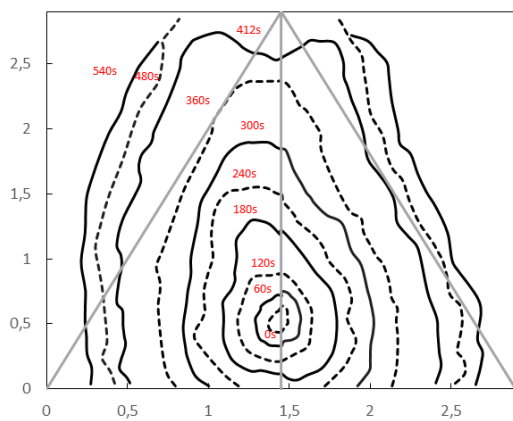
DD-DE3-13 ($\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ; \theta=0^\circ$)



DD-DE3-14 ($\alpha=15^\circ; \beta=0^\circ; \theta=10^\circ$)



DD-DE3-15 ($\alpha=30^\circ; \beta=0^\circ; \theta=0^\circ$)



ANEXO B

Tabela 3 - Ângulos secundários

Ensaio	γ [°]	δ [°]	ξ [°]
DD-DE3-01	0	10	0
DD-DE3-02	5	15	5
DD-DE3-03	9	20	9
DD-DE3-04	14	25	14
DD-DE3-04	14	25	14
DD-DE3-05	13	22	15
DD-DE3-06	9	27	17
DD-DE3-07	6	33	22
DD-DE3-08	2	38	29
DD-DE3-09	27	35	27
DD-DE3-10	26	39	31
DD-DE3-11	20	45	45
DD-DE3-12	18	45	42
DD-DE3-13	0	0	0
DD-DE3-14	15	14	14
DD-DE3-15	28	27	27