



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo Experimental 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

Experimental Study of the Spread of a Forest Fire in a Double Canyon

Autor

José Pedro Quintal Gonçalves Costa

Orientadores

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo

Júri

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

Vogais Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira
da Silva Ribeiro

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno

Carlos Viegas

Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Coimbra, Setembro, 2017

“A *Terra* compreende as distâncias, grandes e pequenas; o perigo e a segurança; o terreno aberto e os desfiladeiros; as hipóteses de vida ou morte.”

[Sun Tzu, em *A Arte da Guerra*, séc IV a.C.]

Agradecimentos

Chega agora o fim de um ciclo deveras importante no meu percurso académico. É, sem dúvida, o culminar de uma das etapas mais relevantes da minha vida, onde não poderia ter chegado sozinho. Por essa mesma razão, não quero deixar passar a oportunidade de agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este feito.

Aos meus pais e à minha família por todo o apoio, compreensão e paciência que sempre tiveram. Um especial agradecimento ao meu pai, José Joaquim da Costa, que tanto me ajudou, quer a nível pessoal quer a nível profissional.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Domingos Xavier Viegas e Doutor Jorge Raposo, pelo auxílio e orientação que prestaram.

Ao Abdelrahman Abouali, pela importante ajuda nos ensaios e pelo trabalho inovador no desenvolvimento do *Fire ROS Calculator*. Aos restantes colaboradores do LEIF/ADAI, que me ajudaram na realização dos ensaios.

Ao Filipe Gaspar, por me facultar o modelo da mesa de ensaios em *SolidWorks*.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, pela excelente experiência académica que me proporcionaram.

E, por último, aos meus amigos, pelos bons e inesquecíveis momentos.

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise da propagação de um incêndio em duplo desfiladeiro, de geometria complexa. Este estudo consistiu na análise dinâmica do comportamento do fogo, para diferentes topografias de desfiladeiros. Este trabalho é uma continuação de um estudo já realizado por Filipe Gaspar, no âmbito da sua tese de mestrado em 2016.

Ao longo do tempo, tem havido cada vez mais incêndios em Portugal e no resto do mundo. Com a existência de muitos deles em zonas montanhosas com grandes declives, o estudo da influência da topografia do terreno torna-se indispensável.

Primeiramente, realizou-se uma análise geométrica da mesa de ensaios com ajuda de um modelo em *SolidWorks*, desde configurações simples até configurações mais complexas e com maiores inclinações do duplo desfiladeiro.

De seguida, procedeu-se à realização de ensaios com caruma, em ambiente laboratorial controlado, no Laboratório de Estudos de Incêndios Florestais (LEIF) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), que proporcionaram posteriormente uma análise da velocidade de propagação do fogo em cinco direções distintas do duplo desfiladeiro. Com base nos primeiros ensaios, verificou-se necessidade de evolução técnica para esta análise, pelo que, ao longo do período deste estudo, foi sendo desenvolvido o programa *Fire ROS Calculator* para este propósito pela equipa de investigação da ADAI, especialmente pelo investigador Abdelrahman Abouali (2017).

Conjugando os dados obtidos para a velocidade de propagação do fogo com a geométrica da mesa, fizeram-se comparações de modo a determinar a influência topográfica no avanço de um fogo neste tipo de terreno. Identificaram-se também os casos de maior risco de ocorrência de fogo eruptivo, que requerem cuidados especiais para as forças de combate ao fogo.

Pretende-se que os resultados deste estudo contribuam para melhorar a prevenção de incidentes, antes e durante a ocorrência de um incêndio em duplo desfiladeiro.

Palavras-chave: Duplo desfiladeiro, Velocidade de propagação, Incêndios florestais, Topografia de terreno, Fogo eruptivo.

Abstract

The present work had as main objective the analysis of fire propagation in a double canyon with complex geometry. This study consisted in the dynamic analysis of fire behavior for different topographies of canyons. This work is a continuation of a previous study carried on by Filipe Gaspar, in the scope of his master thesis in 2016.

Over time, there have been more and more forest fires in Portugal and in the rest of the world. With many of them happening in mountainous areas with considerable slopes, studying the influence of the terrain topography becomes indispensable.

Firstly, a geometric analysis of the test table was done using a *Solidworks* model, from simple configurations to more complex ones with higher inclinations of the double canyon.

Then, tests were made with pine-needles as fuel, in an environmentally controlled hall at the Laboratory for the Study of Forest Fires (LEIF) of the Association for the Development of Industrial Aerodynamics (ADAI), which later provided an analysis of the rate of fire spread along five distinct directions of the double-canyon. The first tests performed led to the need for a technical evolution for this analysis and so, during the period of this study, the *Fire ROS Calculator* program was developed for this purpose by the ADAI research team, specially by Abdelrahman Abouali (2017).

By combining the results of the rate of fire spread with the geometry of the table, comparisons were made in order to determine the topographical influence on the evolution of a fire in this type of terrain. Cases of high risk of eruptive fire, in which the firefighting forces should take extra precaution, were also identified.

It is intended that the results of this study contribute to improving the prevention of incidents before and during the occurrence of a double canyon fire.

Keywords: Double canyon, Rate of spread, Forest Fires, Terrain Topography, Eruptive Fire Propagation.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Nomenclatura.....	ix
Símbolos gregos	x
Siglas	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	3
1.2. Objetivo e definição do trabalho.....	4
1.3. Revisão Bibliográfica	4
2. METODOLOGIA.....	9
2.1. Instalação e Equipamentos.....	9
2.1.1. Mesa de Ensaios	9
2.1.2. Restantes equipamentos.....	14
2.2. Procedimento experimental	16
2.2.1. Determinação da humidade e da carga de combustível.....	16
2.2.2. Posicionamento e calibração da câmara	16
2.2.3. Determinação da velocidade de referência.....	18
2.2.4. Realização do ensaio	19
2.3. Metodologia analítica	19
2.3.1. Análise e ajustamento de <i>frames</i>	20
2.3.2. Análise do ensaio.....	21
2.3.3. Determinação das velocidades de propagação	23
3. RESULTADOS	26
3.1. Velocidade de referência.....	26
3.2. Velocidades médias adimensionais	28
3.3. Velocidades instantâneas adimensionais	30
3.3.1. $\alpha = 0^\circ$	31
3.3.1.1 Velocidade R_1R_5'	31
3.3.1.2 Velocidade R_2R_4'	33
3.3.1.3 Velocidade R_3'	34
3.3.2 $\alpha = 20^\circ$	36
3.3.2.1 Velocidade R_1R_5'	36
3.3.2.2 Velocidades R_2R_4' e R_3'	36
3.3.3 $\alpha = 30^\circ$	37
3.3.3.1 Velocidade R_2R_4'	38
3.3.3.2 Velocidade R_3'	39
3.3.4 $\alpha = 40^\circ$	40
3.3.4.1 Velocidade R_3'	40
3.3.4.2 Velocidade R_2R_4'	41
3.3.5 Influência de α	42
3.3.6 Comparação com o estudo anterior	43

4. CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXO A – Configurações Geométricas Estudadas.....	50
ANEXO B – Gráficos das velocidades de Propagação	53
ANEXO C – Mapas de propagação do fogo	56

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução da ocupação das principais espécies e formações florestais em Portugal Continental (adaptada de Carvalho (2017); fonte: ICNF, 2010).	2
Figura 1.2 - “Quadrado do fogo” [Viegas (2007)].	6
Figura 2.1 - Vista aérea do LEIF.	9
Figura 2.2 - Mesa de desfiladeiro DE3, do LEIF.	10
Figura 2.3 - Representação esquemática das direções S e das faces A, B, C e D. O ponto a vermelho representa o ponto de ignição.	10
Figura 2.4 - Representação em <i>SolidWorks</i> dos ângulos δ_1 e δ_2	11
Figura 2.5 - Representação em <i>SolidWorks</i> do ângulo α	12
Figura 2.6 – Representação dos ângulos de declive das direções de S ₁ a S ₅ (omite-se θ_3 por ser igual a α).	12
Figura 2.7 - Representação de γ_2 , γ_3 e γ_4	13
Figura 2.8 - Inclinómetro digital DXL360S.	14
Figura 2.9 - Placa-padrão de calibração.	15
Figura 2.10 - Detecção adequada da tábua-padrão na face A (ensaio #17).	17
Figura 2.11 - Exemplo do início de um teste na mesa secundária [imagem retirada de Gaspar (2016)].	18
Figura 2.12 - Sequência de 10 <i>frames</i> , intervalados de 5 segundos (ensaio #17).	20
Figura 2.13 - Ilustração da definição da face A (ensaio #17).	21
Figura 2.14 - Exemplo de detecção manual da frente de fogo para a face A, no <i>frame</i> 5 (t=20s), no ensaio #17.	22
Figura 2.15 - Procedimento para a obtenção de valores segundo S ₃ para a face A (ensaio #17).	23
Figura 3.1 - Relação entre a humidade relativa do ar e a humidade de combustível.	27
Figura 3.2 - Influência da humidade do combustível em R_0	27
Figura 3.3 - Influência de θ_1 em R_1R_5'	29
Figura 3.4 - Influência de θ_2 , γ_2 e γ_3 em R_2R_4'	30
Figura 3.5 - Influência de θ_3 , γ_2 e γ_3 em R_3'	30
Figura 3.6 - Velocidades instantâneas adimensionais de propagação do fogo: a) no ensaio 5 ($\alpha=0^\circ$, $\delta_1=30^\circ$ e $\delta_2=30^\circ$) e b) no ensaio 6 ($\alpha=0^\circ$, $\delta_1=40^\circ$ e $\delta_2=20^\circ$).	31
Figura 3.7 - Comparação das velocidades de propagação R_1R_5' entre ensaios com valores comuns de valor de δ_2 : a) $\delta_2=0^\circ$ ($\theta_2=0^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$); b) $\delta_2=20^\circ$ ($\theta_2=9^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$); e c) $\delta_2=30^\circ$ ($\theta_2=12,95^\circ$ e $\gamma_3=120^\circ$).	32

Figura 3.8 - Comparação das velocidades de propagação R_1R_5' entre ensaios com valores comuns de valor de δ_1 : a) $\delta_1=\theta_1=20^\circ$; b) $\delta_1=\theta_1=30^\circ$; e c) $\delta_1=\theta_1=40^\circ$.	33
Figura 3.9 - Comparação das velocidades de propagação R_2R_4' entre ensaios com valores comuns de valor de δ_2 : a) $\delta_2=0^\circ$ ($\theta_2=0^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$); b) $\delta_2=20^\circ$ ($\theta_2=9^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$); e c) $\delta_2=30^\circ$ ($\theta_2=13^\circ$ e $\gamma_3=120^\circ$).	33
Figura 3.10 - Comparações de ensaios: a) $\gamma_2=180^\circ$ (desfiladeiros simples) e b) $\gamma_2=168^\circ$.	34
Figura 3.11 - Comparação das velocidades de propagação R_3' entre ensaios com valores comuns de valor de δ_2 : a) $\delta_2=0^\circ$ ($\theta_2=0^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$); b) $\delta_2=20^\circ$ ($\theta_2=9^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$); e c) $\delta_2=30^\circ$ ($\theta_2=13^\circ$ e $\gamma_3=120^\circ$).	35
Figura 3.12 - Comparações de ensaios: a) $\gamma_2=157,5^\circ$ e b) $\gamma_2=168^\circ$.	35
Figura 3.13 - Comparação dos ensaios 8, 9, 10 e 11, para R_1R_5' .	36
Figura 3.14 - Comparação dos ensaios 8, 9, 10 e 11, para a) R_2R_4' e b) R_3' .	37
Figura 3.15 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_2R_4' para pares de ensaios com: a) $\theta_2=26,8^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$ e b) $\theta_2=35,5^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$.	38
Figura 3.16 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_2R_4' , com $\gamma_2=168^\circ$.	38
Figura 3.17 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_3' para pares de ensaios com: a) $\theta_2=26,8^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$ e b) $\theta_2=35,5^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$.	39
Figura 3.18 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_3' , com $\gamma_2=168^\circ$.	39
Figura 3.19 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_3' para pares de ensaios com: a) $\theta_2=44^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$ e b) $\theta_2=35,3^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$.	40
Figura 3.20 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_3' , com: a) $\gamma_2=168^\circ$ e b) $\gamma_2=157,5^\circ$.	41
Figura 3.21 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_2R_4' para pares de ensaios com: a) $\theta_2=44^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$ e b) $\theta_2=35,3^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$.	41
Figura 3.22 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_2R_4' , com: a) $\gamma_2=168^\circ$ e b) $\gamma_2=157,5^\circ$.	42
Figura 3.23 - Influência de α em: a) R_1R_5' , com $\gamma_2=168^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$; b) R_2R_4' , com $\gamma_2=157,5^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$; c) R_3' , com $\gamma_2=157,5^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$.	43
Figura 3.24 - Comparações de valores de R_3' entre os dois estudos: a) Ensaio 3, com $\alpha=0^\circ$; b) Ensaio 9, com $\alpha=20^\circ$; c) Ensaio 14, com $\alpha=30^\circ$; d) Ensaio 18, com $\alpha=40^\circ$.	44
Figura 3.25 - Influência de α em R_3' , com $\gamma_2=157,5^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$ (resultados de Gaspar (2016)).	44
Figura 3.26 - Comparações de resultados obtidos por Gaspar (2016) e Costa (2017): a) Ensaio 10 b) Ensaio 11; c) Ensaio 13 d) Ensaio 15; e) Ensaio 17; f) Ensaio 20.	45

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Registo das ocorrências de incêndios em Portugal entre 1980 e 2010.	1
Tabela 2.1 – Valores dos ângulos que definem as geometrias estudadas.....	14
Tabela 3.1- Ensaios realizados e resultados obtidos para R_0	26
Tabela 3.2 - Velocidades médias adimensionais para todos os ensaios.	28

NOMENCLATURA

A, B, C, D – faces planas triangulares da mesa de ensaio (Fig. 2.3)

D_i – deslocamentos do fogo segundo as direções S_i , $i=1,\dots,5$ [mm]

H_{comb} – humidade do combustível [%]

$H_{comb,seco}$ – humidade do combustível seco [%]

HR – humidade relativa do ar ambiente [%]

M – massa de combustível [kg]

M_{seco} – massa de combustível seco [kg]

R_0 – velocidade de propagação de referência, na mesa horizontal [mm/s]

R_i – velocidades instantâneas de propagação do fogo segundo as direções S_i , $i=1,\dots,5$ [mm/s]

R_i' – velocidades instantâneas adimensionais de propagação do fogo segundo as direções S_i ,
 $i=1,\dots,5$

R_1R_5' – velocidades instantâneas adimensionais segundo as direções S_1 e S_5

R_2R_4' – velocidades instantâneas adimensionais segundo as direções S_2 e S_4

\bar{R}_i – velocidades médias de propagação do fogo nas direções S_i , $i=1,\dots,5$ [mm/s]

\bar{R}_i' – velocidades médias adimensionais de propagação do fogo nas direções S_i , $i=1,\dots,5$

$\overline{R_1R_5}'$ – velocidade média adimensional nas direções S_1 e S_5

$\overline{R_2R_4}'$ – velocidade média adimensional nas direções S_2 e S_4

S_1 – direção segundo a face D, paralela à largura desta (Fig. 2.3)

S_2 – direção segundo a interseção das faces B e D (Fig. 2.3)

S_3 – direção segundo a interseção das faces A e B (Fig. 2.3)

S_4 – direção segundo a interseção das faces A e C (Fig. 2.3)

S_5 – direção segundo a face C, paralela à largura desta (Fig. 2.3)

T_{ar} – temperatura do ar ambiente [°C]

U_a – velocidade do vento ambiente [km/h]

U_f – velocidade do vento induzido pelo fogo [km/h]

Símbolos gregos

α – ângulo de inclinação da mesa [°] (Fig. 2.5)

δ_1 – ângulo de inclinação primária das larguras das faces C e D [°] (Fig. 2.4)

δ_2 – ângulo de inclinação primária das larguras das faces A e B [°] (Fig. 2.4)

θ_i – ângulos de declive das direções S_i , $i=1,\dots,5$ [°] (Fig. 2.6)

γ_2 – ângulo de abertura entre as faces B e D [°]

γ_3 – ângulo de abertura entre as faces A e B [°]

γ_4 – ângulo de abertura entre as faces A e C [°]

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LEIF – Laboratório de Estudos de Incêndios Florestais

1. INTRODUÇÃO

Em sentido lato, entende-se como risco de incêndio o risco de ignição do fogo, ou seja, a existência de causas naturais ou humanas (acidentais ou voluntárias) que provoquem o fenómeno de ignição (Marques, 2017). Após a ignição, o desenvolvimento de um incêndio florestal depende de diversos fatores, tais como: a carga de combustível no solo (mato) e as características da floresta (densidade e distribuição das espécies florestais, e o grau de combustibilidade e de inflamabilidade da vegetação arbustiva e sub-arbustiva), as condições meteorológicas (temperatura e humidade relativa do ar atmosférico, velocidade e direção do vento) e a morfologia do terreno (e.g., a exposição e a topografia).

Nos últimos tempos, o número de ocorrências de incêndios florestais tem vindo a aumentar cada vez mais no mundo inteiro. Na Tabela 1.1, apresenta-se um registo relativo a Portugal, nas últimas décadas (Ferreira-Leite *et al.*, 2013):

Tabela 1.1 – Registo das ocorrências de incêndios em Portugal entre 1980 e 2010.

Década	Ocorrências (n°)	Área ardida (ha)	GIF (n°)	GIF (%)	Área ardida GIF (ha)	Área ardida GIF (%)	AA média GIF
1981-1990	82 198	827 787	1 281	1,6	563 950	68,1	440
1991-2000	245 866	1 044 383	1 616	0,7	696 216	66,7	431
2001-2010	254 023	1 474 453	1 733	0,7	1 164 748	79,0	672

Nos finais do séc. XIX, a área florestal do país estava reduzida a pouco mais de 640.000 ha [Carvalho (2014)]. A Figura 1.1 mostra a evolução da ocupação das principais espécies e formações florestais desde o início do séc. XX. As políticas florestais ao longo das últimas décadas resultaram sobretudo numa expansão das áreas de sobreiro, tendo sido mais modestas no que se refere a outras espécies da floresta autóctone.

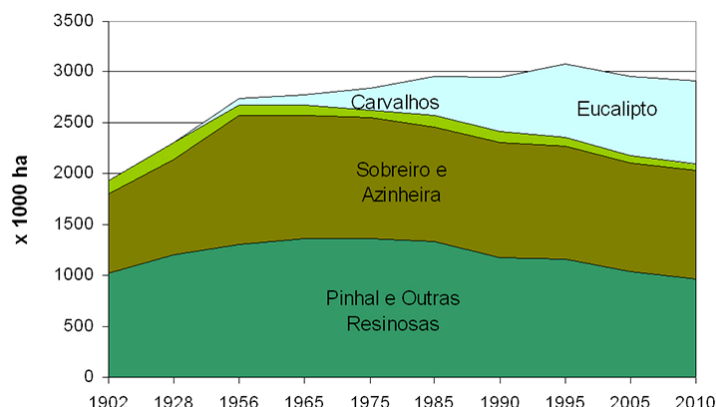


Figura 1.1 - Evolução da ocupação das principais espécies e formações florestais em Portugal Continental (adaptada de Carvalho (2017); fonte: ICNF, 2010).

Até meados da segunda metade do século XX, a maior parte da área florestal das regiões Norte e Centro do nosso país era constituída por pinhal e outras resinosas, principalmente pinheiro bravo (*pinus pinaster*). Para além da utilidade da madeira (e.g., para a construção de edifícios, para mobiliário, etc.), a extração de resina era uma atividade económica valiosa associada ao cultivo do pinheiro bravo, a qual contribuía para a limpeza e a manutenção regular das matas. Existiam também significativas atividades de pastorícia e de pecuária nos meios rurais, que moderavam o desenvolvimento de matos e, necessitando de pastos, motivavam naturalmente a limpeza regular de vastas áreas de terrenos, quer ao redor dos aglomerados populacionais, quer mesmo longe deles (e.g., as serras). Hoje em dia, estes efeitos benéficos praticamente desapareceram: a pastorícia tem um significado residual e a pecuária está essencialmente concentrada em unidades de produção mais ou menos intensivas. Paralelamente, ao longo das últimas décadas, verificou-se uma forte deslocação das populações para as cidades e, com maior relevo, para as zonas costeiras, ficando o interior do país cada vez mais rarefeito de população e, por consequência, a floresta ao abandono. Nos tempos que correm, o mau ornamento das florestas, associado a uma política de gestão florestal inadequada, propicia a ocorrência de incêndios de grandes dimensões.

Em termos de condições meteorológicas que determinam risco elevado ou crítico de incêndio florestal, é comum referir-se a regra dos 30-30-30: temperatura do ar superior a 30 °C, humidade relativa inferior a 30% e velocidade do vento ambiente superior a 30 km/h.

Nos últimos tempos, tem sido comum verificar-se a ocorrência simultânea destas condições, mesmo fora da época “oficial” de incêndios.

Para além destes, a topografia do terreno é um fator primordial na propagação de um incêndio florestal. É sabido que a inclinação do terreno propicia o desenvolvimento do fogo de baixo para cima, independentemente das restantes condições, aumentando também as dificuldades de o combater por via terrestre. Este aspeto é muito mais acentuado no caso de desfiladeiros, onde os efeitos da radiação das chamas sobre a vegetação ainda não ardida se torna muito maior e o efeito dos intensos ventos convectivos gerados pelo próprio fogo potenciam o aumento da velocidade de propagação do fogo, criando riscos imprevisíveis para as forças de combate no terreno.

No âmbito da presente tese, e na sequência de um trabalho anterior, realizado por Gaspar (2016), desenvolveu-se um estudo laboratorial da propagação do fogo num duplo desfiladeiro, procurando determinar a influência da topografia na velocidade de propagação.

1.1. Motivação

Em Agosto de 2003, estando de férias em Aldeia do Bispo, do concelho da Guarda, testemunhei o enorme incêndio que aí decorreu no dia 7, o qual consumiu totalmente as florestas e matos ao redor da povoação, pondo em perigo várias habitações (Viegas, 2004). Neste incêndio, houve registo de uma vítima mortal, e ardeu por completo a casa da Quinta do Teixal, que foi a habitação dos meus bisavós paternos e onde residiam ainda dois familiares meus; nos anexos da casa, pereceram os rebanhos e todos os animais domésticos. Perante a aflição dos meus pais e avós, que andaram a combater o incêndio, e a incapacidade que senti de não poder ajudar, este foi um trágico episódio que me ficou marcado na memória. Sendo que este incêndio foi incontrolável e, estando a aldeia no cimo da encosta de um desfiladeiro, este incidente levou-me a escolher este tema para realizar a minha dissertação. Isto, associado ao elevado número de incidentes no ano passado (2016) e ao ano infernal que ainda estamos a presenciar em termos de incêndios florestais, foi algo que me motivou e que ainda me motiva a adquirir conhecimentos relacionados com este tema.

1.2. Objetivo e definição do trabalho

Em concreto, neste trabalho, o principal objetivo consistiu no estudo da velocidade de propagação de um fogo num duplo desfiladeiro em função da sua geometria.

Para tal, realizaram-se diversos ensaios no LEIF, numa mesa quadrada de 9 m², que constitui um modelo à escala laboratorial representativo de um duplo desfiladeiro. Essa mesa é composta por quatro painéis triangulares de 1,5 m × 3 m e tanto estes, como o conjunto da mesa, podem ser acionados hidraulicamente de modo a alterar a sua inclinação. Para cada ensaio a realizar nessa mesa, é feito previamente um estudo da velocidade de propagação sem qualquer efeito de declive, numa mesa de 1×1 m², de modo a obter dados de referência com vista à adimensionalização dos resultados. Em cada caso, mede-se a temperatura e a humidade relativa do ar ambiente no laboratório, bem como a humidade do combustível. Todos os ensaios são feitos com a ausência de vento ambiente ou de correntes de ar.

A evolução das chamas durante cada ensaio é registada com uma câmara vídeo de infravermelhos. A partir da análise das imagens termográficas sequenciais, pode-se calcular a velocidade de propagação da frente de fogo e relacioná-la com a geometria da mesa em questão. Para a análise geométrica da mesa, estudou-se um modelo em *SolidWorks*, elaborado por Gaspar (2016). A análise da velocidade de propagação do fogo foi feita com o programa *Fire ROS Calculator*, desenvolvido na ADAI por Abouali (2017), e o seu cálculo e comparação com a geometria foram feitos em Excel. O programa *Photoshop* foi também por vezes utilizado para ajustar e/ou corrigir algumas imagens de calibração.

Sendo uma continuação do trabalho de Gaspar (2016), este estudo da propagação do fogo num duplo desfiladeiro justifica-se pelo facto de se tratar de um tema ainda pouco desenvolvido e com bastante relevância na atualidade, em particular, no nosso País.

1.3. Revisão Bibliográfica

Desde a década de 1980, a ADAI, e particularmente o LEIF, tem dedicado um esforço apreciável na investigação sobre fogos florestais. Viegas *et al.* (2002) enunciou que a convecção perto da frente de fogo determina as propriedades do processo de combustão e, conseqüentemente, a forma e o tamanho da frente de chama e a respetiva intensidade de

fluxo de calor. O efeito de convecção numa frente de fogo tem as componentes de “convecção forçada” e de “convecção natural”. A convecção forçada é a que é induzida pelo vento ambiente. Por outro lado, na frente de chama e perto dela, existem gases a temperaturas elevadas que, conjugados com as diferenças de densidade, induzem um forte escoamento designado por convecção natural. No presente estudo, em ambiente laboratorial, o efeito do vento é desprezado, considerando-se que a velocidade de propagação depende apenas da convecção natural provocada pela frente de chama. No entanto, apesar de se dar grande ênfase ao estudo dos efeitos convectivos num fogo em desfiladeiro, reconhece-se que a radiação da chama e/ou da zona de reação da camada de combustível pode ser o mecanismo de transferência de calor com maior responsabilidade pelo avanço da frente de fogo.

A transferência de calor que ocorre na propagação de um incêndio dá-se por radiação, convecção e condução. A radiação refere-se à emissão de energia por ondas eletromagnéticas, a convecção ao movimento de massas de ar quente e a condução à transferência de calor através (ou ao longo) do combustível. A condução raramente é considerada no estudo de incêndios florestais, sendo mesmo desprezada devido à importância da radiação e da convecção na propagação de um incêndio (Auburn University, 2017).

Em muitas ocasiões, os incêndios florestais comportam-se de um modo surpreendente, mudando subitamente de um comportamento moderado, caracterizado por uma velocidade de propagação relativamente baixa, para um comportamento súbito de propagação explosiva, com elevadas velocidades de propagação e intensa libertação de calor [Viegas (2005)]. Este tipo de fogo é designado por fogo eruptivo, dada a sua semelhança com o comportamento de um vulcão [Viegas (2006)^a]. Nestes casos, este comportamento apanha muitas vezes de surpresa as pessoas que intervêm no combate ao incêndio, chegando mesmo a provocar fatalidades.

No estudo de Viegas *et al.* (2005) é comprovado que o comportamento eruptivo de um fogo está principalmente associado ao encontro das correntes convectivas do vento ambiente e do vento provocado pelo fogo. O vento inerente ao fogo provoca a reação de combustão e, como consequência, os ventos na vizinhança da frente de fogo aumentam também. No entanto, está provado que a ocorrência de um fogo eruptivo depende essencialmente da existência de um determinado declive de terreno coberto continuamente por vegetação – podendo, por exemplo, ser causado pela ocorrência de uma rajada de vento

ou pelo transporte de partículas em chama por convecção natural do fogo. Com o elevado número de causas possíveis para a propagação eruptiva de um fogo, é difícil definir apenas uma causa para cada incidente.

Segundo Chatelon *et al.* (2014), em duplo desfiladeiro, um fogo cria um vento por ele próprio induzido, que transporta oxigénio para a zona de reação química, o que intensifica o processo de combustão e, conseqüentemente, o comprimento de chama e a velocidade de propagação. Assim, esta reação está em constante procura/necessidade de ar ambiente. Esta resposta aumenta continuamente e a velocidade de propagação pode atingir valores muito elevados, caso não seja inibida por um ou mais mecanismos externos.

Conclui-se que, para um fenómeno de erupção de fogo ocorrer, tem que existir um determinado valor de declive de desfiladeiro, em que a combustão dos gases em pirólise (rutura da estrutura molecular pelas altas temperaturas) cria uma afluência proporcional ao fluxo destes gases relacionada com a profundidade da frente de chama e, posteriormente, com a velocidade de propagação [Viegas (2005), Chatelon *et al.* (2014)].

As condições em que especificamente ocorre erupção de fogo são: (i) condições de verão (ex.: humidade relativa baixa, temperaturas altas); (ii) baixa densidade de vegetação (ex.: ervas); (iii) fator de forma da frente de chama próximo de 1 (comprimento/largura); e (iv) declive de terreno significativo.

As condições do comportamento de um fogo podem ser também esquematizadas pela Figura 1.2, a que Viegas (2007) deu o nome de “quadrado do fogo”. São elas a meteorologia, a vegetação, a topografia e o tempo.

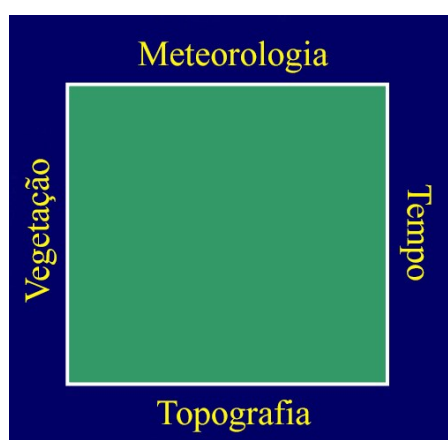


Figura 1.2 - “Quadrado do fogo” [Viegas (2007)].

No caso em estudo, o vento ambiente é desprezável, ou seja, todos os testes são feitos com ausência de vento, no interior do laboratório. Porém, em casos reais, a velocidade do escoamento do vento deverá ser a resultante do vento ambiente com o vento induzido pelo fogo:

$$U = U_a + \Delta U_f \quad (1.1)$$

Como já foi referido anteriormente, ventos ambientes superiores a 30 km/h influenciam bastante o comportamento de um incêndio, podendo até estar na origem da erupção do fogo. Por exemplo, no incêndio de Freixo de Espada à Cinta (2003), a interação do fogo com o ar circundante modificou drasticamente tanto o comportamento das propriedades do fogo como as condições meteorológicas [Viegas (2007)].

Refira-se que o presente trabalho não tem de todo a intenção de menosprezar o efeito da convecção forçada criada pelo vento ambiente, mas sim fazer uma análise sucinta à outra componente de convecção responsável por este tipo de fenómeno, o vento induzido naturalmente pelo próprio fogo. A verdade, porém, é que a ocorrência de ventos ambientes muito fortes pode levar a uma interpretação errada de que eles são a causa de um fogo eruptivo em duplo desfiladeiro. Existindo um terreno com determinado declive, coberto por vegetação florestal, onde haja uma ignição na sua base, a intensidade do fogo irá aumentar até à chamada “erupção”, independentemente de fatores externos. Testes realizados por Dupuy et al. (2011), de entre outros, confirmam que, mesmo em duplos desfiladeiros simples de inclinação de 30°, verifica-se um aumento eruptivo da velocidade de propagação do fogo. Quanto mais íngreme for um desfiladeiro, e mais seco e fino for o combustível presente, mais rapidamente um fogo se torna eruptivo; isto é, o tempo necessário para ocorrer a erupção do fogo diminui com o aumento do declive do terreno [Viegas (2006)^b]. Foi comprovado também que o ar que entra lateralmente num desfiladeiro representa um papel preponderante no comportamento eruptivo do fogo; ensaios realizados por Dupuy et al. (2011) demonstraram que, quanto menor for a entrada desse ar frio, mais violento se torna o comportamento do fogo.

Num incêndio em duplo desfiladeiro, a velocidade de propagação das chamas pode inicialmente ser relativamente baixa, mas os bombeiros podem ser, posteriormente,

surpreendidos por situações de fogo eruptivo, quando estiverem a combater o fogo numa fase mais avançada. Então, a supressão do fogo deve ser feita com a maior antecedência possível, de modo a prevenir que se atinja um modo eruptivo de fogo. É usual começar o seu combate pela traseira do fogo, isto é, pelo ponto mais baixo de inclinação do desfiladeiro, e ir subindo pelas encostas ao longo do perímetro do fogo. Em alguns casos, membros das equipas de combate colocam-se acima do fogo, por exemplo numa estrada ou num cume do desfiladeiro, de modo a atacar o fogo frontalmente. Se esta estratégia for já efetuada quando o fogo está em modo eruptivo, ou a transitar para tal, é muito provável a ocorrência de desastres, apanhando os combatentes de surpresa e podendo mesmo tornar a supressão do fogo inútil (Viegas 2006)^a.

Segundo Viegas (2006)^b, uma das regras básicas de segurança é nunca combater ou permanecer acima do fogo num desfiladeiro, quando existir ainda combustível entre o sujeito e o fogo. Os bombeiros não devem enfrentar o incêndio no meio do desfiladeiro, nem devem ser colocados recursos humanos e materiais acima do fogo enquanto este estiver ativo, devendo-se adotar táticas alternativas. Mesmo o pessoal localizado em cumes/planaltos coloca a sua vida em risco, quando sujeito aos gases quentes do fogo e aos fluxos de calor radiativos e convectivos devido à proximidade das chamas. Nem as zonas de espaço aberto ou espaços de intervalo de fogo são seguras. Por isso, numa fase avançada de fogo eruptivo, o mais seguro será evacuar todo o pessoal das zonas de risco (por exemplo, as torres de vigia servem para este propósito).

Para além do impacto a nível de perda de vidas, a ocorrência de incêndios enfatiza as alterações climáticas, criando um ciclo vicioso. As próprias alterações climáticas ajudam à ocorrência de incêndios com o aumento de temperatura e seca de vegetação. E, com incêndios, há emissão de CO₂ para a atmosfera (cerca de 10% a 30% por ano). Também, havendo menos área florestal, o CO₂ não é removido pelas plantas, reduzindo desse modo a sua retenção nas plantas e no solo.

No presente estudo, os ensaios foram feitos sempre com o mesmo combustível – caruma (agulhas secas de pinheiro bravo, “*pinus pinaster*”). Apesar de, nos tempos que correm, existir muita vegetação composta por eucalipto, em Portugal Continental, o território florestal é abundante em agulha de pinheiro bravo. Sendo este um combustível que entra facilmente em combustão, esta é uma das principais espécies em estudo de temas relacionados com incêndios.

2. METODOLOGIA

Toda a parte experimental do presente estudo foi desenvolvida no Laboratório de Estudos de Incêndios Florestais (LEIF) da ADAI, situado junto ao aeródromo da Lousã.



Figura 2.1 - Vista aérea do LEIF.

Este laboratório proporcionou a realização de experiências em ambiente controlado fechado e com as devidas condições de segurança: uso de casaco protetor e máscara.

2.1. Instalação e Equipamentos

Os ensaios foram realizados numa mesa experimental que representa um modelo à escala laboratorial de um duplo desfiladeiro, com geometria variável.

2.1.1. Mesa de Ensaio

A mesa principal onde se realizaram os ensaios é quadrada de lado equivalente a 3 m, correspondendo a uma área de 9 m², e, na sua posição de origem, está a uma altura de 1,7 m relativamente ao chão (Fig. 2.2).



Figura 2.2 - Mesa de desfiladeiro DE3, do LEIF.

Esta plataforma é composta por quatro painéis triangulares de 3 m de comprimento e 1,5 m de largura, que podem ser acionados hidráulicamente de modo a alterar individualmente a sua inclinação. Estes foram definidos como faces A, B, C e D, sendo que numa vista frontal da mesa se visualizam as larguras de C e D e numa vista traseira as larguras de A e B. Nestas faces foram analisados deslocamentos e velocidades da frente de fogo segundo as direções S_1 , S_2 , S_3 , S_4 e S_5 (Fig. 2.3).

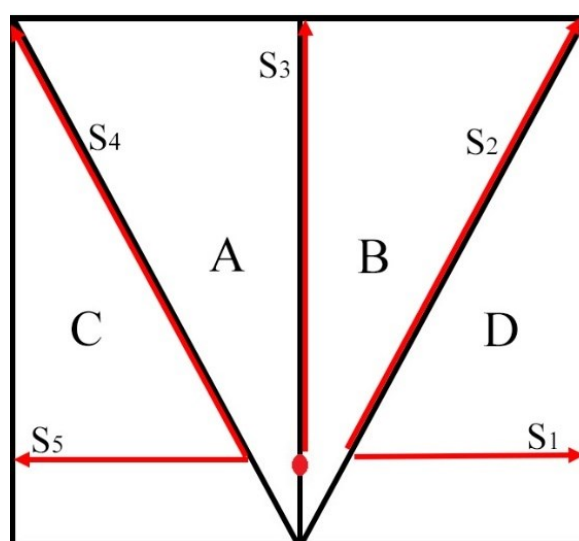


Figura 2.3 - Representação esquemática das direções S e das faces A, B, C e D. O ponto a vermelho representa o ponto de ignição.

S_1 e S_5 representam as direções paralelas às larguras das faces D e C, respectivamente, definidas a partir do ponto em que o fogo alcança essas mesmas faces. Assim, a distância destas direções relativamente ao bordo inferior da mesa pode variar de ensaio para ensaio. S_2 e S_4 são as direções segundo as linhas definidas pelas interseções de B com D e de A com C, respectivamente. A medição do espaço percorrido pela chama segundo estas direções é feita a partir do instante em que a chama alcança essas linhas. Por seu turno, a direção S_3 é definida pela linha de interseção das faces A e B (“linha de água”), desde o ponto de ignição, coincidindo com o eixo de simetria da mesa.

O mecanismo dos cilindros ligados às faces permite imprimir ângulos de inclinação entre a direção da largura de cada face e a horizontal (chão). O posicionamento primário da mesa – quando a plataforma se encontra paralela ao chão – é definido pelos ângulos representados na Figura 2.4: δ_1 corresponde aos ângulos entre as larguras de C e D com a horizontal, e δ_2 os ângulos entre as larguras de A e B com a horizontal. Este mecanismo permitiu variar os valores de δ_1 entre 0° e 40° , e os de δ_2 entre 0° e 30° .

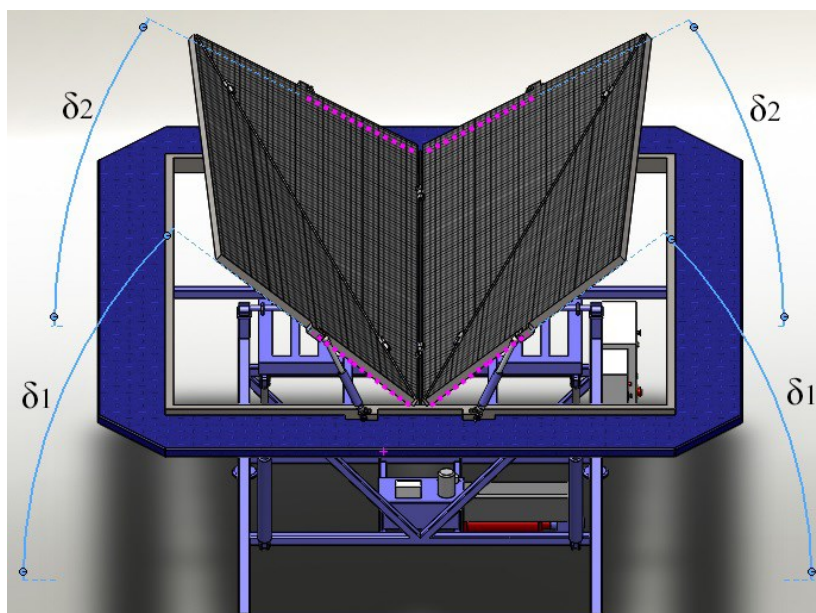


Figura 2.4 - Representação em *SolidWorks* dos ângulos δ_1 e δ_2 .

Pode-se também imprimir uma inclinação ao conjunto da mesa relativamente ao chão. Este ângulo de inclinação entre a base da plataforma e a horizontal (Fig. 2.5) é designado por α e o cilindro responsável por este movimento permitiu ângulos entre 0° e 40° .

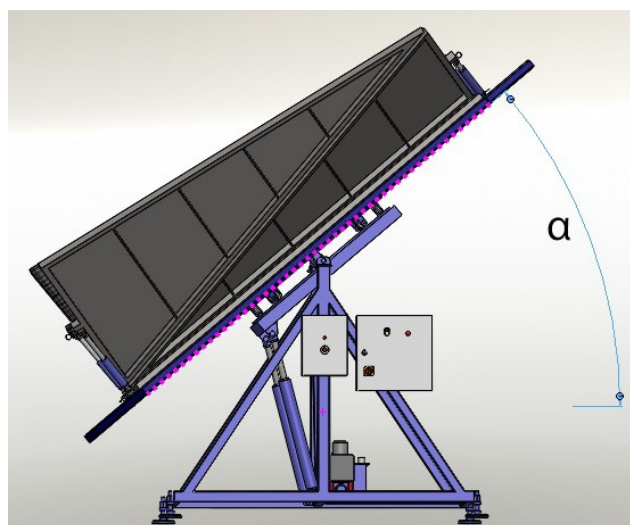


Figura 2.5 - Representação em *SolidWorks* do ângulo α .

Os valores destes três ângulos primários são estabelecidos para a geometria de cada ensaio. A partir destes, são analisados os restantes ângulos relevantes para cada configuração ensaiada. Este processo de análise geométrica foi efetuado num modelo da mesa de ensaios em *SolidWorks*, desenvolvido por Gaspar (2016). Assim, definem-se ângulos θ_1 a θ_5 , entre cada uma das direções S_1 a S_5 acima referidas (Fig. 2.3) e a horizontal, conforme se ilustra na Figura 2.6. Note-se que θ_3 , o ângulo de declive da direção S_3 , é sempre igual a α visto que a linha de água pertence ao plano da base da plataforma (Fig. 2.5).

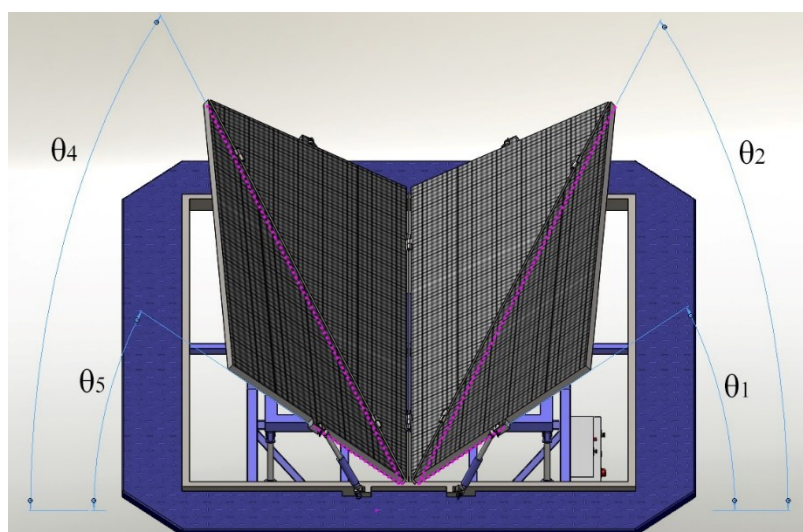


Figura 2.6 – Representação dos ângulos de declive das direções de S_1 a S_5 (omite-se θ_3 por ser igual a α).

Por seu turno, conforme se ilustra na Figura 2.7, γ_2 é o ângulo de abertura entre as faces B e D, γ_3 representa a abertura entre A e B e γ_4 é o ângulo entre as faces A e C.

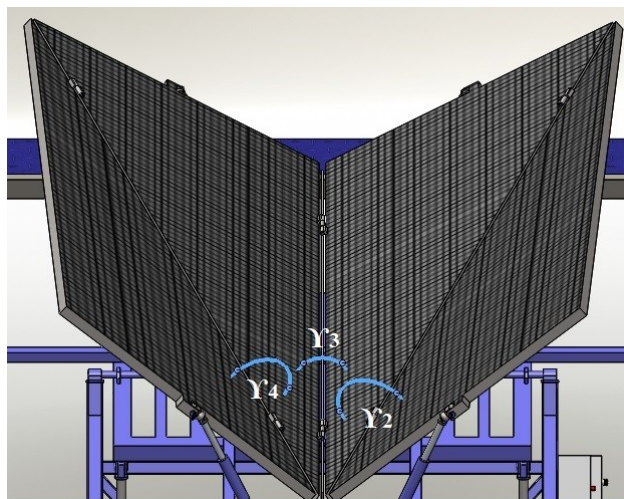


Figura 2.7 - Representação de γ_2 , γ_3 e γ_4 .

A condição de simetria da mesa relativamente à linha de água foi um pressuposto para todas as configurações estudadas. Assim, face ao exposto, resultam as seguintes igualdades entre ângulos: $\theta_3 = \alpha$; $\theta_1 = \theta_5$; $\theta_2 = \theta_4$; $\gamma_2 = \gamma_4$.¹

Os valores destes ângulos registados para todos os ensaios realizados neste estudo encontram-se listados na Tabela 2.1. Nesta distinguem-se quatro conjuntos correspondentes a $\alpha = 0^\circ$ (mesa horizontal), 20° , 30° e 40° . A configuração da mesa para cada ensaio pode ser visualizada no Anexo A, com representações em *SolidWorks* para cada caso.

Pela Tabela 2.1, verifica-se que iguais conjuntos de valores de (δ_1, δ_2) resultam em iguais conjuntos de (γ_2, γ_3) . O valor de γ_3 depende do valor de δ_2 – quanto maior δ_2 , maior o fecho de A e B (menor γ_3). Por seu turno, quanto maior for a diferença entre δ_1 e δ_2 , maior é o fecho pelos conjuntos das faces A e C, e B e D (menores são γ_2 e γ_4 , Fig. 2.7). Para valores fixos de (δ_1, δ_2) , maiores valores de α resultam em valores menores de θ_1 e θ_5 (ver Figura 2.6). Por fim, observa-se que os declives θ_2 e θ_4 aumentam com o aumento dos valores de δ_2 e de α .

¹ Por esta razão, na Tabela 2.1 e na análise da geometria e dos resultados omite-se a referência aos ângulos θ_5 , θ_4 e γ_4 .

Tabela 2.1 – Valores dos ângulos que definem as geometrias estudadas.

Ensaio	$\alpha=\theta_3$ [°]	δ_1 [°]	δ_2 [°]	θ_1 [°]	θ_2 [°]	γ_2 [°]	γ_3 [°]
1	0	20	0	20	0	157,5	180
2	0	20	20	20	9	180	140
3	0	30	0	30	0	145,8	180
4	0	30	20	30	9	168	140
5	0	30	30	30	13	180	120
6	0	40	20	40	9	157,5	140
7	0	40	30	40	13	168	120
8	20	20	0	19,5	17,9	157,5	180
9	20	30	20	28,8	27,1	168	140
10	20	40	20	38	27,1	157,5	140
11	20	40	30	38	31,1	168	120
12	30	30	0	28	26,8	145,8	180
13	30	30	20	26,5	35,5	168	140
14	30	40	0	38,5	26,8	133,5	180
15	30	40	20	35	35,5	157,5	140
16	30	40	30	34,5	40	168	120
17	40	40	30	30,3	48,4	168	120
18	40	40	20	30,8	44	157,5	140
19	40	40	0	35,3	35,3	133,5	180
20	40	30	20	23,3	44	168	140
21	40	30	0	25,3	35,3	145,8	180
22	40	20	0	16,4	35,3	157,5	180

2.1.2. Restantes equipamentos

Antes de cada teste na mesa de ensaios, utilizou-se uma mesa, quadrada de área 1 m^2 , paralela ao chão, para testar a velocidade de referência de propagação do fogo sem qualquer declive, R_0 . Em dois bordos paralelos existem pinos verticais separados de 10 cm entre si (ver Figura 2.11).

Para medir os ângulos de inclinação δ_1 , δ_2 e α , utilizou-se um inclinómetro digital de modelo DXL360S, com uma resolução de $0,01^\circ$ e precisão de $\pm 0,05^\circ$, de 0 a 20° , e de $\pm 0,1^\circ$, de 20 a 70° (Fig. 2.8).



Figura 2.8 - Inclinómetro digital DXL360S.

Para monitorizar o desenvolvimento do fogo na mesa de ensaios, usou-se uma câmara vídeo de infravermelhos FLIR SC640, ligada a um computador fixo. As principais características desta câmara são: precisão de $\pm 2^\circ \text{C}$ ou 2% de leitura; gama de temperatura: -40°C a 1500°C ; resolução de imagem IR de 640×480 pixels.

Para a calibração da câmara relativamente a cada face da mesa de ensaios, utilizou-se uma placa de madeira retangular, cuja face tem um desenho axadrezado, com quadrados de 200 mm de lado pretos e brancos (Fig. 2.9).



Figura 2.9 - Placa-padrão de calibração.

Para a pesagem do combustível a usar em cada ensaio foi utilizada uma balança AND HW-15K, com capacidade máxima de 15 kg. Para a medição prévia do teor de humidade do combustível, usou-se uma balança AND ML-50, de precisão 0,5 %, capacidade máxima de 51 g e resolução 0,005 g.

Para a preparação e a realização dos ensaios, foram ainda utilizados vários equipamentos auxiliares (cronómetro, plataforma móvel, etc.).

2.2. Procedimento experimental

2.2.1. Determinação da humidade e da carga de combustível

O primeiro passo para a realização de cada teste era a determinação do teor da humidade do combustível. Para tal, colocava-se cerca de 1 grama de combustível no “medidor de humidade” e esperava-se 10 minutos para obter o valor da humidade do combustível seco ($H_{comb,seco}$), por secagem em estufa a uma temperatura de 105 °C. Com o valor obtido de humidade de combustível seco, calculava-se o valor de humidade do combustível (H_{comb}) numa folha de Excel de referência. Nessa mesma folha calculavam-se e registavam-se as massas necessárias de combustível para a mesa secundária de 1 m² e para a mesa de ensaios principal de 9 m². A carga considerada de combustível, para ambos os casos e para todos os ensaios, foi de 0.8 kg/m², o que corresponde a uma massa de combustível seco (M_{seco}) de 0,8 kg e 7,2 kg, respetivamente. Neste processo, foram utilizadas as equações (2.1) e (2.2), já implementadas na folha Excel:

$$H_{comb} = \frac{100 \times H_{comb,seco}}{100 - H_{comb,seco}} \quad (2.1)$$

$$M = M_{seco} + M_{seco} \times \frac{H_{comb}}{100} \quad (2.2)$$

onde M é a massa de combustível a distribuir em cada mesa, para cada ensaio.

2.2.2. Posicionamento e calibração da câmara

De seguida, procedia-se à preparação da mesa de ensaios. Para isso, recorria-se ao adequado posicionamento, perto da mesa, da câmara de infravermelhos, colocada em cima da plataforma móvel.

Posto isto, configurava-se a mesa para a geometria desejada: primeiro, com a mesa na horizontal ($\alpha = 0^\circ$), implementavam-se os ângulos δ_1 e δ_2 (Fig. 2.4); depois, quando fosse o caso, alterava-se o ângulo α (Fig. 2.5) para o valor pré-estabelecido para o ensaio. Refira-se que, em todos os testes no presente trabalho, existiu simetria geométrica

(relativamente à linha de interceção dos planos A e B) e que se respeitou sempre a condição $\delta_1 > \delta_2$, exceto em duas configurações de desfiladeiro simples ($\delta_1 = \delta_2$). A medição destes ângulos era feita manualmente com o posicionamento do inclinómetro digital – por debaixo dos painéis para medir δ_1 e δ_2 , e sensivelmente a meio do comprimento da mesa, de modo a coincidir mais ou menos com o seu ponto médio de rotação, em termos de α . Para cada ensaio registaram-se os valores medidos à centésima de grau.

Com a mesa na sua posição definitiva para cada ensaio, procedia-se ao próximo passo: ajuste do posicionamento adequado da câmara de infravermelhos e a sua calibração relativamente às faces da mesa. Primeiramente, a câmara era posicionada de modo a obter um bom enquadramento global da mesa e a focar o melhor possível as faces. Esta era uma fase bastante delicada e importante, conforme se concluiu dos primeiros ensaios exploratórios. A calibração tinha como objetivo o correto dimensionamento das faces; era feita por fotografia, em modo visível do próprio *software* da FLIR, usando a tábua-padrão em cima de cada face.

Com as fotografias registadas, verificava-se se o programa *Fire ROS Calculator* [Abouali (2017)] reconhecia de forma adequada os vértices dos quadrados da tábua-padrão, com erro dimensional aceitável² (Fig. 2.10). Caso isto não se verificasse, voltava-se a tirar as fotografias e/ou a ajustar a posição da câmara e/ou da plataforma móvel, de modo a obter



Figura 2.10 - Detecção adequada da tábua-padrão na face A (ensaio #17).

² No início deste estudo, este programa ainda estava em fase inicial de desenvolvimento. Por isso, para alguns testes, este processo de verificação apenas foi possível efetuar após a realização do ensaio, o que levou à necessidade de corrigir imagens em *Photoshop*, ou mesmo à repetição de testes.

um bom reconhecimento no programa. Após conclusão desta tarefa, voltava-se a colocar a mesa na sua posição inicial com todos os ângulos primários a 0°.

Refira-se que, com o objetivo de criar o ficheiro de calibração-padrão da câmara, foi feita uma sessão de registo de cerca de vinte fotos, reconhecidas pelo programa, com a tábua-padrão colocada aleatoriamente na mesa de ensaios em posição horizontal.

2.2.3. Determinação da velocidade de referência

Seguiam-se as pesagens do combustível, mediante os valores previamente calculados para cada uma das mesas. O combustível era então cuidadosamente distribuído e acamado de modo uniforme.

Os ensaios feitos na mesa secundária tinham como objectivo obter um valor para a velocidade de propagação de referência, R_0 . Após acamar o combustível, colocavam-se oito fios, presos nos pinos (marcadores laterais) da mesa e bem esticados, formando assim linhas paralelas separadas de 10 cm. Depois, embebia-se um fio de algodão em gasolina e fixava-se de modo semelhante, formando a primeira linha paralela a um dos lados, a 10 cm do bordo da mesa. Pegava-se fogo a essa linha embebida (Fig. 2.11) e, de seguida, procedia-se à contagem do tempo com um cronómetro, registando os instantes em que a linha de fogo formada atingia cada uma das linhas paralelas, distanciadas de 10 cm. Em cada ensaio, registava-se também os valores da temperatura e da humidade relativa do ar ambiente no laboratório.



Figura 2.11 - Exemplo do início de um teste na mesa secundária [imagem retirada de Gaspar (2016)].

2.2.4. Realização do ensaio

Após a realização deste teste, passava-se ao ensaio na mesa principal. Feita a distribuição do combustível, com os ângulos todos a zero, reposicionava-se a mesa com os ângulos da configuração geométrica do ensaio. Com o programa FLIR, antes de iniciar o teste, começava-se por gravar um vídeo de 2-3 segundos, com a câmara em modo *IR image*, numa gama baixa de temperatura, a fim de se obter uma referência visual da mesa. Seguiu-se o início da gravação vídeo termográfica, que é o meio principal de monitorização e medida neste estudo, usando a gama máxima de temperatura (300-1500 °C). Efetuava-se então a ignição numa bola de algodão embebida em gasolina, posicionada em cima da linha de água, a cerca de 50 cm do bordo inferior da mesa (ver Figura 2.3). O ensaio e a gravação em vídeo eram terminados quando o fogo alcançava um dos bordos da mesa ou num instante relevante para cada caso.

Após cada ensaio, a fim de garantir a segurança das pessoas e proporcionar um ambiente adequado à realização seguinte de outros testes, havia sempre a necessidade de renovar o ar no laboratório, acionando os ventiladores. Realça-se que todos os ensaios foram realizados em ambiente fechado, tentando ao máximo diminuir efeitos convectivos indesejados.

2.3. Metodologia analítica

Inicialmente foram realizados dois testes para este estudo utilizando o mesmo processo de análise usado por Gaspar (2016), com o programa *MicroStation95*. No entanto, sentiu-se a necessidade de evolução técnica para a análise de resultados, derivada da complexidade das configurações da mesa a estudar. Com a introdução do software *Fire ROS Calculator* - ainda em desenvolvimento por Abouali (2017) - foi possível fazer uma análise mais completa. Para cada ensaio, calcularam-se a velocidade de propagação de referência, R_0 , a velocidade média de propagação adimensional em cada direção, \bar{R}' , e as velocidades instantâneas adimensionais segundo cada direção, R' .

O primeiro passo era o cálculo da velocidade de referência, na mesa de 1 m². Com os tempos registados a cada avanço de 10 cm do fogo, num deslocamento total de 80 cm, este valor foi obtido, em Excel, pela função SLOPE.

2.3.1. Análise e ajustamento de *frames*

A determinação das velocidades de propagação segundo as várias direções foi feita usando o programa *Fire ROS Calculator*. Após a confirmação de uma boa calibração de todas as faces, procedeu-se à análise do vídeo sequencial de imagens termográficas, gravadas numa frequência de 15 Hz (intervalos de tempo de 0,067 segundos). Estabeleceu-se que o instante inicial de análise, $t = 0$ s, era quando a chama provocada pela ignição adquiria um diâmetro considerável (primeiro *frame* na Fig. 2.12). Considerando que, após o fogo ter atingido um dos bordos da mesa, a validade dos resultados se altera, em alguns casos o instante final de análise foi pouco depois disto ocorrer, enquanto que noutros a análise foi estendida até o combustível estar todo ardido.

Inicialmente, foi feita a análise de *frames* igualmente intervalados no tempo, desde o instante inicial até ao instante final do ensaio, usando o programa *ThermaCam* (Fig. 2.12). Em fases posteriores do estudo, este processo foi feito com o programa *Fire ROS Calculator*, numa versão mais atualizada, o que possibilitou a extração automática de *frames* a partir do vídeo sequencial do programa FLIR, indicando os tempos de início e fim de ensaio e o intervalo entre *frames* desejado.

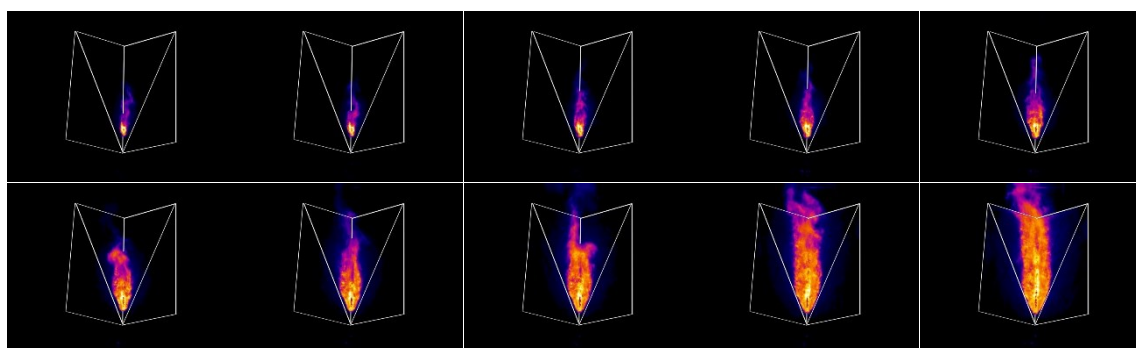


Figura 2.12 - Sequência de 10 *frames*, intervalados de 5 segundos (ensaio #17).

De seguida, efetuou-se o ajustamento das imagens de calibração das faces para o mesmo formato dos *frames*, sendo que estes e a gravação em si apresentaram sempre formato 640×480, enquanto as imagens de calibração, em modo visível, foram sempre de maior formato. Para tal, extraiu-se uma imagem de referência da mesa a partir do vídeo de referência, em formato 640×480, e conjugaram-se com essa as dimensões das imagens de calibração das faces, usando a opção “Match Images” do programa *Fire ROS Calculator*. Com as novas quatro imagens de calibração ajustadas, verificou-se de novo se estas estavam bem calibradas, repetindo este processo de ajustamento e/ou melhorando as imagens em *Photoshop*, sempre que necessário.

2.3.2. Análise do ensaio

Após todo este processo, procedia-se então à análise do ensaio com o programa *Fire ROS Calculator*, para cada face separadamente. Para isso, era necessário selecionar o ficheiro de calibração-padrão da câmara, os *frames* a analisar nessa face indicando o intervalo de tempo entre eles, a imagem de calibração correspondente à face, e delinear o triângulo de forma ajustada à face. Para a definição deste, usava-se a imagem de referência de teste e enunciavam-se as características dimensionais (comprimento, largura e ângulo) ou, caso isto não fosse viável, desenhava-se manualmente (opções “Fuel bed shape”: “Triangle” / “Draw shape manually”, Fig. 2.13).

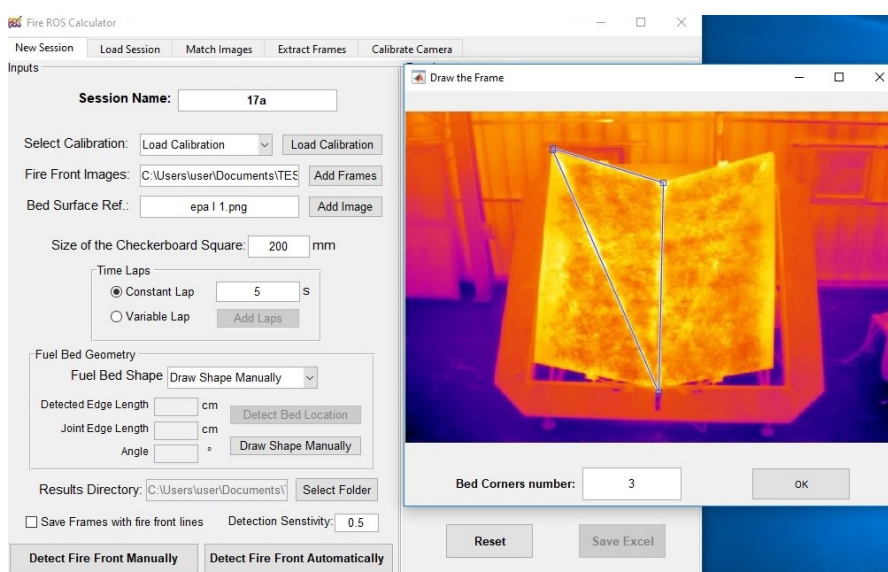


Figura 2.13 - Ilustração da definição da face A (ensaio #17).

Seguidamente, procedia-se à deteção manual da frente de fogo para cada *frame* (“Detect fire front manually”), desenhando curvas de contorno (Fig. 2.14). Teve-se em atenção que os fumos provocados pelo fogo não pertencem à frente. Numa versão mais recente do programa, o algoritmo permitiu para alguns ensaios a deteção automática da frente de fogo.

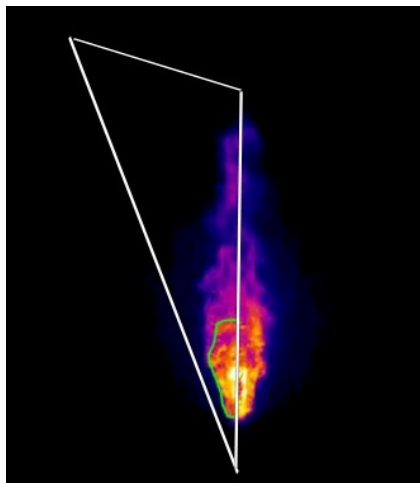


Figura 2.14 - Exemplo de deteção manual da frente de fogo para a face A, no *frame* 5 ($t=20s$), no ensaio #17.

Após detetar o contorno da frente de fogo para todos os *frames*, o programa permitia calcular os valores de deslocamento do fogo em cada instante e os valores de velocidade instantânea entre dois instantes consecutivos. Nesta fase, traçavam-se linhas segundo as direções a estudar para cada face e, pela opção “Calculate dynamic ROS”, o programa registava os valores em Excel. Na Figura 2.15 ilustra-se este procedimento para a direção S_3 na face A.

O último passo a efetuar no programa era a gravação de uma imagem com as linhas de contorno da frente de chama, traçadas para cada face. De modo a construir um mapa representativo da propagação do fogo no ensaio, em toda a mesa, juntavam-se os mapas das linhas de contorno das quatro faces, através do *Photoshop*. Estes mapas, para todos os ensaios realizados, encontram-se no Anexo C.

Refira-se que, nos casos de $\delta_2=0^\circ$, as faces A e B são coplanares, pelo que foram analisadas como um triângulo que representa conjuntamente as duas faces.

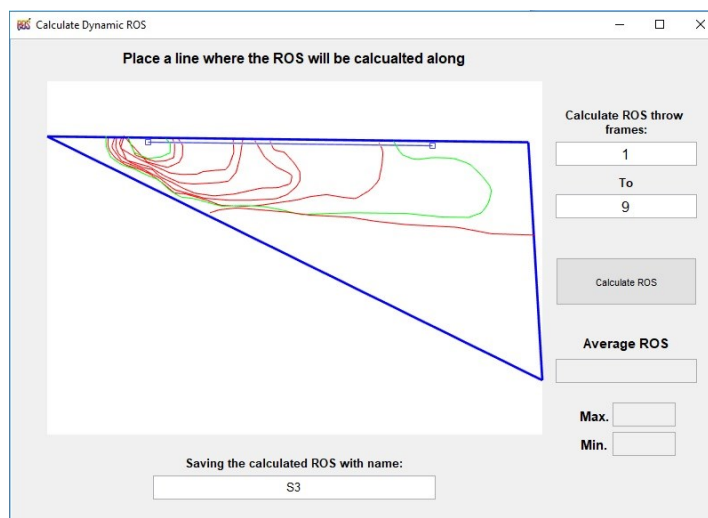


Figura 2.15 - Procedimento para a obtenção de valores segundo S_3 para a face A (ensaio #17)³.

2.3.3. Determinação das velocidades de propagação

Para o cálculo das velocidades de propagação do fogo em cada ensaio na mesa principal, calcularam-se os valores de deslocamento do fogo, D (mm), e os valores das velocidades instantâneas, R (mm/s), para cada face separadamente, nas cinco direções principais. Uma vez que as direções S_2 , S_3 , e S_4 são comuns a duas faces (Fig. 2.3), os deslocamentos e as velocidades de propagação nessas direções foram calculados como a média aritmética dos valores registados em ambas as faces:

$$D_2 = \frac{D_{2D} + D_{2B}}{2}; \quad R_2 = \frac{R_{2D} + R_{2B}}{2} \quad (2.3a)$$

$$D_3 = \frac{D_{3B} + D_{3A}}{2}; \quad R_3 = \frac{R_{3D} + R_{3B}}{2} \quad (2.3b)$$

$$D_4 = \frac{D_{4A} + D_{4C}}{2}; \quad R_4 = \frac{R_{4A} + R_{4C}}{2} \quad (2.3c)$$

³ Nesta etapa, a orientação da imagem apresentada pelo programa não corresponde à real da face. Por exemplo, neste caso, esta imagem é mais sugestiva da orientação da face B, do que da face A, em análise. Por isso, é necessária uma atenção redobrada para a identificação correta das direções.

Na folha de cálculo em Excel, os deslocamentos D foram registados para os instantes correspondentes aos *frames*, t_i , e as velocidades instantâneas R registaram-se para o instante médio de cada intervalo de tempo, $(t_i + t_{i+1})/2$, sendo $i \in [1,2,3 \dots]$ o número do *frame* ⁴.

A partir dos valores obtidos dos deslocamentos, obtiveram-se os valores médios da velocidade de propagação, \bar{R} , em cada direção, pela função SLOPE do Excel. Estes valores foram adimensionalizados com a velocidade de referência, R_0 , previamente calculada:

$$\bar{R}' = \frac{\bar{R}}{R_0} \quad (2.4)$$

Obtiveram-se assim os valores adimensionalizados das velocidades médias \bar{R}_1' , \bar{R}_2' , \bar{R}_3' , \bar{R}_4' e \bar{R}_5' . Uma vez que a geometria da mesa é simétrica relativamente à linha de água, considerou-se para análise a média aritmética dos valores obtidos para as direções conjuntas (S₁, S₅) e (S₂, S₄):

$$\overline{\bar{R}_1 \bar{R}_5}' = \frac{\bar{R}_1' + \bar{R}_5'}{2} \quad (2.5)$$

$$\overline{\bar{R}_2 \bar{R}_4}' = \frac{\bar{R}_2' + \bar{R}_4'}{2} \quad (2.6)$$

Estes valores foram calculados para todo o tempo possível de análise em cada direção. Porém, para efeitos de comparação entre as várias direções, foram também calculados num intervalo de tempo comum a todas elas e até de ser atingido um dos bordos da mesa.

⁴ Por exemplo, no caso do ensaio 17, o intervalo de tempo considerado foi de 5 s. Assim, sendo $D(t_1 = 0) = 0$ mm e o primeiro deslocamento registado para $t_2 = 5$ s, a primeira velocidade instantânea calculada foi aos 2,5 segundos.

Para efeitos de representação gráfica da evolução global do fogo nas várias direções, foi feito um tratamento semelhante para obter os valores adimensionais das velocidades instantâneas:

$$R' = \frac{R}{R_0} \quad (2.7)$$

$$R_1 R_5' = \frac{R_1' + R_5'}{2} \quad (2.8)$$

$$R_2 R_4' = \frac{R_2' + R_4'}{2} \quad (2.9)$$

No Anexo B, apresentam-se graficamente as velocidades $R_1 R_5'$, $R_2 R_4'$ e R_3' para cada ensaio. No capítulo seguinte, são feitas comparações de cada uma destas velocidades obtidas nos diferentes ensaios.

3. RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se inicialmente os resultados dos ensaios realizados para obter a velocidade de referência, R_0 . Seguidamente é feita a análise das velocidades médias adimensionais, \bar{R}' , e das velocidades instantâneas adimensionais, R' , para as diversas geometrias estudadas (Tabela 2.1).

3.1. Velocidade de referência

Na Tabela 3.1 apresentam-se os valores obtidos para a velocidade de referência, R_0 , nos 22 ensaios realizados, bem como os valores da humidade do combustível, e da temperatura e da humidade relativa do ar registados em cada ensaio. Os valores de R_0 obtidos variaram entre 2,39 mm/s e 3,93 mm/s.

Tabela 3.1- Ensaios realizados e resultados obtidos para R_0 .

Ensaio	Data	Hora	T _{ar} [°C]	HR [%]	H _{comb} [%]	R ₀ [mm/s]
1	16/03/2017	12:05	21,5	32	10,43	3,75
2	16/03/2017	14:00	25,5	26	10,87	3,93
3	16/03/2017	15:03	25,7	25	11,61	3,82
4	16/03/2017	15:48	24,8	26	10,74	3,82
5	21/04/2017	12:20	21,6	28	10,82	3,88
6	17/07/2017	11:50	30,6	41	14,42	3,41
7	17/07/2017	14:30	34,5	31	10,25	2,89
8	09/06/2017	15:30	29,5	37	11,86	2,63
9	17/07/2017	15:30	35	31	8,80	3,22
10	09/06/2017	16:30	29,5	37	11,11	3,29
11	23/06/2017	12:45	34,4	29	12,11	2,87
12	10/05/2017	14:30	18,3	68	15,74	2,43
13	10/05/2017	15:45	17,9	71	14,94	2,85
14	23/06/2017	15:10	32,3	30	10,62	2,49
15	26/06/2017	11:30	26,5	40	13,90	2,39
16	05/06/2017	14:20	25,5	37	13,25	2,46
17	29/05/2017	15:45	27,5	49	13,02	2,70
18	05/06/2017	15:00	26,1	35	16,09	2,46
19	26/06/2017	12:10	26,9	42	11,98	2,73
20	10/05/2017	14:00	18,8	68	15,34	2,94
21	26/06/2017	13:50	27,8	41	11,24	2,78
22	26/06/2017	14:50	28	40	9,41	3,24

3.2. Velocidades médias adimensionais

Os valores calculados para as velocidades médias adimensionais nas diferentes direções são apresentados na Tabela 3.2, para um intervalo comum a todas as direções e até ser atingido um bordo da mesa.

De um modo geral, nos ensaios em que $\alpha=0^\circ$ (ensaios de 1 a 7), verificou-se que $\overline{R_1R_5}'$ apresentou maiores valores que $\overline{R_2R_4}'$ e $\overline{R_3}'$. Por sua vez, nos ensaios de 8 a 11 ($\alpha=20^\circ$), verifica-se que as velocidades $\overline{R_2R_4}'$ e $\overline{R_3}'$ são superiores a $\overline{R_1R_5}'$, sendo $\overline{R_2R_4}'$ um pouco maior que $\overline{R_3}'$. Já nos ensaios com $\alpha=30^\circ$ (12 a 16), as velocidades $\overline{R_2R_4}'$ e $\overline{R_3}'$ apresentam valores de nível semelhante, bastante superiores aos de $\overline{R_1R_5}'$. Com a mesa na sua máxima inclinação ($\alpha=40^\circ$) a velocidade de propagação preponderante foi segundo a linha de água, $\overline{R_3}'$.

Tabela 3.2 - Velocidades médias adimensionais para todos os ensaios.

Ensaio	$\overline{R_1R_5}'$	$\overline{R_2R_4}'$	$\overline{R_3}'$
1	0,89	0,85	0,76
2	1,19	1,16	1,00
3	1,51	0,84	0,72
4	2,59	1,54	1,13
5	2,59	1,03	0,75
6	5,29	1,29	1,21
7	6,70	1,95	1,75
8	1,39	2,60	3,26
9	2,41	4,05	3,94
10	2,80	4,65	3,37
11	4,61	6,18	5,45
12	1,65	4,88	5,11
13	1,22	4,44	5,71
14	3,73	9,71	7,36
15	3,24	18,62	17,28
16		17,29	21,05
17			16,54
18			12,14
19	3,17	9,78	12,47
20		4,50	15,26
21	1,67	5,82	10,81
22	1,21	3,45	7,32

Apresentam-se seguidamente as comparações destes valores em função dos parâmetros geométricos das configurações estudados nos 22 ensaios (Tabela 2.1).

Genericamente, observa-se que a velocidade $\overline{R_1 R_5}'$ aumenta com o declive, θ_1 , segundo as direções S_1 e S_5 (Fig. 3.3).

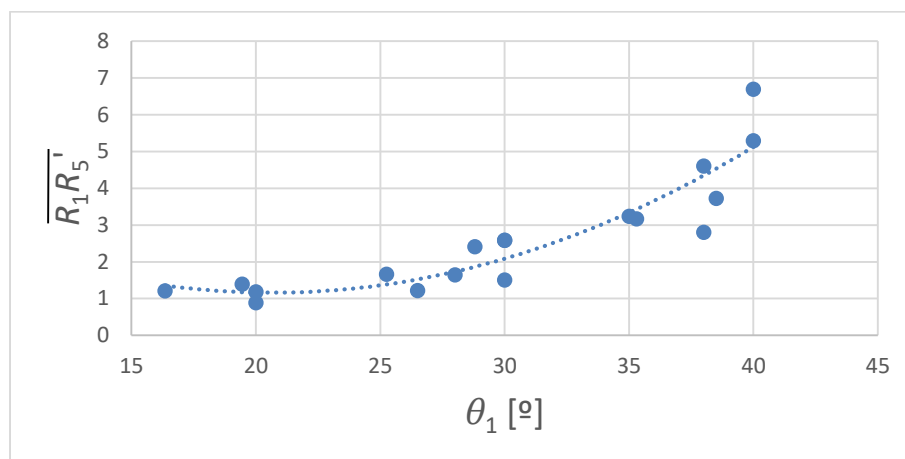


Figura 3.3 - Influência de θ_1 em $\overline{R_1 R_5}'$.

Nas Figuras 3.4 e 3.5, agruparam-se os resultados dos ensaios com iguais valores dos conjuntos de parâmetros (δ_1, δ_2) e de (γ_2, γ_3) – esses conjuntos de ensaios são (1,8,22), (2,5), (3, 12, 21), (4, 9, 13, 20), (6, 10, 15, 18), (7, 11, 16, 17) e (14, 19) – ver Tabela 2.1.

Pela Figura 3.4, verifica-se que as velocidades $\overline{R_2 R_4}'$ aumentam com o declive θ_2 para a maioria das configurações. Comparando conjuntos de ensaios com o mesmo ângulo de abertura γ_3 entre as faces A e B ($\gamma_3=180^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$), verifica-se também que a diminuição da abertura γ_2 provoca um aumento da velocidade. Por outro lado, comparando os conjuntos com o mesmo valor de γ_2 ($\gamma_2=157,5^\circ$ e $\gamma_2=168^\circ$), observa-se um aumento da velocidade com a diminuição de γ_3 . Pode pois concluir-se que quer a diminuição de γ_2 como a de γ_3 provoca o aumento da velocidade $\overline{R_2 R_4}'$, de forma mais acentuada para maiores declives θ_2 .

A Figura 3.5 mostra que as velocidades médias de propagação segundo a linha de água, $\overline{R_3}'$, aumentam com o aumento do seu declive ($\alpha=\theta_3$). Fazendo comparações semelhantes neste caso, a velocidade $\overline{R_3}'$ aumenta com as diminuições de γ_2 e de γ_3 , particularmente para valores mais elevados do declive θ_3 .

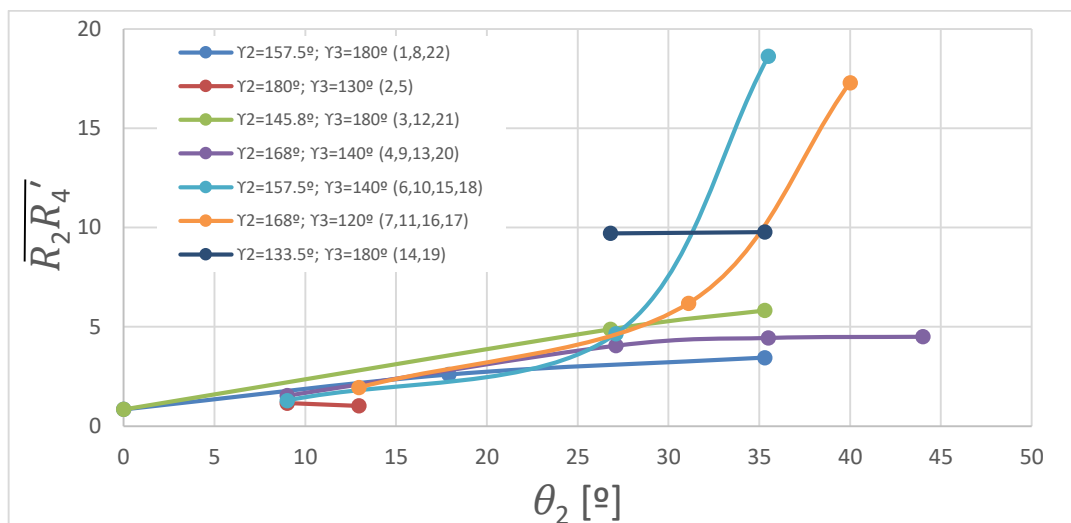


Figura 3.4 - Influência de θ_2 , γ_2 e γ_3 em $\overline{R_2R_4'}$.

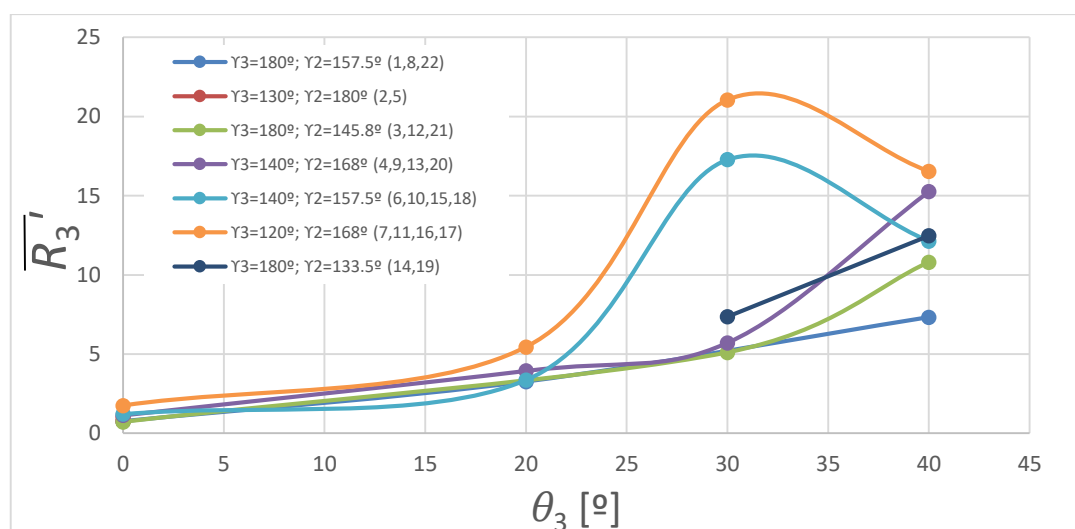


Figura 3.5 - Influência de θ_3 , γ_2 e γ_3 em $\overline{R_3'}$.

3.3. Velocidades instantâneas adimensionais

Para um total de 22 ensaios realizados, apresentam-se no Anexo B as representações gráficas da evolução das velocidades instantâneas adimensionais nas diferentes direções. Nesses gráficos optou-se por assinalar com uma linha a tracejado o

instante em que a frente de fogo atinge um bordo da mesa. De seguida, apresenta-se a análise dos resultados para os grupos de ensaios com o mesmo valor de α .

3.3.1. $\alpha = 0^\circ$

Na generalidade destes casos (ensaios de 1 a 7), com a mesa horizontal, verificou-se que os valores da velocidade de propagação nas direções laterais (R_1R_5') foram bastante mais elevados relativamente às restantes direções. Isto é evidente na Figura 3.6 e deve-se ao facto de o ângulo de declive nestas direções (θ_1) ser sempre significativamente superior aos ângulos de declives de R_2R_4' (θ_2) e de R_3' (θ_3), como se pode verificar na Tabela 2.1.

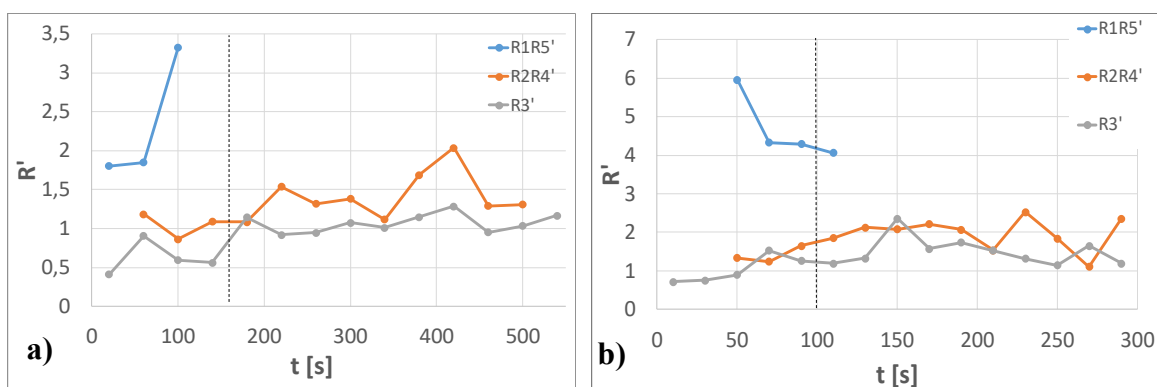


Figura 3.6 - Velocidades instantâneas adimensionais de propagação do fogo: **a)** no ensaio 5 ($\alpha=0^\circ, \delta_1=30^\circ$ e $\delta_2=30^\circ$) e **b)** no ensaio 6 ($\alpha=0^\circ, \delta_1=40^\circ$ e $\delta_2=20^\circ$).

3.3.1.1 Velocidade R_1R_5'

Inicialmente, compararam-se ensaios com o mesmo valor de δ_2 e diferentes valores de δ_1 : ensaios (1,3) em que $\delta_2=0^\circ$ (Fig. 3.7a), ensaios (2, 4, 6) com $\delta_2=20^\circ$ (Fig. 3.7b) e ensaios (5,7) com $\delta_2=30^\circ$ (Fig. 3.7c). Nestas comparações os parâmetros geométricos que variaram, para além de δ_1 , foram θ_1 e γ_2 . Verifica-se que a velocidade de propagação R_1R_5' é maior quanto maior for o valor de θ_1 e menor for γ_2 (ângulo de abertura entre os conjuntos de faces (A, C) e (B, D)).

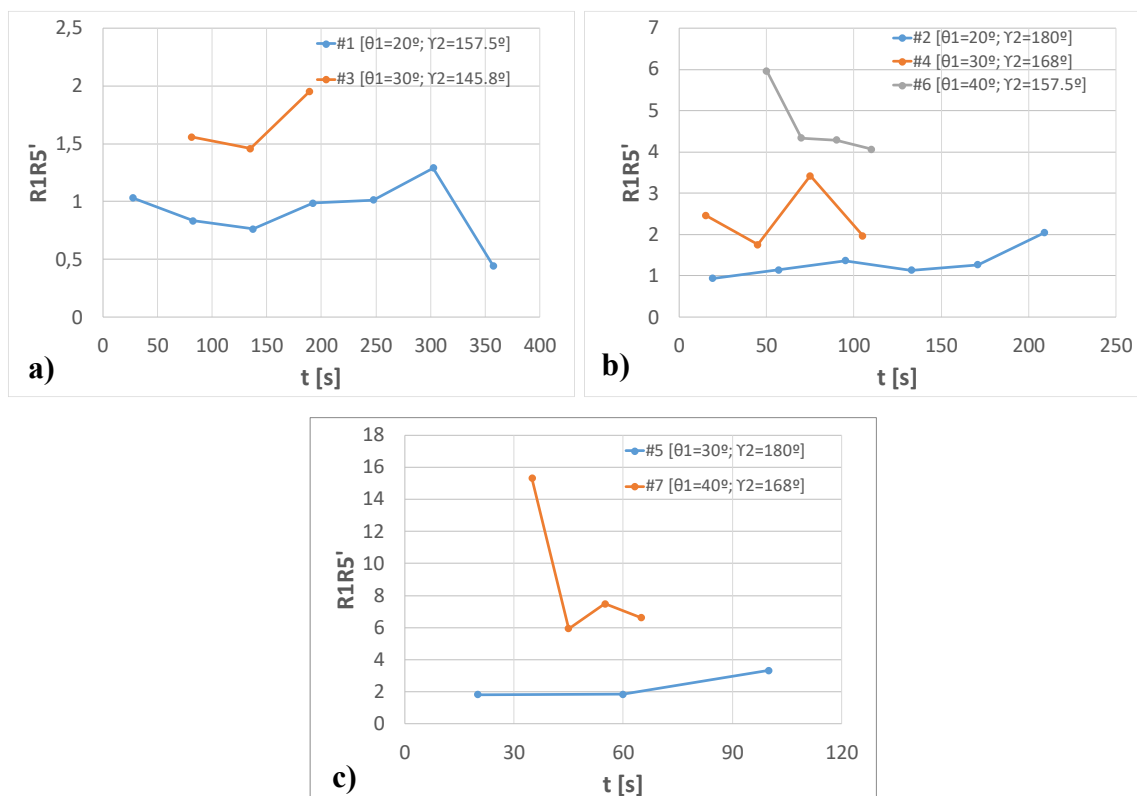
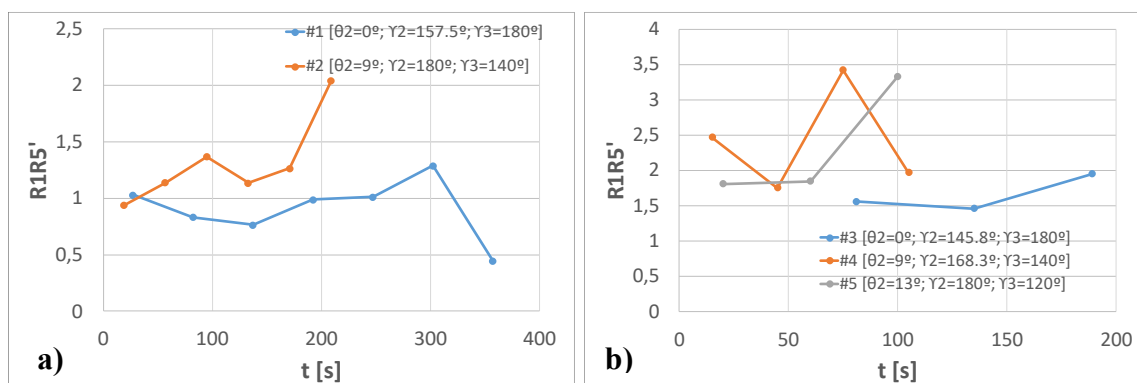


Figura 3.7 - Comparação das velocidades de propagação R_1R_5' entre ensaios com valores comuns de valor de δ_2 : **a)** $\delta_2=0^\circ$ ($\theta_2=0^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$); **b)** $\delta_2=20^\circ$ ($\theta_2=9^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$); e **c)** $\delta_2=30^\circ$ ($\theta_2=12.95^\circ$ e $\gamma_3=120^\circ$).

De seguida, comparam-se os ensaios com o mesmo valor de δ_1 , variando δ_2 : ensaios (1,2) com $\delta_1=20^\circ$ (Fig. 3.8a), ensaios (3,4,5) com $\delta_1=30^\circ$ (Fig. 3.8b) e ensaios (6,7) com $\delta_1=40^\circ$ (Fig. 3.8c). Nestes casos houve variação de θ_2 , γ_2 e γ_3 . Em geral observa-se um ligeiro aumento da velocidade de propagação R_1R_5' essencialmente com o aumento de θ_2 , apesar de também haver um ligeiro aumento da abertura γ_2 .



(legenda na página seguinte)

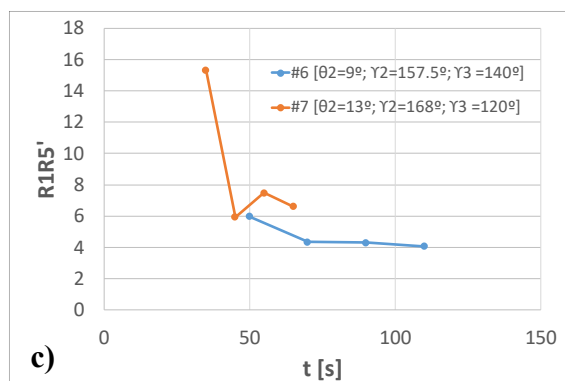


Figura 3.8 - Comparação das velocidades de propagação R_1R_5' entre ensaios com valores comuns de valor de δ_1 : **a)** $\delta_1=\theta_1=20^\circ$; **b)** $\delta_1=\theta_1=30^\circ$; e **c)** $\delta_1=\theta_1=40^\circ$.

3.3.1.2 Velocidade R_2R_4'

De igual modo, apresenta-se na Figura 3.9. as comparações para os mesmos conjuntos de ensaios relativamente à velocidade de propagação R_2R_4' .

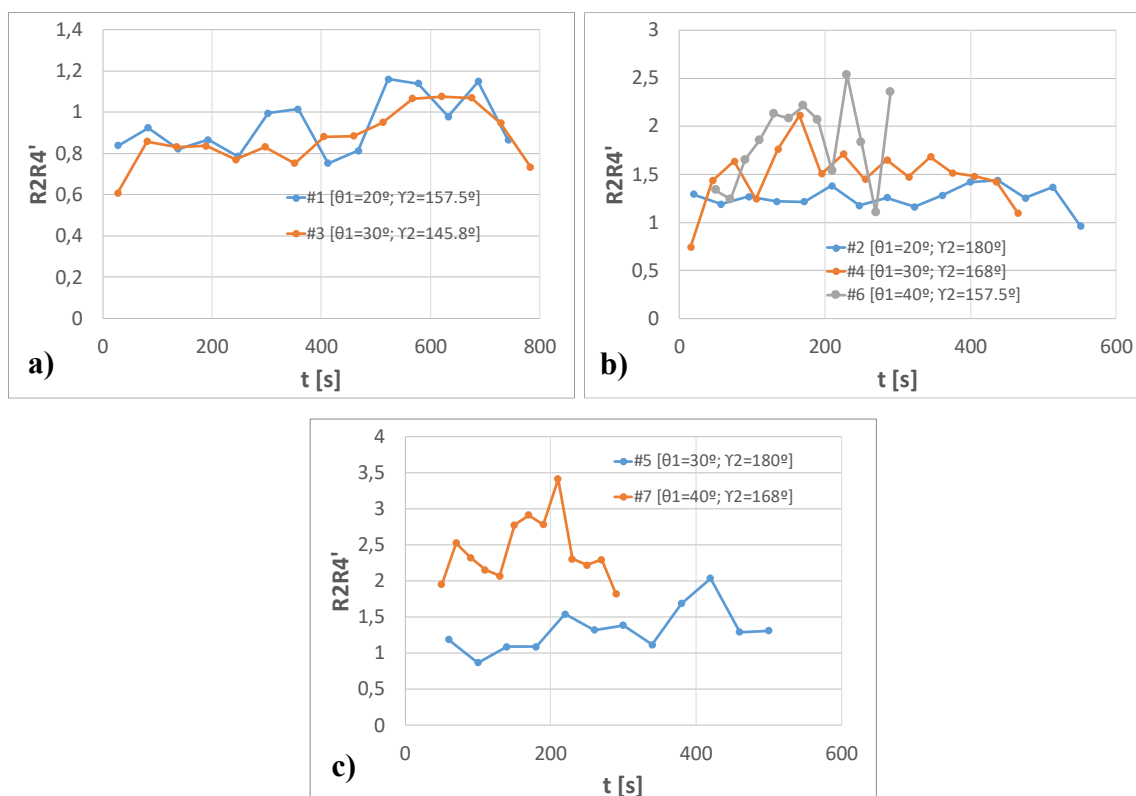


Figura 3.9 - Comparação das velocidades de propagação R_2R_4' entre ensaios com valores comuns de valor de δ_2 : **a)** $\delta_2=0^\circ$ ($\theta_2=0^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$); **b)** $\delta_2=20^\circ$ ($\theta_2=9^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$); e **c)** $\delta_2=30^\circ$ ($\theta_2=13^\circ$ e $\gamma_3=120^\circ$).

Pela Figura 3.9a, verifica-se que, com $\gamma_3=180^\circ$ (faces A e B horizontais e declives nulos, $\theta_2=0^\circ$), o ângulo de abertura γ_2 tem pouca influência. Por outro lado, comparando as figuras 3.9b e c, observa-se que a velocidade R_2R_4' é maior quanto menor for o ângulo de abertura γ_2 , sendo mais notório quanto menor for o valor de γ_3 e maior o declive θ_2 . A figura 3.10 mostra que a diminuição de γ_3 tem pouca influência nestas velocidades para $\gamma_2=180^\circ$ (duplo desfiladeiro simples) e que, com $\gamma_2=168^\circ$, já se verifica um aumento significativo.

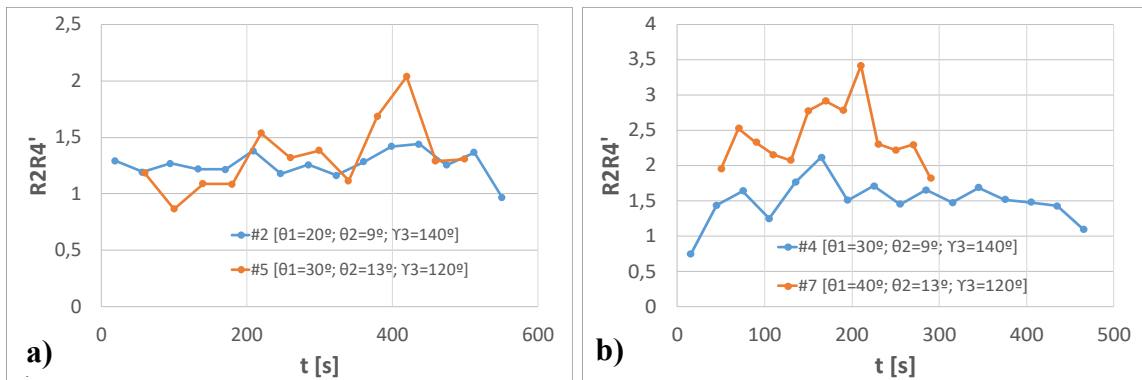
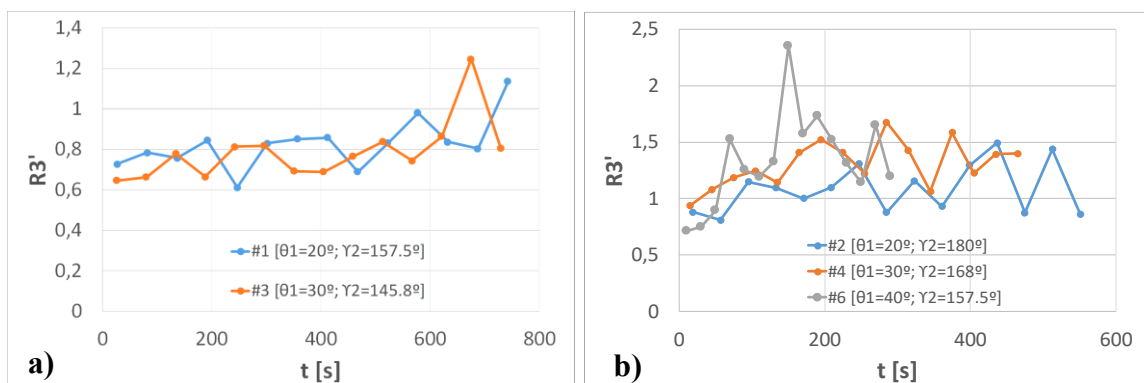


Figura 3.10 - Comparações de ensaios: a) $\gamma_2=180^\circ$ (desfiladeiros simples) e b) $\gamma_2=168^\circ$.

3.3.1.3 Velocidade R_3'

Para a velocidade de propagação na direção da linha de água, apresenta-se uma análise semelhante na figura 3.11.



(legenda na página seguinte)

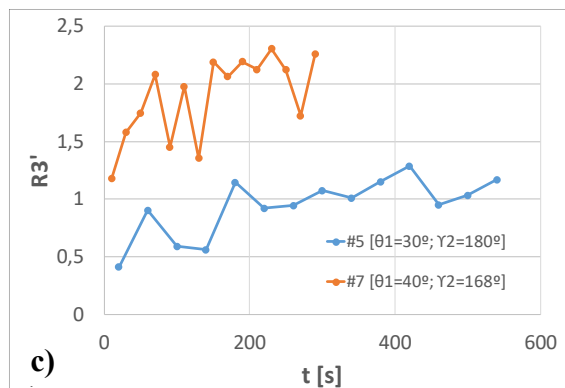


Figura 3.11 - Comparação das velocidades de propagação R_3' , entre ensaios com valores comuns de valor de δ_2 : **a)** $\delta_2=0^\circ$ ($\theta_2=0^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$); **b)** $\delta_2=20^\circ$ ($\theta_2=9^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$); e **c)** $\delta_2=30^\circ$ ($\theta_2=13^\circ$ e $\gamma_3=120^\circ$).

Tal como para R_2R_4' , esta velocidade apresenta maiores valores com o decréscimo de γ_2 , efeito mais intenso para valores de γ_3 mais baixos e praticamente impercetível para $\gamma_3=180^\circ$.

Em comparações de ensaios com o mesmo valor de γ_2 , verificou-se que o decréscimo de γ_3 em casos de duplo-desfiladeiro simples (ensaios 2 e 5, $\gamma_2=180^\circ$) pouco alterou a velocidade R_3' . No entanto, para duplos desfiladeiros de configuração mais complexa, verificaram-se valores significativamente maiores de R_3' para menores valores de γ_3 (Fig. 3.12).

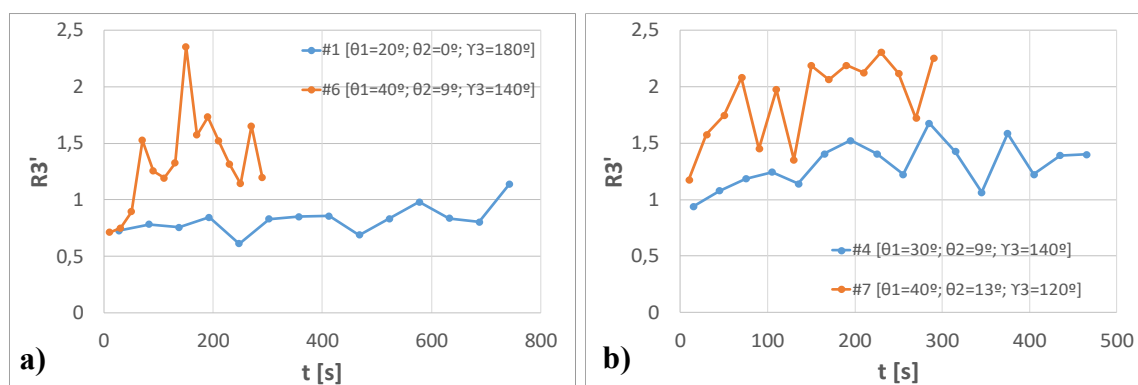


Figura 3.12 - Comparações de ensaios: **a)** $\gamma_2=157,5^\circ$ e **b)** $\gamma_2=168^\circ$.

3.3.2 $\alpha = 20^\circ$

Para este conjunto de ensaios (8 a 11), com um declive de 20° graus da linha de água, a velocidade de propagação segundo as direções S_1 e S_5 foi geralmente mais baixa que nas restantes direções. R_2R_4' apresentou valores próximos de R_3' nos ensaios 8 e 9 e valores maiores nos ensaios 10 e 11 (ver Anexo B). Estes ensaios, por serem apenas quatro, vão ser comparados graficamente em conjunto.

3.3.2.1 Velocidade R_1R_5'

Observando a Figura 3.13, verifica-se que a velocidade R_1R_5' aumenta com o aumento dos declives θ_1 e θ_2 e com a diminuição do ângulo de abertura γ_3 , com maior destaque no ensaio 11. A conjugação destes fatores resulta numa velocidade R_1R_5' muito superior, associado às intensas trocas de calor por convecção e radiação entre as chamas e o combustível não ardido.

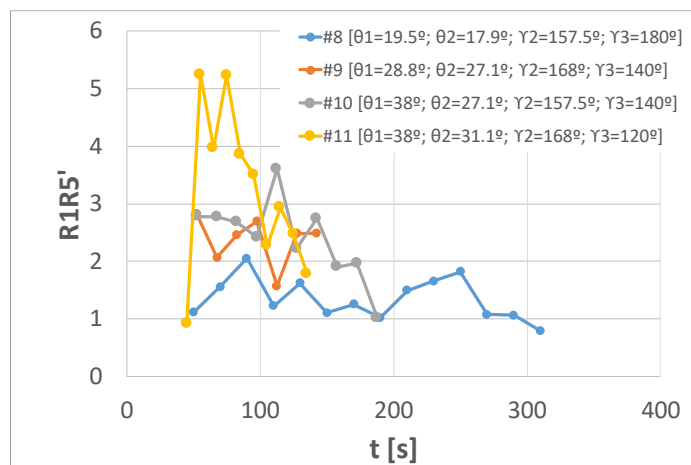


Figura 3.13 - Comparação dos ensaios 8, 9, 10 e 11, para R_1R_5' .

3.3.2.2 Velocidades R_2R_4' e R_3'

Na Figura 3.14a nota-se que os valores de R_2R_4' pouco variaram entre os ensaios 9 e 10. Considerando que estes apresentam o mesmo valor de θ_2 e γ_3 , pode concluir-se que a diminuição do valor de abertura de γ_2 em cerca de 10° , não foi, nestes casos,

suficientemente significativa para alterar a velocidade nestas direções. No entanto, nota-se que, comparando os ensaios com o mesmo valor de γ_2 - ensaios (8,10) com $\gamma_2=157.5^\circ$ e ensaios (9,11) com $\gamma_2=168^\circ$ - a velocidade R_2R_4' aumenta com o aumento do declive θ_2 e com a diminuição da abertura γ_3 . Em particular, no ensaio 11, com o maior declive θ_2 e a menor abertura γ_3 , verifica-se um comportamento imprevisível da velocidade segundo estas direções, o que sugere a ocorrência do fenómeno de erupção de fogo.

Este comportamento foi também registado para a velocidade R_3' - segundo a linha de água - em que menores valores de γ_3 provocam uma maior convergência das correntes de convecção induzidas pelo fogo nesta direção e consequente aumento de R_3' (Fig 3.14b), verificando-se erupção do fogo com $\gamma_3=120^\circ$ (ensaio 11).

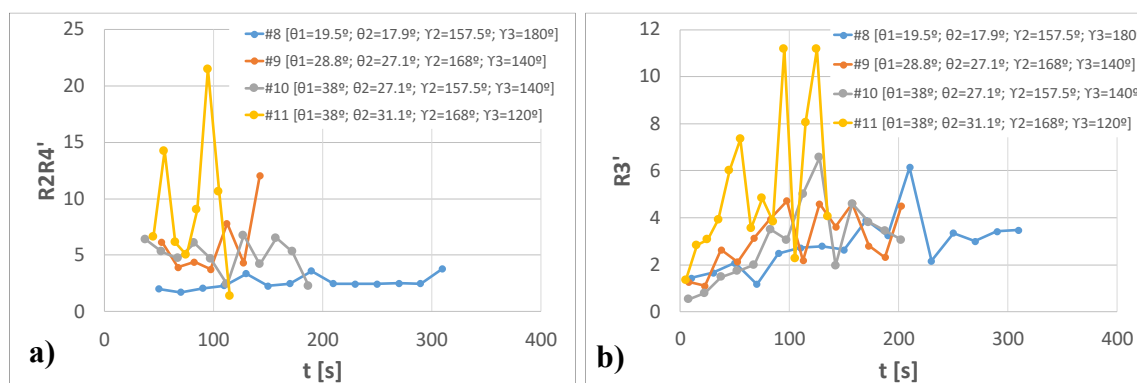


Figura 3.14 - Comparação dos ensaios 8, 9, 10 e 11, para a) R_2R_4' e b) R_3' .

3.3.3 $\alpha = 30^\circ$

Deve referir-se que, como se pode verificar pelos mapas de propagação (Anexo C), os ensaios 13, 14, 15 e 16 apresentaram uma maior velocidade segundo S_4 que S_2 . Havendo simetria relativamente à linha de água, este fenómeno pode estar associado a vários fatores, tais como: possível rotação da mesa; existência de correntes convectivas indesejadas (eg.: abertura de portas e/ou portões); combustível mal distribuído. De qualquer forma, analisaram-se estas direções em conjunto, conforme referido na metodologia analítica.

Genericamente, em todos os ensaios com α igual ou superior a 30° , verificou-se que a velocidade de propagação R_1R_5' é claramente inferior relativamente às outras

velocidades. Isto deve-se ao facto de, com um valor de $\alpha \geq 30^\circ$, a tendência natural do fogo ser propagar-se em direção ao topo da mesa em detrimento das direções laterais.

Assim, para os ensaios com $\alpha=30^\circ$ (ensaio 12 a 16), analisam-se apenas as velocidades R_2R_4' e R_3' , que manifestam uma evolução semelhante com tendência de valores crescentes ao longo dos ensaios, atingindo valores muito elevados.

3.3.3.1 Velocidade R_2R_4'

Pela Figura 3.15, conclui-se que, em conjuntos de ensaios com o mesmo θ_2 e mesmo γ_3 , a diminuição da abertura de γ_2 segundo estas direções, provoca um aumento da velocidade R_2R_4' , devido a uma maior convergência dos pares de faces (A, C) e (B, D) e consequente intensificação das trocas de calor entre elas.

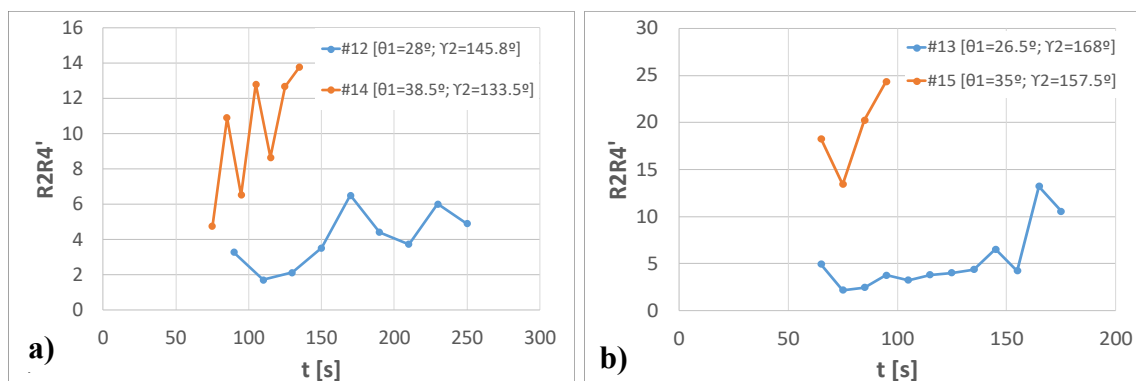


Figura 3.15 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_2R_4' para pares de ensaios com: **a)** $\theta_2=26,8^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$ e **b)** $\theta_2=35,5^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$.

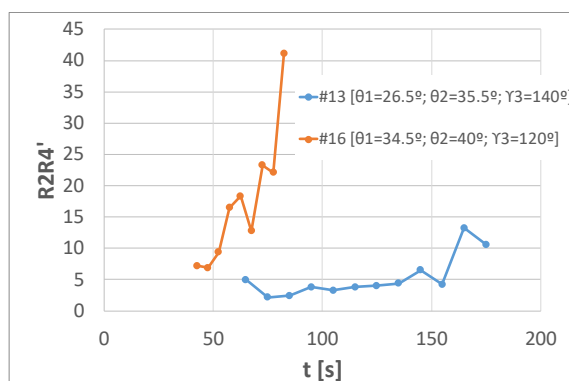


Figura 3.16 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_2R_4' , com $\gamma_2=168^\circ$.

Por seu turno, para o mesmo valor de abertura $\gamma_2=168^\circ$, nota-se que a diminuição da abertura γ_3 (e aumento do declive θ_2) provoca um claro aumento da velocidade segundo estas direções (Figura 3.16). Isto pode ser explicado principalmente pela intensificação da convecção e das trocas de radiação entre as superfícies.

3.3.3.2 Velocidade R_3'

Pela Figura 3.17, verifica-se que a velocidade R_3' aumenta com a diminuição de γ_2 , porém de forma menos pronunciada do que a velocidade R_2R_4' .

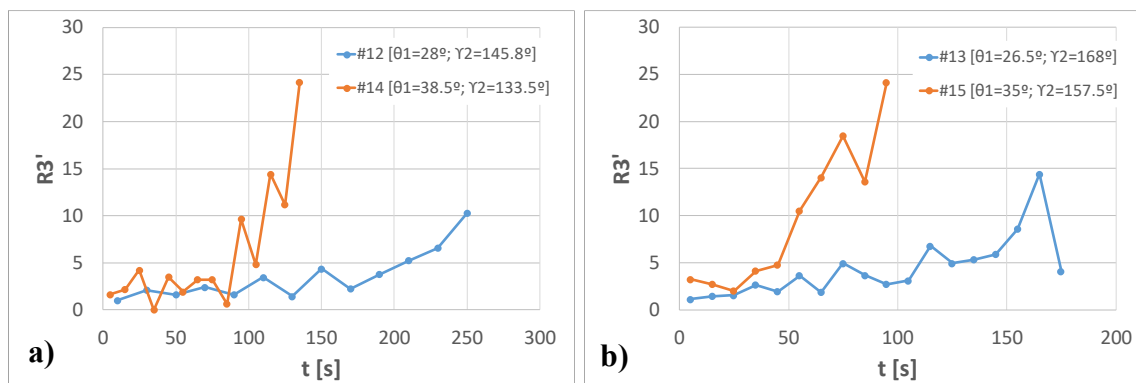


Figura 3.17 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_3' para pares de ensaios com: a) $\theta_2=26,8^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$ e b) $\theta_2=35,5^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$.

Para o mesmo valor de abertura $\gamma_2=168^\circ$, nota-se que a diminuição da abertura γ_3 provoca um aumento muito significativo da velocidade R_3' , o que pode ser explicado pelos intensos ventos convectivos induzidos pelo fogo devido a uma grande convergência deste segundo esta direção (Fig. 3.18).

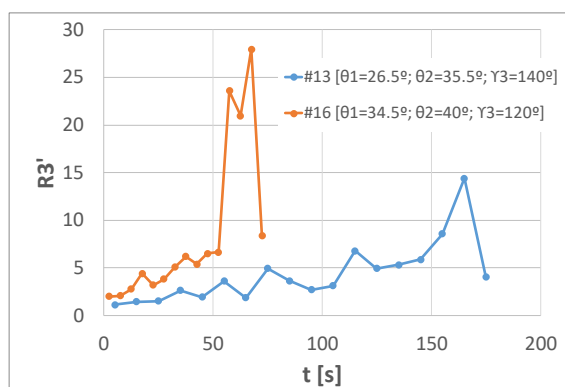


Figura 3.18 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_3' , com $\gamma_2=168^\circ$.

Para todos estes ensaios verificou-se a ocorrência de erupção de fogo segundo as direções S_2 , S_4 e S_3 , mais intensamente nos ensaios 15 e 16.

3.3.4 $\alpha = 40^\circ$

No conjunto destes seis ensaios (17 a 22), à exceção do ensaio 19, os valores da velocidade R_3' foram superiores aos de R_2R_4' , com a frente de fogo a atingir rapidamente o bordo superior da mesa, em muitos casos. Tal como nos ensaios com $\alpha=30^\circ$, verificou-se o fenómeno de fogo eruptivo com grande intensidade, em todos estes ensaios (ver Anexo B).

3.3.4.1 Velocidade R_3'

Pela Figura 3.19a percebe-se que, quando o ângulo de abertura entre as faces A e B é $\gamma_3=140^\circ$, os valores da velocidade de propagação R_3' são tanto maiores quanto menor for o ângulo de abertura γ_2 . No entanto, nos casos em que $\gamma_3=180^\circ$, essa influência de γ_2 é menos significativa (Fig. 3.19b). O efeito mais intenso de trocas de calor provocado pelo maior fecho dos pares de faces (A,C) e (B,D) pode estar na origem deste aumento de velocidade.

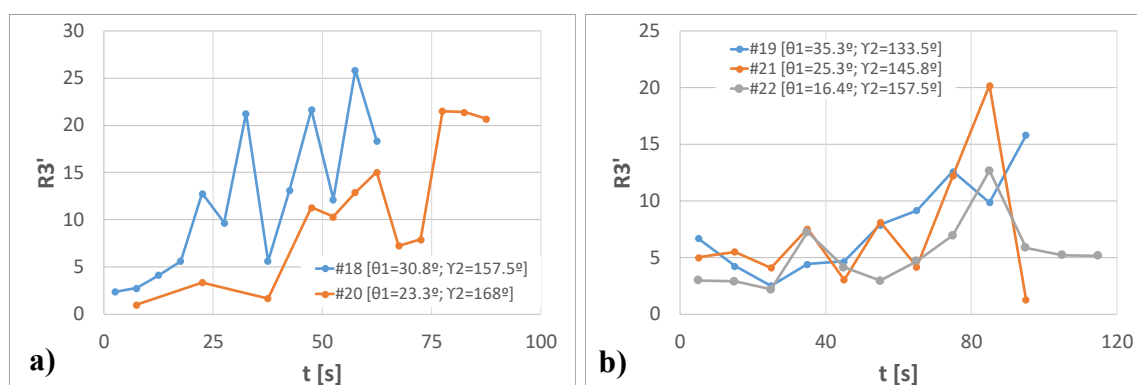


Figura 3.19 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_3' . para pares de ensaios com: a) $\theta_2=44^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$ e b) $\theta_2=35,3^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$.

Por outro lado, verifica-se pela Figura 3.20, que, em casos de igual valor de γ_2 , a menor abertura entre as faces A e B (γ_3) causa um aumento significativo da velocidade de propagação segundo S_3 . Sendo que nas comparações na Fig. 3.19 a variação de γ_2 é menor

do que a variação de γ_3 na Fig. 3.20, a diminuição de qualquer um destes ângulos pode ser igualmente importante para o aumento intenso da velocidade de propagação ao longo da linha de água.

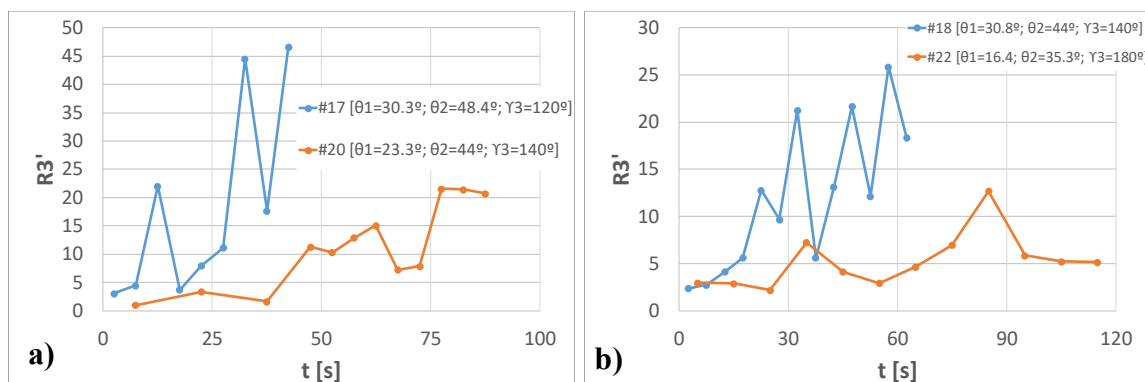


Figura 3.20 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_3' , com: a) $\gamma_2=168^\circ$ e b) $\gamma_2=157,5^\circ$.

3.3.4.2 Velocidade R_2R_4'

De modo análogo, conclui-se que a velocidade segundo S_2 e S_4 aumenta significativamente com a diminuição da abertura γ_2 , visto que a convergência das correntes de convecção induzidas pelo fogo nessas direções é então maior (Fig. 3.21). Este efeito é mais notório quando $\gamma_3=140^\circ$.

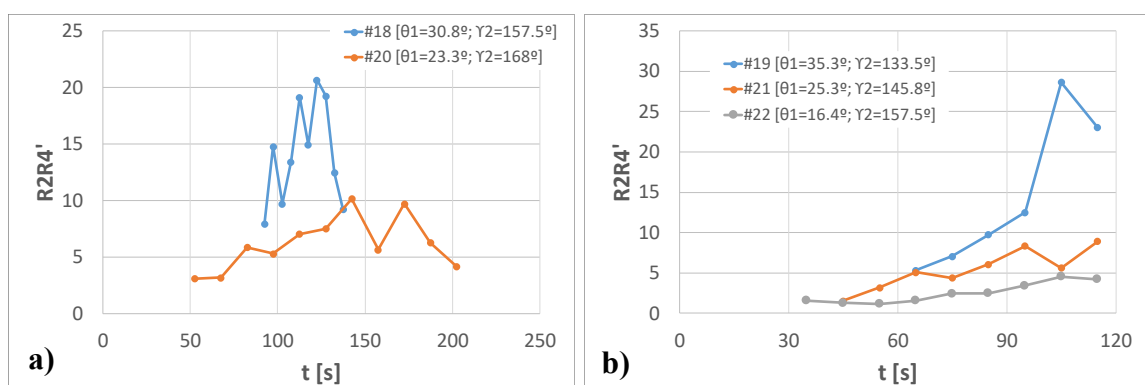


Figura 3.21 - Influência de γ_2 sobre a velocidade R_2R_4' para pares de ensaios com: a) $\theta_2=44^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$ e b) $\theta_2=35,3^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$.

Para iguais valores de abertura γ_2 , resulta que a velocidade de propagação R_2R_4' é substancialmente maior com menor valores de abertura γ_3 (Fig. 3.22). Verifica-se, assim,

que ambos os ângulos de abertura γ_2 e γ_3 são relevantes para a velocidade de propagação segundo as direções S_2 e S_4 .

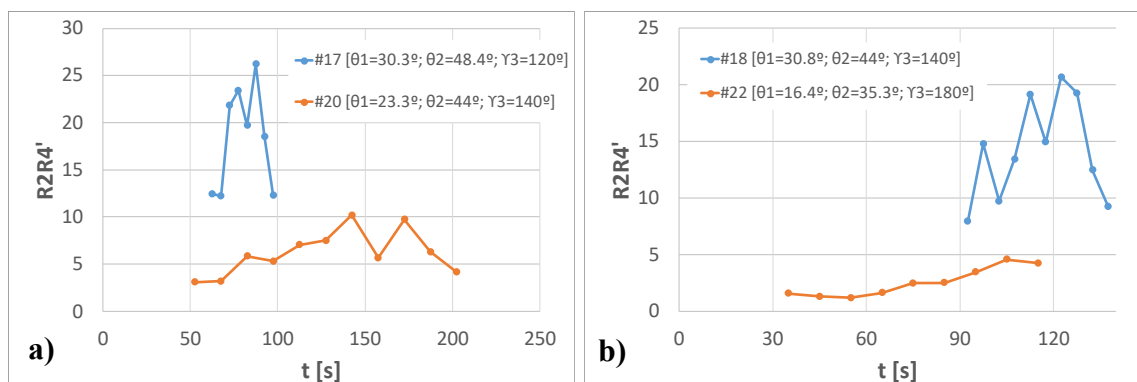
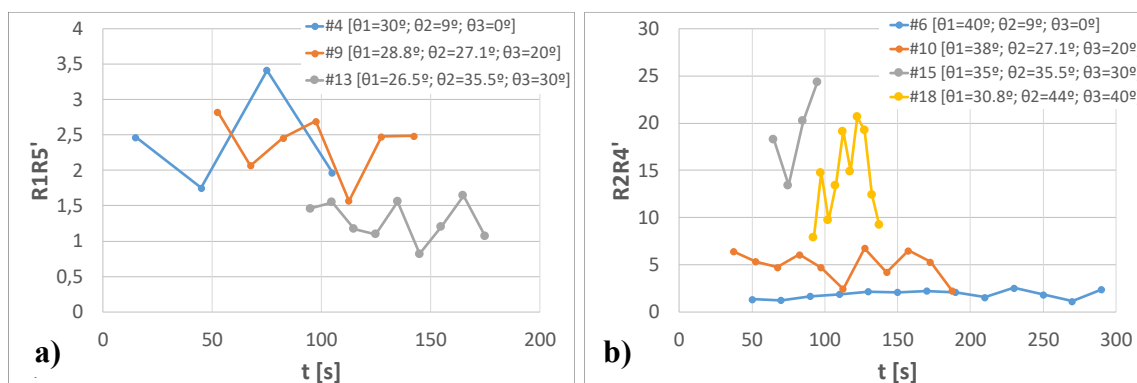


Figura 3.22 - Influência de γ_3 sobre a velocidade R_2R_4' , com: a) $\gamma_2=168^\circ$ e b) $\gamma_2=157,5^\circ$.

3.3.5 Influência de α

Sabe-se que o aumento do valor de α em conjuntos de iguais (δ_1, δ_2), em que (γ_2, γ_3) são iguais, provoca o aumento dos declives da linha de água (θ_3), de S_2 e S_4 (θ_2), e uma diminuição do declive de S_1 e S_5 (θ_1) (ver Tabela 2.1). Verificou-se então que, de um modo geral, o aumento de α provoca uma relativa diminuição de R_1R_5' (Fig. 3.23a), tendo-se registado normalmente os seus valores máximos quando a linha de água é horizontal e θ_1 é máximo. Igualmente registaram-se aumentos de R_2R_4' e de R_3' para maiores valores de θ_2 e θ_3 , respetivamente (Fig. 3.23b e c).



(legenda na página seguinte)

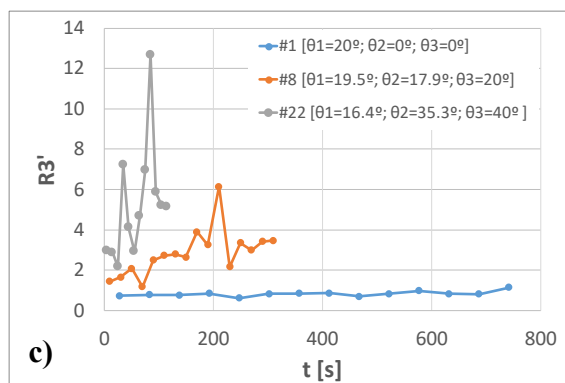
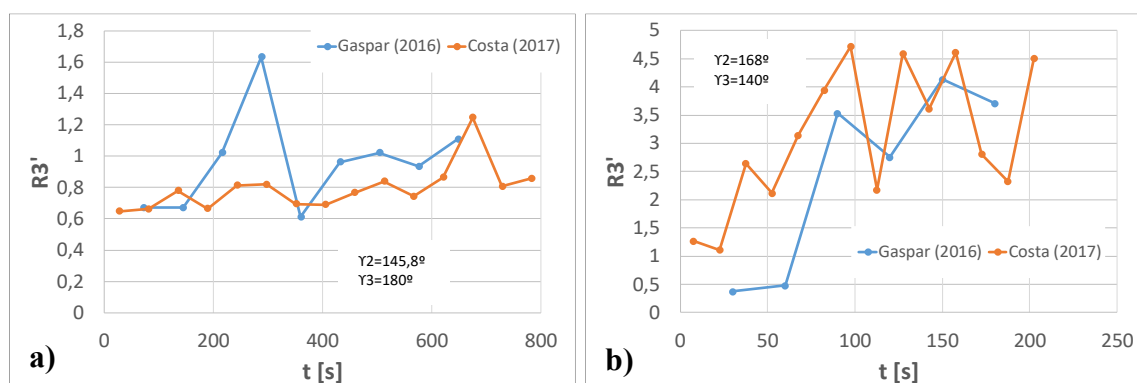


Figura 3.23 - Influência de α em: a) R_1R_5' , com $\gamma_2=168^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$; b) R_2R_4' , com $\gamma_2=157,5^\circ$ e $\gamma_3=140^\circ$; c) R_3' , com $\gamma_2=157,5^\circ$ e $\gamma_3=180^\circ$.

3.3.6 Comparação com o estudo anterior

As configurações do conjunto dos 22 ensaios realizados neste estudo foram também abordadas em Gaspar (2016), utilizando o mesmo combustível. Apesar de as metodologias analíticas dos dois estudos diferirem bastante, apresentam-se seguidamente comparações para algumas geometrias, mas apenas para as velocidades de propagação na direção da linha de água, R_3' . Diga-se que, em Gaspar (2016), as direções S_1 e S_5 não foram analisadas e as direções S_2 e S_4 foram definidas de modo diferente: a partir do ponto de ignição e apenas segundo as faces A e B.

De um modo geral, observou-se uma discrepância de valores de R_3' de um estudo para o outro (Fig. 3.24).



(legenda na página seguinte)

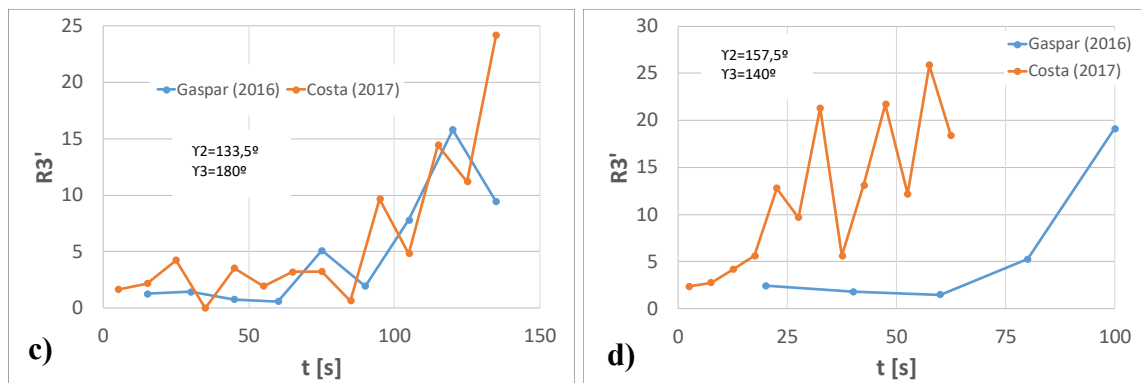


Figura 3.24 – Comparações de valores de R_3' entre os dois estudos: **a)** Ensaio 3, com $\alpha=0^\circ$; **b)** Ensaio 9, com $\alpha=20^\circ$; **c)** Ensaio 14, com $\alpha=30^\circ$; **d)** Ensaio 18, com $\alpha=40^\circ$.

Verificou-se, pelos valores obtidos em Gaspar (2016), que, o aumento de α fixando (δ_1, δ_2) provocou um aumento de R_3' (Fig. 3.25), como se concluiu também neste estudo (Fig. 3.23), pelo aumento do declive segundo esta direção, θ_3 .

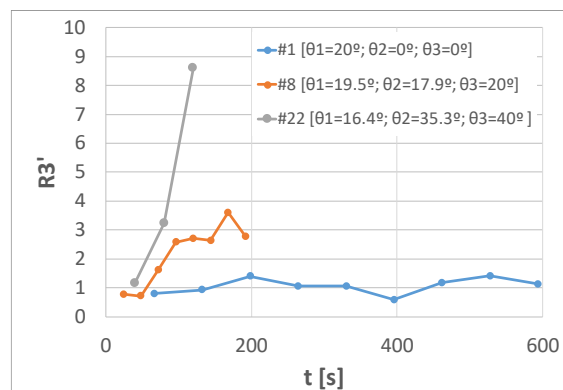


Figura 3.25 - Influência de α em R_3' , com $Y_2=157,5^\circ$ e $Y_3=180^\circ$ (resultados de Gaspar (2016)).

Por outro lado, poucas conclusões se puderam tirar relativamente à influência de Y_2 e Y_3 em R_3' em Gaspar (2016), ao contrário deste estudo. Isto mesmo pode ser observado na Figura 3.26, onde se ilustram os resultados de algumas configurações comuns em ambos os estudos. Comparando graficamente os resultados para R_3' obtidos nos dois estudos, não foi possível estabelecer uma relação consistente entre ambos, possivelmente por se basearem em metodologias analíticas e *softwares* muito diferentes.



Figura 3.26 – Comparações de resultados obtidos por Gaspar (2016) e Costa (2017): **a)** Ensaio 10; **b)** Ensaio 11; **c)** Ensaio 13; **d)** Ensaio 15; **e)** Ensaio 17; **f)** Ensaio 20.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo consistiu na análise da velocidade de propagação do fogo num duplo desfiladeiro de geometria complexa. Numa primeira fase, procedeu-se à caracterização geométrica das configurações a estudar, com base num modelo da mesa de ensaios anteriormente desenvolvido em *SolidWorks*. A metodologia de análise da velocidade de propagação do fogo segundo as direções pré-definidas foi feita com recurso ao programa *Fire ROS Calculator*, desenvolvido por Abouali (2017). Relativamente ao estudo anterior de Gaspar (2016), pode concluir-se que este *software* permitiu obter resultados mais precisos e conclusivos. Por fim, foi possível analisar e comparar as velocidades de propagação do fogo em função dos diferentes parâmetros geométricos.

Na generalidade dos casos estudados, podem tirar-se as seguintes conclusões principais:

- o aumento de α provoca o aumento das velocidades de propagação do fogo R_2R_4' e R_3' , associado ao aumento dos declives dessas direções (θ_2 e θ_3), e uma diminuição ligeira de R_1R_5' .
- a velocidade R_1R_5' apenas é relevante para os valores mais baixos de α ($\alpha \leq 20^\circ$), apresentando normalmente maiores valores para maiores declives θ_1 e θ_2 .
- R_2R_4' é tanto maior quanto menor γ_2 ; no entanto, para $\alpha \geq 20^\circ$, a diminuição do ângulo de abertura da linha de água γ_3 é igualmente importante para o aumento desta velocidade.
- no geral, o fator que mais influencia o aumento da velocidade R_3' é a diminuição do ângulo de abertura γ_3 e, para menores valores desse ângulo, uma menor abertura γ_2 contribui também para o aumento desta velocidade.

Note-se que, quanto menores forem os dois ângulos de abertura, γ_2 e γ_3 , maior é a convergência do fogo e mais intensas são as trocas de calor por convecção e radiação; além disso, maior é a restrição de entrada lateral do ar circundante, o que conduz a um comportamento mais violento do fogo, conforme observado por Dupuy *et al.* (2011). Tendo-se verificado o fenómeno de erupção de fogo na maioria dos ensaios de 11 a 22, em especial

para valores elevados de α , δ_1 e δ_2 , o combate ao fogo em duplos desfiladeiros com este tipo de configurações deve ser feito com uma atenção redobrada, em máximas condições de segurança, e com estratégias adequadas.

Sugestões para trabalho futuro

Tirando partido da evolução tecnológica que o *Fire ROS Calculator* representa, nesta mesa poderão ser estudadas mais direções para além das cinco estudadas no presente trabalho e, assim, realizar estudos mais detalhados.

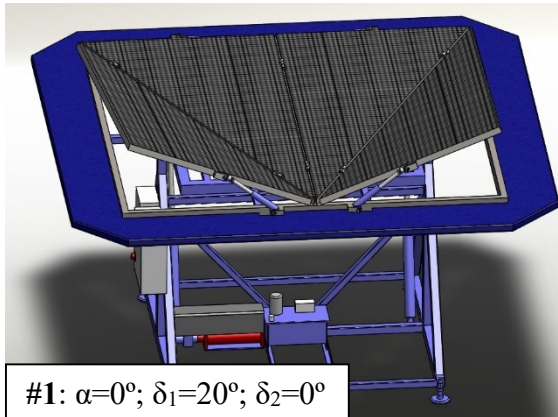
Na sequência do presente trabalho, investigações futuras poderão considerar: configurações não-simétricas relativamente à linha de água; diferentes locais de ignição pontual; diferentes cargas de combustível; diferente combustível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

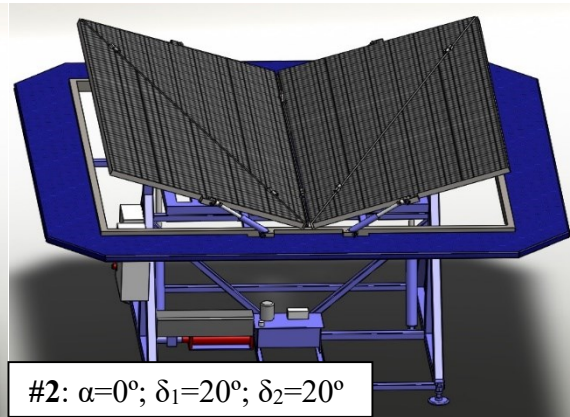
- Abouali, A.W.A. (2017), comunicação privada.
- Auburn University, Alabama, USA (2017),
http://www.auburn.edu/academic/forestry_wildlife/fire/heat_transfer.htm, acesso em 09-06-2017.
- Carvalho, J. (2014), “Floresta autóctone”, em Floresta Comum,
<http://www.florestacomum.org/floresta-autoctone/historia-da-floresta-portuguesa/>,
acesso em 09-06-2017.
- Chatelon, F.J., J.H. Balbi, J.L. Rossi, A. Simeoni, D.X. Viegas, T. Marcelli T (2014),
“Determining a safety condition in the prevention of eruptive fires”, em *Advances
in Forest Fire Research* (Editor: D.X. Viegas), Cap. 5 – “Fire Suppression and
Safety”, Imprensa da Universidade de Coimbra, pp. 1530-1360 (DOI:
[dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_148](https://doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_148))
- Dupuy, J.-L., J. Maréchal, D. Portier and J.-C. Valette (2011), “The effects of slope and
fuel bed width on laboratory fire behaviour”, *Int. J. Wildland Fire*, Vol. 20, N° 2,
pp. 272-288.
- Ferreira-Leite, F., A. Bento-Gonçalves, L. Lourenço, X. Úbeda e A. Vieira (2013),
“Grandes incêndios florestais em Portugal Continental como resultado das
perturbações nos regimes de fogo no mundo mediterrâneo”, *Silva Lusitana*, n°
Especial: 1-9.
- Gaspar, Filipe (2016), “Estudo da propagação de um incêndio florestal num duplo
desfiladeiro”, dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, DEM,
Universidade de Coimbra.
- Marques, A. F. (2017), “Avaliação do risco de incêndio florestal”, GEGREN (ISA),
<http://naturlink.pt/print.aspx?menuid=3&cid=87072&viewall=true&print=true>,
acesso em 26-06-2017.
- Viegas, D. X. (2004), “Cercados pelo fogo”, Edições Minerva Coimbra, ISBN:
9789727981052.
- Viegas, D.X. (2005), “A mathematical model for forest fires blowup”, *Combustion Science
and Technology*, Vol. 177:1, pp. 27-51.
- Viegas, D.X. (2006)^a, “Anatomy of a blow-up: Eruptive fire behaviour can be modelled
and predicted mathematically”, *Wildfire*, Sept./Oct. (www.wildfiremag.com), pp.
18-25.
- Viegas, D.X. (2006)^b, “Parametric study of an eruptive fire behaviour model”, *Int. J.
Wildland Fire*, Vol. 15, N° 2, pp. 169-177.

- Viegas, D.X. (2007), “Predicting Eruptive Fire Behaviour”, Workshop on Mathematical Modelling and Numerical Simulation of Forest Fire Propagation, Vigo, Espanha, 29-30 Novembro ([http:// www.dma.uvigo.es/fire/pdf/dviegas.pdf](http://www.dma.uvigo.es/fire/pdf/dviegas.pdf)).
- Viegas, D.X., L. P. Pita, L. Matos, P. Palheiro (2002), “Slope and wind effects on fire spread”. In Viegas, D.X. (Ed.) Proc. 4th Int. Conf. Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, Millpress Science Publishers, Rotterdam, The Netherlands.
- Viegas, D.X., L.P. Pita, L. Ribeiro, P. Palheiro (2005) “Eruptive fire behaviour in past fatal accidents”. Proceedings, Eighth International Wildland Fire Safety Summit, April 26-28. Missoula, MT.

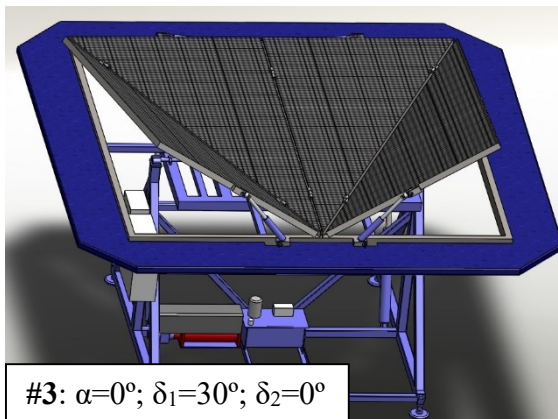
ANEXO A – CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS ESTUDADAS



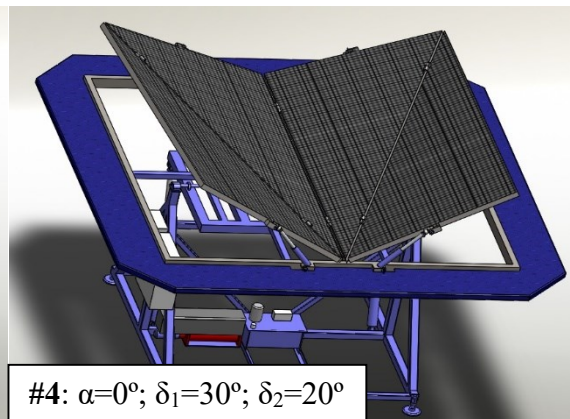
#1: $\alpha=0^\circ$; $\delta_1=20^\circ$; $\delta_2=0^\circ$



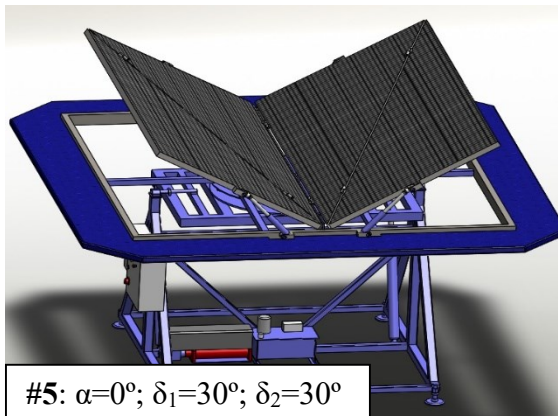
#2: $\alpha=0^\circ$; $\delta_1=20^\circ$; $\delta_2=20^\circ$



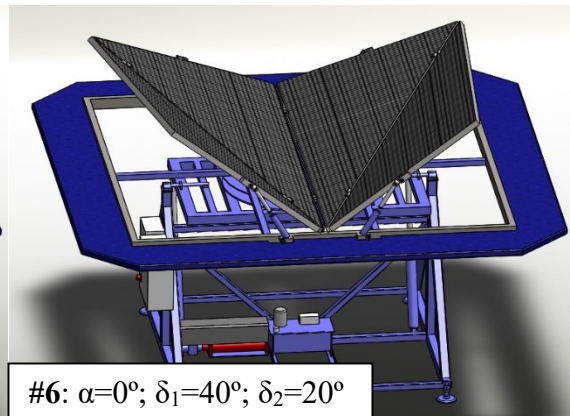
#3: $\alpha=0^\circ$; $\delta_1=30^\circ$; $\delta_2=0^\circ$



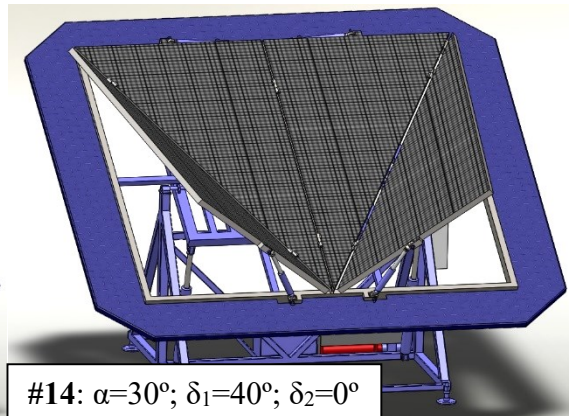
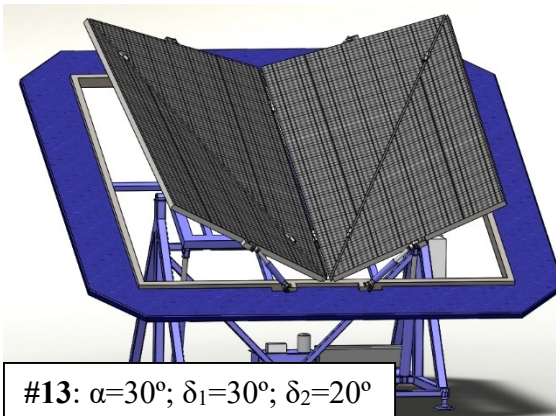
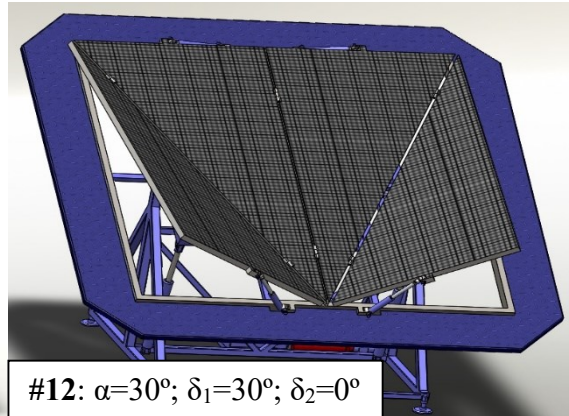
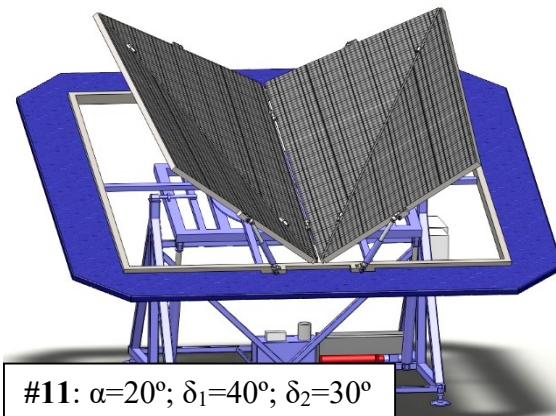
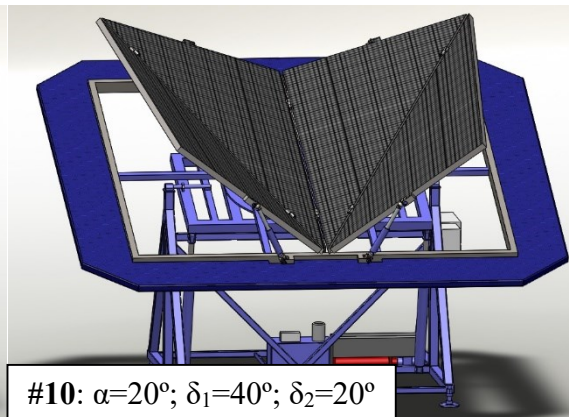
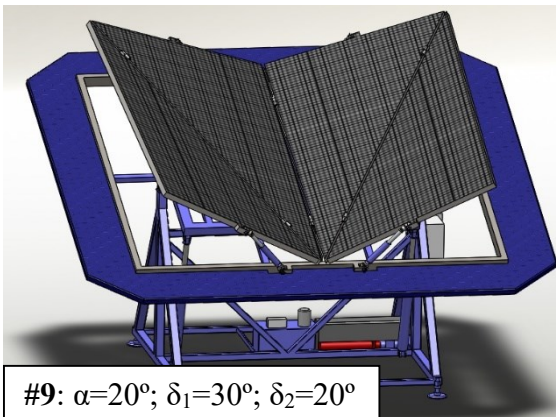
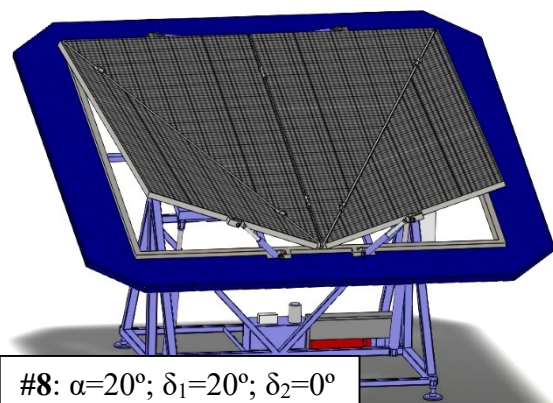
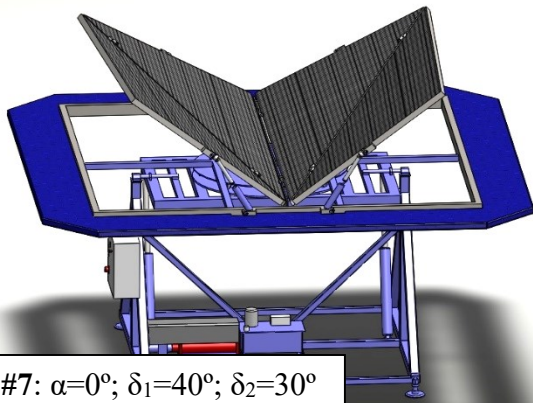
#4: $\alpha=0^\circ$; $\delta_1=30^\circ$; $\delta_2=20^\circ$

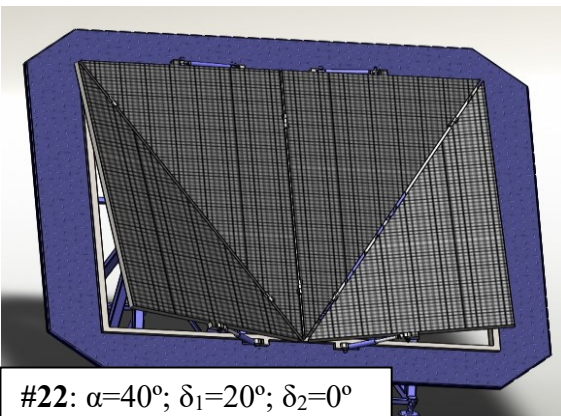
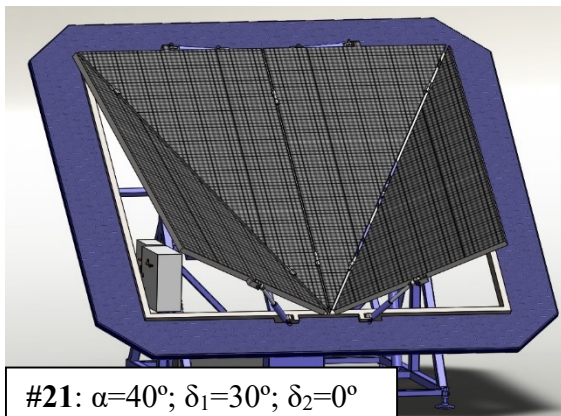
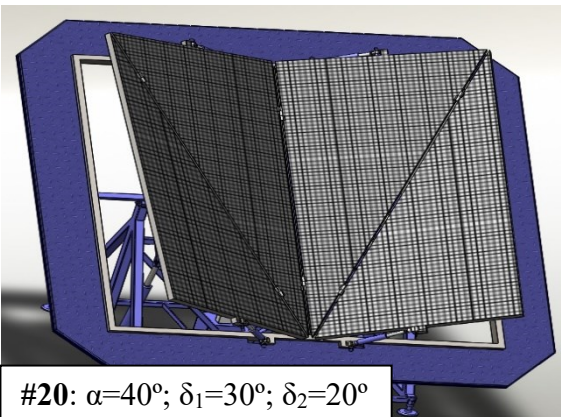
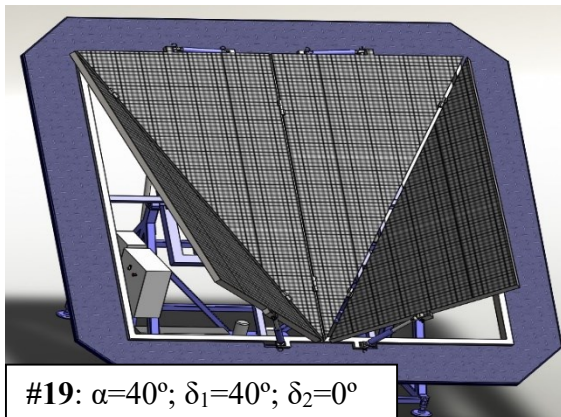
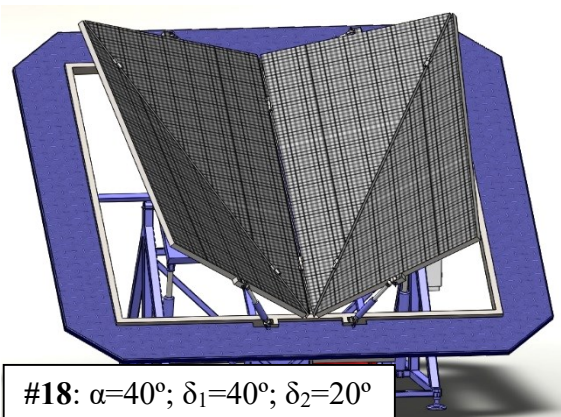
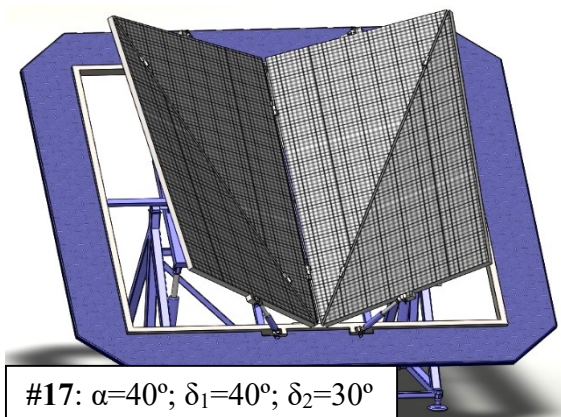
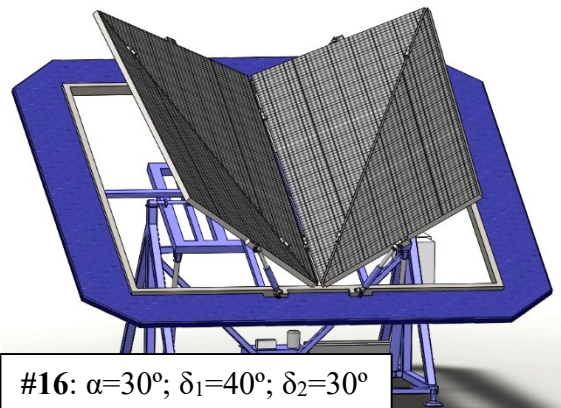
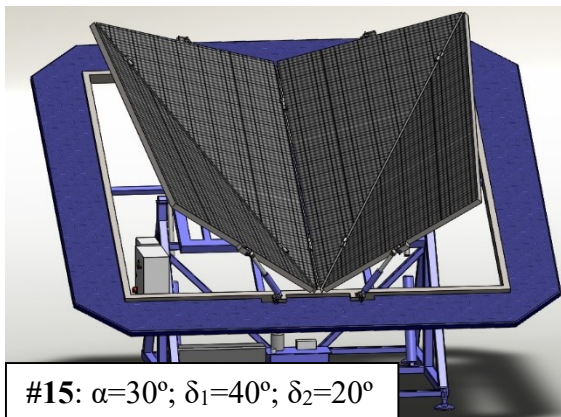


#5: $\alpha=0^\circ$; $\delta_1=30^\circ$; $\delta_2=30^\circ$

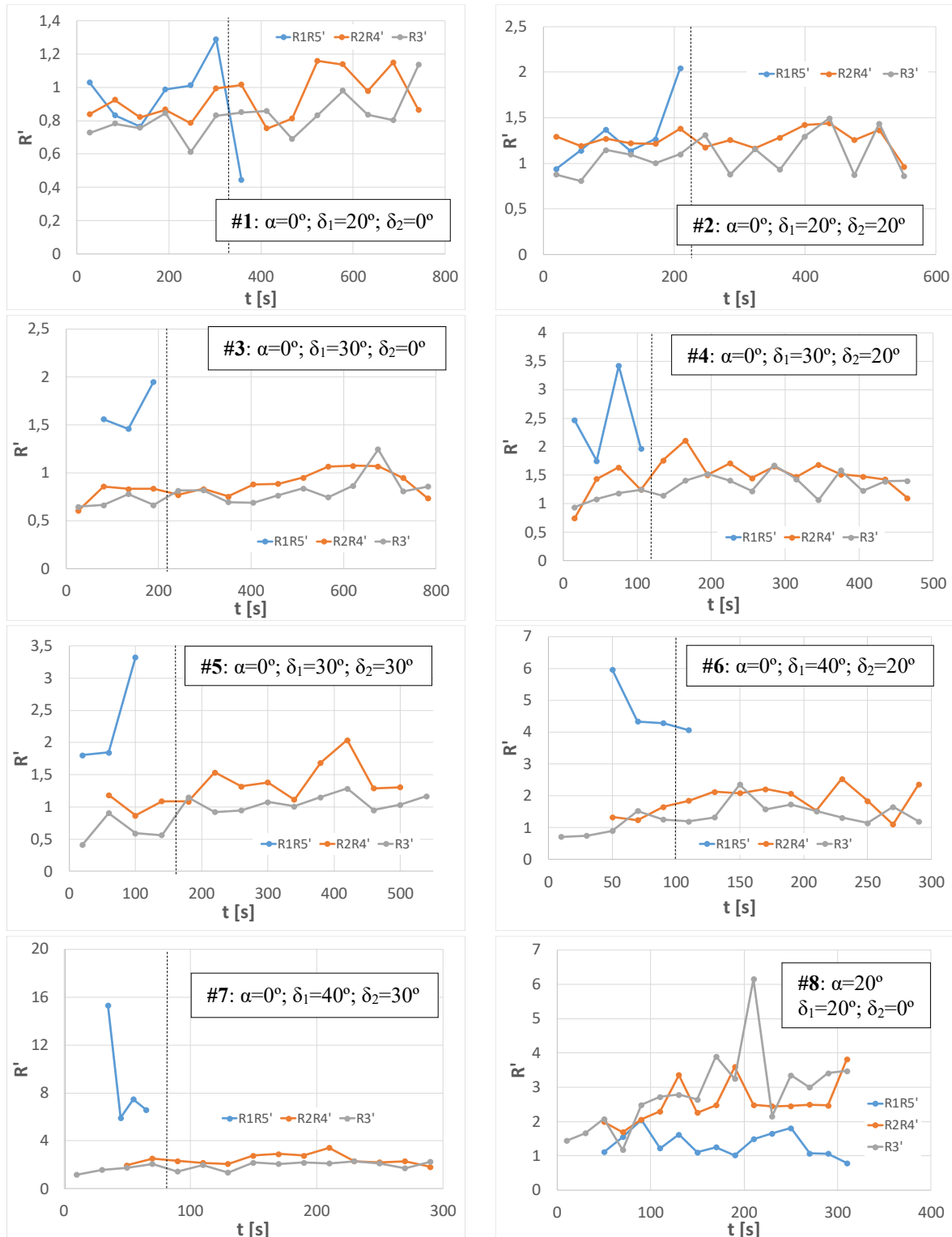


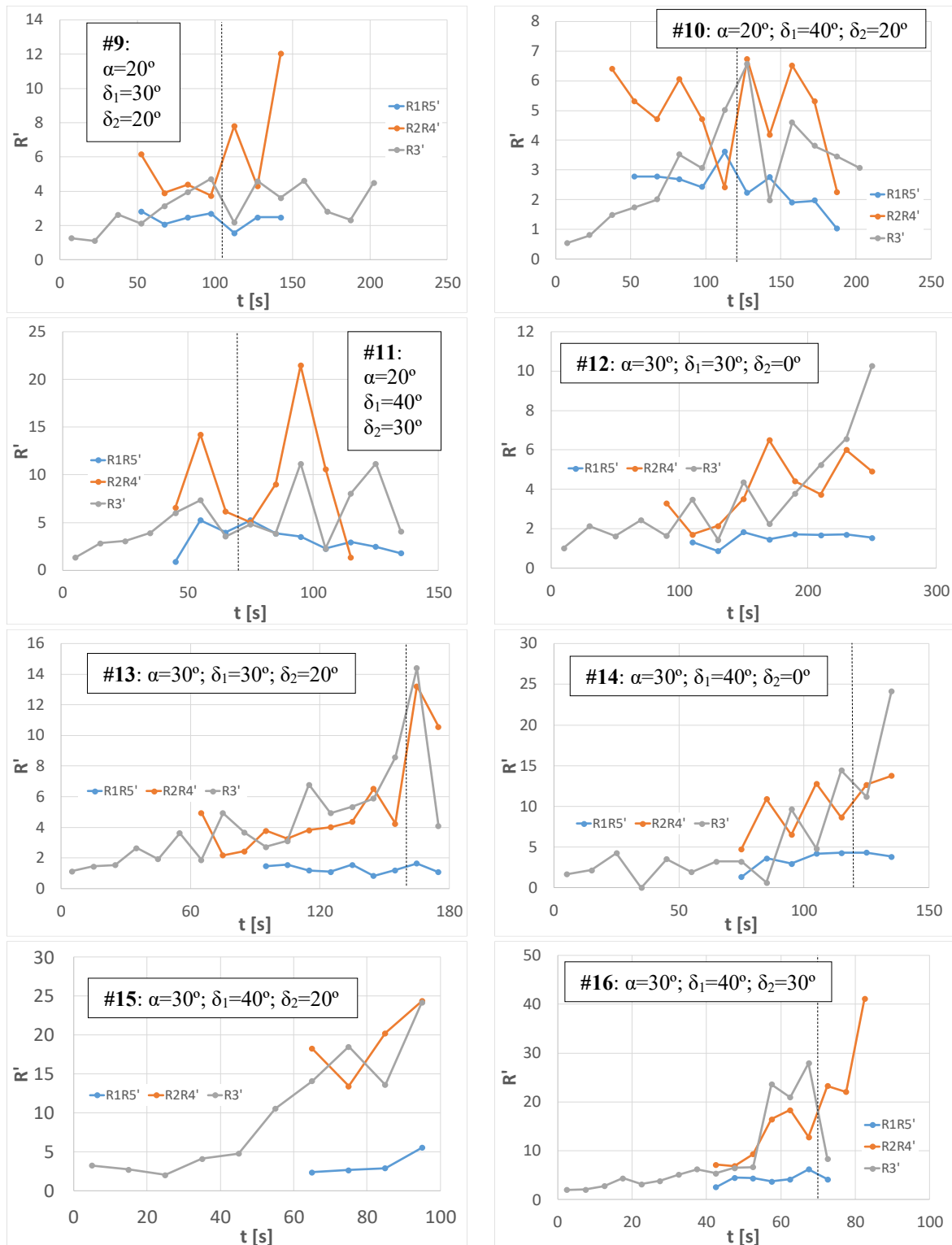
#6: $\alpha=0^\circ$; $\delta_1=40^\circ$; $\delta_2=20^\circ$

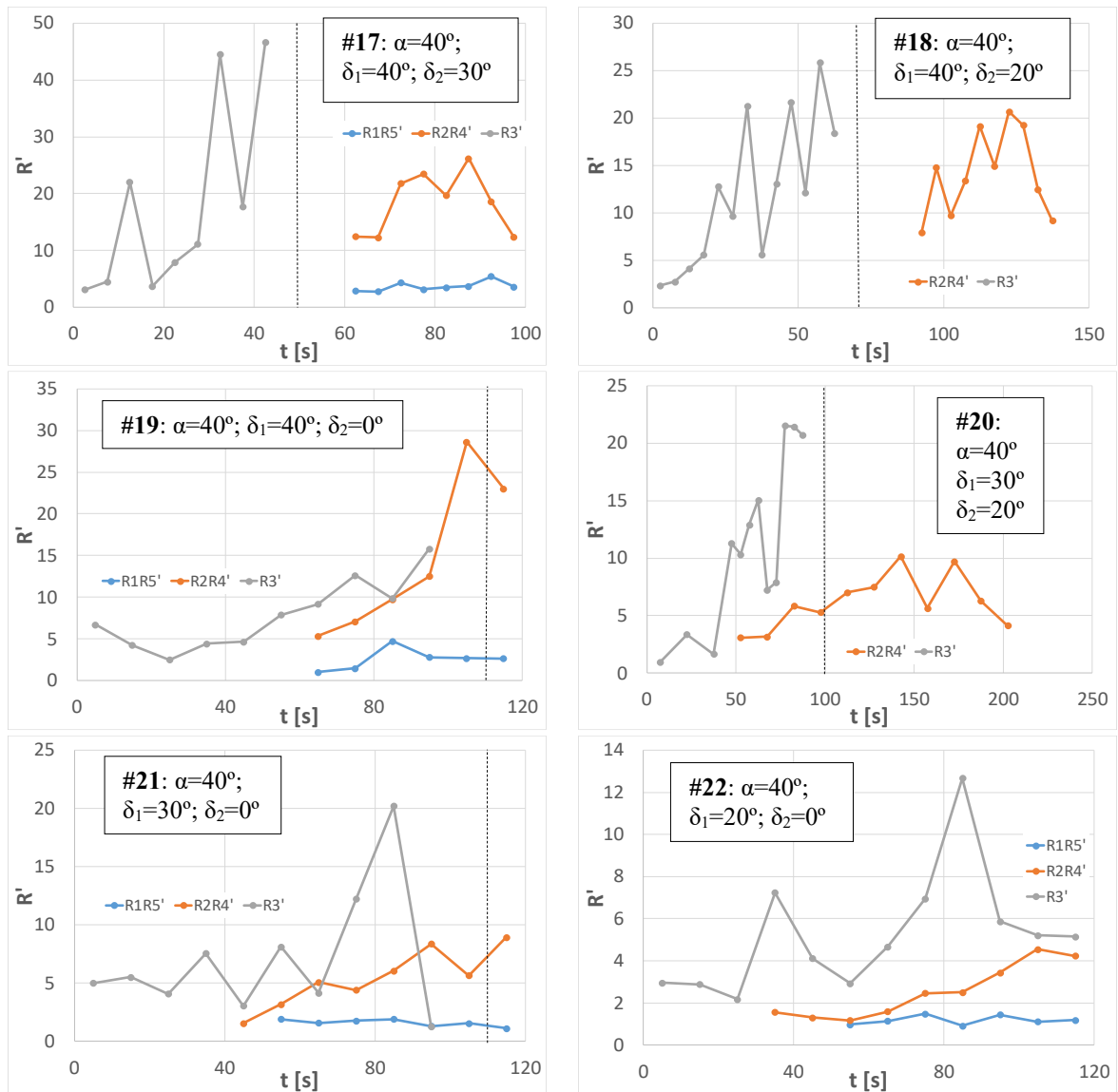




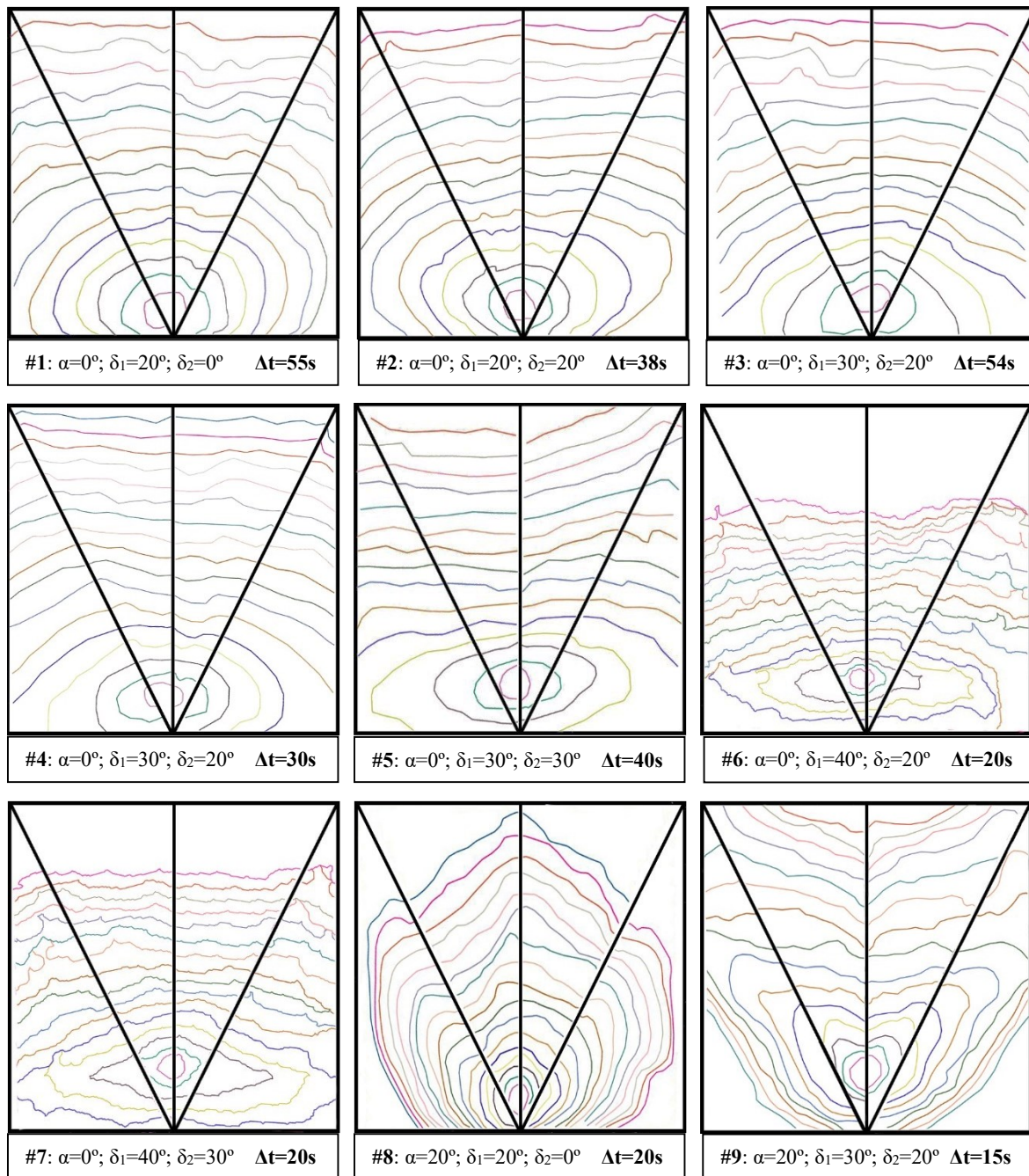
ANEXO B – GRÁFICOS DAS VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO

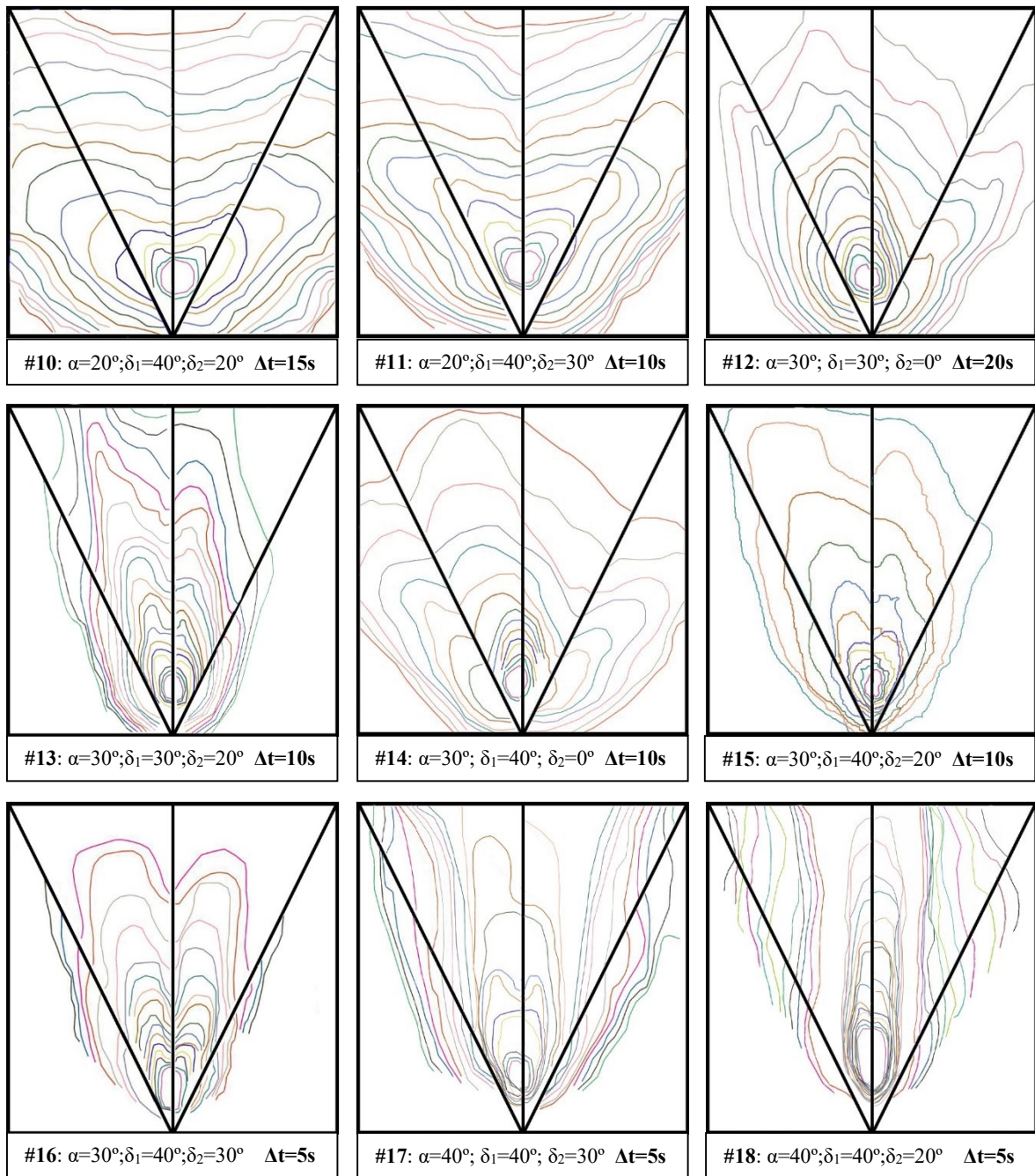


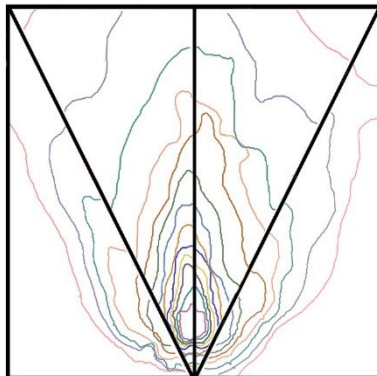




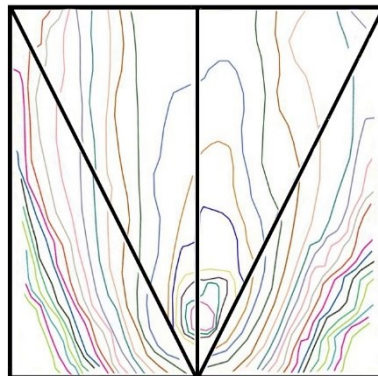
ANEXO C – MAPAS DE PROPAGAÇÃO DO FOGO



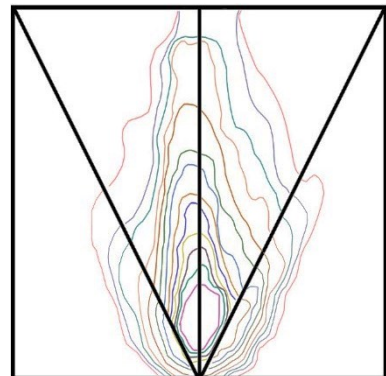




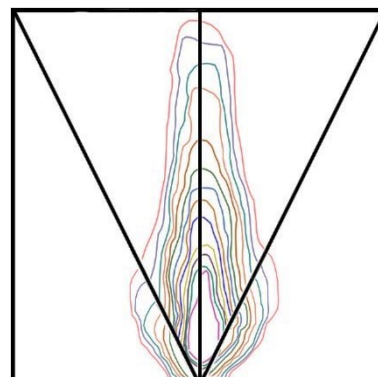
#19: $\alpha=40^\circ; \delta_1=40^\circ; \delta_2=0^\circ$ $\Delta t=10s$



#20: $\alpha=40^\circ; \delta_1=30^\circ; \delta_2=20^\circ$ $\Delta t=5s$



#21: $\alpha=40^\circ; \delta_1=30^\circ; \delta_2=0^\circ$ $\Delta t=10s$



#22: $\alpha=40^\circ; \delta_1=20^\circ; \delta_2=0^\circ$ $\Delta t=10s$