



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Contribuição para o Estudo da Formação de Vórtices Verticais de Fogo

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

Autor

David Miguel Jaulino Lopes

Orientadores

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida

Júri

Presidente	Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Jorge Campos da Silva André Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida Investigador da ADAI

Colaboração Institucional



**Associação para o
Desenvolvimento da
Aerodinâmica
Industrial**



**Centro de Estudos
sobre Incêndios
Florestais**

Coimbra, Julho, 2015

“Most people say that it is the intellect which makes a great scientist. They are wrong: it is character.”

Albert Einstein

Aos meus Pais e Irmã.

Agradecimentos

A dissertação de mestrado que aqui se apresenta coincide com o culminar de um percurso académico de cinco anos, o qual só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar aos meus orientadores, Professor Doutor Domingos Xavier Viegas e Doutor Miguel Almeida, por me darem a oportunidade de trabalhar neste projeto, por todos os conhecimentos que me transmitiram, pelo seu rigor científico, pelas suas disponibilidades para me orientar e pelos valiosos conselhos.

Agradeço à Eng.^a Cláudia Pinto e ao Eng.^o Jorge Raposo, pela disponibilidade que dispensaram, por toda a ajuda que me deram nos meus encargos, pela sua capacidade de organização e pelo seu exemplo.

Reconheço e agradeço, toda a ajuda prestada pela equipa do CEIF, do modo como fui acolhido, na realização dos ensaios e em todo o auxílio proporcionado.

Aos meus pais e à minha irmã, por estarem sempre presentes, pelo incentivo a nunca desistir, pela oportunidade que me proporcionaram, por me educarem e pela amizade.

À Sara pelo seu apoio, pela sua compreensão, pelo alento e motivação que sempre me transmitiu.

Aos meus amigos e colegas de sempre, pelo seu companheirismo, pela ajuda que nunca recusaram, pelos bons momentos que passámos. A todos os amigos que fiz, que me enriqueceram com a sua partilha e amizade.

Resumo

Durante um incêndio, podem-se observar, sob certas condições, a formação e desenvolvimento de vórtices de fogo, um fenómeno imprevisível que pode colocar em perigo vidas humanas assim como causar destruição de bens materiais.

O objetivo deste trabalho é o estudo das condições de formação de vórtices de fogo de eixo vertical e suas características físicas, termodinâmicas e cinemáticas, entre elas, taxas de combustão, alturas e diâmetros de chama, velocidades de escoamento, temperaturas e potências geradas.

Este fenómeno é de difícil previsão e extremamente perigoso, podendo-se observar, se estiverem reunidas certas condições, em incêndios florestais.

Os vórtices de fogo já foram alvo de vários estudos, sendo que nenhum deles feito com combustíveis florestais, que é o combustível que está efetivamente presente num incendio florestal. O combustível florestal utilizado neste trabalho foi mato, que é composto maioritariamente por duas espécies: urze (*Erica Australis*) e carqueja (*Pterospatum tridentatum*).

Para uma melhor compreensão e perceção deste fenómeno, foram relacionados os seus parâmetros e tiradas conclusões.

Realizaram-se vários ensaios nas mesmas condições para poder obter relações fidedignas e bem fundamentadas.

Neste trabalho foi aperfeiçoada uma metodologia experimental para o estudo de um vórtice de fogo.

Palavras-chave: Vórtices de fogo, Tornados de fogo, Gerador de vórtices de fogo, Comportamento extremo do fogo, Altura de chama, Taxas de perda de massa.

Abstract

During a forest fire, under certain conditions, the formation and development of fire whirls can be seen. It is an unpredictable phenomenon that can put human lives in danger as well as the destruction of property.

The objective of this project is to study the formation conditions of those vertical axis fire whirls and their physical, thermodynamic and kinetic properties. Those properties include combustion rates, flame heights and diameters, flow velocities as well as temperatures and power generations.

This phenomenon is hard to predict and extremely dangerous but can be found in forest fires, under certain conditions.

Fire whirls have been studied numerous times, but never with forest fuels which is the one actually present in forest fires. The forest fuel used in this project was shrub, which is mainly composed by two species: *Erica Australis* and *Pterospatum tridentatum*.

For a better understanding and perception of this phenomenon, its parameters were related and conclusions were taken.

Various tests were performed under the same conditions in order to get trustworthy correlation between the parameters.

In this project, an experimental methodology for the study of fire whirls was perfected.

Keywords Fire whirls, Fire tornados, Fire whirls generator, Extreme fire behaviour, Flame Height, Combustion rates.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1 Introdução.....	1
2 Estado da arte.....	3
2.1 Revisão geral.....	3
2.2 Condições propícias à formação de tornados de fogo	5
2.3 Estudos realizados.....	6
2.4 Estudo anterior realizado na ADAI/CEIF	10
3 Metodologia experimental.....	13
3.1 Equipamento	14
3.1.1 Gerador de vórtices.....	14
3.1.2 Balanças eletrônicas	17
3.1.3 Cesto	17
3.1.4 Analisador do teor de humidade.....	19
3.1.5 Ventiladores e variador de frequência	19
3.1.6 Proteção da plataforma	20
3.1.7 Claraboia.....	21
3.1.8 Tubos de Pitot e termopares	22
3.1.9 Câmara de filmar	24
3.2 Procedimento experimental	25
3.3 Tratamento de dados.....	28
3.3.1 Caracterização térmica do combustível.....	28
3.3.2 Caraterização termodinâmica	29
3.3.3 Perda de massa e taxa de perda de massa.....	29
3.3.4 Caracterização geométrica da chama	30
4 Resultados e discussão	31
4.1 Perda de massa e taxa de perda de massa	31
4.2 Altura e diâmetro de chama	35
4.3 Potência gerada pela combustão	37
4.4 Altura de chama e taxa de perda de massa	39
4.5 Velocidades e temperaturas do vórtice	42
4.5.1 Velocidades	42
4.5.2 Temperaturas	50
5 Conclusão	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

APÊNDICE A	57
APÊNDICE B	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tornado de fogo fotografado no Missouri - EUA. (Fonte: www.dailymail.co.uk)	3
Figura 2.2. Formação de vórtices de fogo: (a) impondo rotação na estrutura; (b) induzindo fluxo de ar através de caminhos pré-definidos.	6
Figura 2.3. Configuração do estudo de Emmons and Ying. (Fonte: Smits <i>et al.</i> (2012))	7
Figura 2.4. Câmara de fogo de Martin, Pendleton e Burgess. (Fonte: Martin <i>et al.</i> (1976))	8
Figura 2.5. GV com entradas laterais cobertas por folha de alumínio. (Fonte: Pinto (2014))	11
Figura 3.1. Disposição dos equipamentos no local de ensaios.	13
Figura 3.2. Aparato experimental com a identificação dos equipamentos.	14
Figura 3.3. Distinção entre torre e base do GV.	15
Figura 3.4. Esquema da formação do vórtice de fogo.	16
Figura 3.5. Perfil e esquema do GV com as principais medidas	16
Figura 3.6. Computador e mecanismo que liga a balança à base do GV para registo do decaimento de massa.	17
Figura 3.7. Cesto: (a) cesto sem combustível; (b) cesto com combustível.	18
Figura 3.8. Cesto no fim de um ensaio.	18
Figura 3.9. Velocidade do escoamento em função da frequência de alimentação.	20
Figura 3.10. Proteção da plataforma para proteger a plataforma do escoamento induzido pelos ventiladores.	21
Figura 3.11. Claraboia que permite a exaustão dos gases de combustão: (a) claraboia fechada; (b) claraboia aberta.	22
Figura 3.12. Tubos de Pitot: (a) esquema com as distâncias dos tubos de Pitot; (b) esquema com a perspetiva dos tubos de Pitot.	23
Figura 3.13. Distância da extremidade dos tubos de Pitot à face da torre do GV.	23
Figura 3.14. Demonstração da diferença entre altura medida e real para uma altura máxima.	24
Figura 3.15. Ignição do combustível.	26
Figura 3.16. Foto do ensaio GVV28.	27
Figura 3.17. Fases do ensaio GVV35 separadas entre 20 segundos.	27
Figura 4.1. Perda de massa e taxa de perda de massa do ensaio GVV31.	32
Figura 4.2. Segunda fase da perda de massa do ensaio GVV31.	32

Figura 4.3. Média dos coeficientes ($\bar{\alpha}$) e ensaios realizados com a claraboia aberta em função da velocidade de escoamento (V_{in}).	34
Figura 4.4. Média da taxa de perda de massa máxima ($\dot{m}_{m\acute{a}x}$) em função da velocidade de escoamento (V_{in}).	35
Figura 4.5. Altura e diâmetro de chama do ensaio GVV32: (a) Altura em função do tempo; (b) Diâmetro em função do tempo.	35
Figura 4.6. Média das alturas máximas ($H_{m\acute{a}x}$) em função da velocidade de escoamento (V_{in}).	36
Figura 4.7. Potência gerada pela combustão ao longo do tempo do ensaio GVV31.	38
Figura 4.8. Média das potências máximas ($P_{m\acute{a}x}$) em função da velocidade de escoamento (V_{in}).	38
Figura 4.9. Altura (H) e taxa de perda de massa (\dot{m}) do ensaio GVV33 ao longo do tempo.	40
Figura 4.10. Altura (H) em função da taxa de perda de massa (\dot{m}) do ensaio GVV28.	40
Figura 4.11. Diferentes abordagens às velocidades: (a) velocidades horizontais e verticais; (b) módulo e ângulo das velocidades.	43
Figura 4.12. Velocidade horizontal para $z=2,70m$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$	44
Figura 4.13. Velocidade horizontal para $z=4,20m$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$	44
Figura 4.14. Velocidade vertical para $z=2,70m$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$	45
Figura 4.15. Velocidade vertical para $z=4,20m$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$	45
Figura 4.16. Média das velocidades máximas em função da velocidade de escoamento: (a) velocidades horizontais; (b) velocidades verticais.	46
Figura 4.17. Velocidades horizontais ao longo do tempo do ensaio GVV35: (a) velocidade horizontal para $z=2,70m$; (b) velocidade horizontal para $z=4,20m$	47
Figura 4.18. Velocidades verticais ao longo do tempo do ensaio GVV35: (a) velocidade vertical para $z=2,70m$; (b) velocidade horizontal para $z=4,20m$	47
Figura 4.19. Módulo e ângulo da velocidade para $z=2,70m$ para o ensaio GVV18.	48
Figura 4.20. Módulo e ângulo da velocidade para $z=4,20m$ para o ensaio GVV18.	48
Figura 4.21. Ângulos mínimos atingidos para todos os ensaios em função da V_{in}	49
Figura 4.22. Média dos valores máximos do módulo da velocidade: (a) módulo da velocidade para $z=2,70m$; (b) módulo da velocidade para $z=4,20m$	50
Figura 4.23. Evolução da temperatura ao longo do tempo do ensaio GVV17: (a) temperatura para $z=2,70m$; (b) temperatura para $z=4,20m$	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química elementar de <i>Erica Australis</i> e <i>Pterospatum tridentatum</i>	29
Tabela 4.1. Coeficiente (a) e média do coeficiente (\bar{a}) para as várias velocidades (V_{in}).....	33
Tabela 4.2. PCI das espécies e média dos PCI.	37
Tabela 4.3. PCI _H para todos os ensaios.	37
Tabela 4.4. Análise das dos valores das equações potenciais ajustadas à altura de chama em função da taxa de perda de massa.	41

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$|U|_1$ – Módulo da velocidade para $z=2,70$ metros [$m.s^{-1}$]

$|U|_2$ – Módulo da velocidade para $z=4,20$ metros [$m.s^{-1}$]

$|U|_{1m\acute{a}x}$ – Média dos valores máximos dos módulos da velocidade para $z=2,70m$
[$m.s^{-1}$]

$|U|_{2m\acute{a}x}$ – Média dos valores máximos dos módulos da velocidade para $z=2,70m$
[$m.s^{-1}$]

a – Coeficiente de decaimento exponencial

\bar{a} – Média do coeficiente de decaimento exponencial

b – Coeficiente da relação altura de chama em função da taxa de perda de massa

D – Diâmetro de chama [m]

F – Frequência [Hz]

H – Altura de chama [m]

HM – Altura Medida [m]

$H_{m\acute{a}x}$ – Média da altura máximas de chama [m]

HR – Altura Real [m]

\dot{m} – Taxa de perda de massa [$g.s^{-1}$]

m – Massa [g]

m_0 – Massa inicial do combustível [g]

$\dot{m}_{m\acute{a}x}$ – Média dos valores máximos da taxa de perda de massa [$g.s^{-1}$]

m_t – Massa total do combustível [g]

P – Potência gerada pela combustão [kW]

PCI – Poder Calorífico Inferior [$MJ.kg^{-1}$]

PCI_H – Poder Calorífico Inferior tendo em conta o THC [$MJ.kg^{-1}$]

$PCI_{m\acute{e}d}io$ – Média do poder calorífico inferior [$MJ.kg^{-1}$]

PCS – Poder Calorífico Superior [$MJ.kg^{-1}$]

$P_{m\acute{a}x}$ – Média das potências máximas [kW]

T – Temperatura [°C]

t – Tempo [s]

THC – Teor de Humidade do Combustível [%]

U_{H1} – Velocidade horizontal para $z=2,70\text{m}$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

U_{H2} – Velocidade horizontal para $z=4,20\text{m}$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

$U_{H\text{máx}}$ – Média das velocidades horizontais máximas [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

U_{V1} – Velocidade vertical para $z=2,70\text{m}$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

U_{V2} – Velocidade vertical para $z=4,20\text{m}$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

$U_{V\text{máx}}$ – Média das velocidades verticais máximas [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

V_{in} – Velocidade de escoamento forçada na base do GV [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

$w[\text{C}]_d$ – Teor de carbono do combustível em base seca [%]

$w[\text{H}]_d$ – Teor de hidrogénio do combustível em base seca [%]

$w[\text{N}]_d$ – Teor de azoto do combustível em base seca [%]

$w[\text{O}]_d$ – Teor de oxigénio do combustível em base seca [%]

$w[\text{S}]_d$ – Teor de enxofre do combustível em base seca [%]

α – Ângulo entre o ponto máximo da chama e a câmara de filmar [°]

β_1 – Ângulo entre o módulo da velocidade e a horizontal para $z= 2,70\text{m}$ [°]

β_2 – Ângulo entre o módulo da velocidade e a horizontal para $z= 4,20\text{m}$ [°]

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

C1 – Computador 1

C2 – Computador 2

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

CF – Câmara de Filmar

GV – Gerador de Vórtices

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

VF – Variador de Frequências

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação de mestrado enquadra-se no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica e está subordinada ao tema “Contribuição para o Estudo da Formação de Vórtices Verticais de Fogo”.

A forte componente laboratorial deste trabalho foi realizada no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF), situado no aeródromo da Lousã. O LEIF é um laboratório da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) da Universidade de Coimbra (UC).

Os vórtices ou tornados de fogo de eixo vertical consistem num fenómeno que pode ocorrer durante um incêndio florestal. Estes poder-se-ão formar através de uma corrente ascendente produzida pelo fogo e por uma vorticidade provocada pela assimetria do escoamento ou do terreno, podendo ter dezenas ou até mesmo centenas de metros de altura. São caracterizados pelo seu forte movimento de rotação e pela capacidade de transportar fogo, estes podem deslocar-se, devido ao seu movimento errático, para zonas onde possam favorecer uma propagação muito perigosa do incêndio. Os tornados de fogo, devido à sua imprevisibilidade de ocorrência, às suas características de formação e desenvolvimento, e às consequências que deles advêm, faz com que estes sejam uma manifestação de comportamento extremo de fogo.

Devido à imprevisibilidade da sua ocorrência, das condições que levam à sua formação e conseqüente desenvolvimento e do seu impacte, os tornados de fogo são fenómenos muito perigosos que carecem de um estudo cuidado.

O primeiro registo deste fenómeno relata o episódio ocorrido na manhã de 7 de Abril de 1926 durante uma tempestade em San Luis Obispo, Califórnia, em que um raio atingiu reservatórios de petróleo provocando um incêndio que durou cinco dias. Nesta ocorrência foi observada a formação de vários tornados de fogo, considerados na altura como um “fenómeno meteorológico estranho”. Um dos tornados de fogo deslocou-se cerca de 900m na direção noroeste destruindo uma casa e vitimando duas pessoas que lá habitavam.

Com este trabalho, pretende-se conhecer o comportamento e as características deste fenómeno através da medição e relação de vários parâmetros, entre eles, taxa de queima

de massa, potência libertada pela combustão, altura e diâmetro de chama, temperatura e velocidade de escoamento. Este trabalho proporcionará informação que poderá ser de grande utilidade para a formação e treino de bombeiros, nomeadamente no que confere ao reconhecimento e conhecimento deste fenómeno com o objetivo de aumentar a segurança em combate a incêndios florestais.

A dissertação é composta por cinco capítulos, sendo que o presente capítulo contém a introdução. O segundo capítulo engloba o estado de arte, que faz um enquadramento geral do trabalho. O terceiro capítulo abarca toda a metodologia experimental. No quarto capítulo discutem-se e analisam-se os resultados obtidos. Por fim, o quinto e último capítulo é dedicado às conclusões.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Revisão geral

Os tornados de fogo são um fenómeno potencialmente catastrófico que ocorre em incêndios, sob certas condições. A Figura 2.1 mostra um tornado de fogo fotografado no Missouri, nos Estados Unidos da América.



Figura 2.1. Tornado de fogo fotografado no Missouri - EUA. (Fonte: www.dailymail.co.uk)

Uma das primeiras documentações feitas sobre este fenómeno refere-se a 1926, durante um grande incêndio que durou cinco dias, em que Hisson (1926) relata que um dos vórtices formados, na altura apelidados de “fenómenos meteorológicos estranhos”, moveu-se desde o seu ponto de formação até uma casa que estava a cerca de 900 metros de distância.

O modo de propagação de um fogo pode ser classificado como comportamento normal (fogo de solo e fogo de superfície) ou comportamento extremo (fogos de copas, focos secundários e fogos eruptivos, entre outros). Os vórtices de fogo, devido ao seu difícil

combate, imprevisibilidade de ocorrência, e características de formação e desenvolvimento, são classificados como comportamento extremo do fogo (Viegas *et al*, 2011).

Relativamente à sua frequência de formação, não existe unanimidade. Segundo Meroney (2003), este é um fenómeno raro. Pelo contrário, Countryman (1971), Forthofer and Butler (2010) ou Martin *et al.* (1974), afirmam que é um fenómeno bastante frequente em incêndios florestais. Os tornados de fogo são, definitivamente, um fenómeno usual e habitual em incêndios florestais.

Countryman (1971) afirma que, em estudos feitos em laboratório, as taxas de queima de combustível líquido em episódios de vorticidade são cinco ou seis vezes superiores às taxas verificadas em testes simples sem a formação de vórtice. Afirma também que taxas de queima mais rápidas resultam numa maior intensidade de fogo criando condições mais favoráveis para a formação de vórtices de fogo subsequentes.

Segundo Countryman (1971), partículas combustível ainda em combustão podem ser apanhadas e levantadas pela coluna de convecção do vórtice podendo originar a formação de focos secundários.

Goens (1978) classifica os tornados de fogo por ordem crescente de altura, perigosidade e velocidade de escoamento rotacional:

1. Fire Devils (Diâmetro entre 1 e 10 metros e velocidade rotacional menor que 35 km.h⁻¹)
2. Fire Whirls (Diâmetro entre 10 e 30 metros e velocidade rotacional entre 35 e 108 km.h⁻¹)
3. Fire Tornadoes (Diâmetro entre 30 e 300 metros e velocidade rotacional até 145 km.h⁻¹)
4. Fire Storm (Diâmetro entre 300 e 3000 metros e velocidade rotacional até 177 km.h⁻¹)

Os tornados de fogo podem ter a sua rotação tanto em sentido dos “ponteiros do relógio”, como em sentido contrário, sendo as condições de circulação que formam o vórtice determinantes para a definição do sentido da rotação (Goens, 1978).

2.2 Condições propícias à formação de tornados de fogo

Nos diversos estudos sobre tornados de fogo existe um consenso entre os autores sobre o mecanismo de formação deste fenómeno, que se manifesta na presença de uma atmosfera instável e de uma fonte de calor e vorticidade. Hissong (1926), quando muito pouco se sabia sobre o fenómeno de vórtices de fogo, relata que os vórtices davam a impressão de cordas a balançar nas nuvens de fumo.

Segundo Countryman (1971) os tornados de fogo podem formar-se em locais onde a formação de outro tipo de tornados frequentemente ocorrem, desde que ocorra um incêndio nessa área. Estes locais são propícios à formação de vórtices devido às suas características topográficas, nomeadamente: existência de linhas de cumada, montanhas e até mesmo grupos de árvores ou arbustos que impeçam o livre fluxo do vento, provocando um escoamento favorável à formação de tornados.

Viegas *et al.* (2011) afirmam: “Os tornados formam-se por meio de uma corrente ascendente, produzida pelo fogo ou por zonas do terreno aquecidas, à qual está em geral associado um movimento de rotação, induzido por assimetrias no escoamento ou no terreno em sua volta.”

Os vórtices, precisam, geralmente, de quatro condições para a sua formação: uma fonte forte de calor, uma atmosfera instável, uma fonte de vorticidade e a existência de vento fraco a moderado (Forthofer and Butler, 2010).

Em laboratório, os vórtices podem ser gerados por dois meios distintos: 1) impondo uma rotação a uma parte da estrutura, ou 2) induzindo o fluxo de ar através de caminhos pré-definidos (Lei *et al.*, 2012). Estes dois meios distintos de gerar vórtices de fogo estão representados na Figura 2.2.

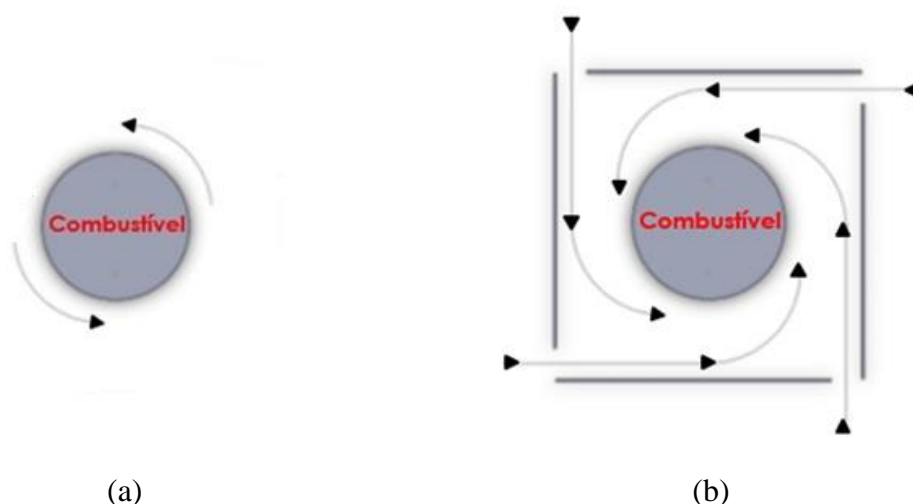


Figura 2.2. Formação de vórtices de fogo: (a) impondo rotação na estrutura; (b) induzindo fluxo de ar através de caminhos pré-definidos.

Quase todos os estudos relativos a tornados de fogo explicam as suas condições de formação.

Em suma, para a eclosão deste fenómeno é necessário: uma atmosfera instável, uma fonte alimentada, de calor e vorticidade, provocada ou não, pelos escoamentos devidos à topografia.

2.3 Estudos realizados

Os tornados de fogo não são um tema recente pelo que, devido ao seu comportamento e formação inesperados, foram e continuam a ser alvo de vários estudos.

Um dos primeiros estudos feitos sobre esta matéria foi realizado por Emmons and Ying (1967) citado por Lei *et al.* (2011), por Battaglia *et al.* (2000) e por Smits *et al.* (2012). Emmons and Ying (1967) utilizaram acetona numa tina com 10cm de diâmetro que estava cercada por uma tela de rotação como se pode ver na Figura 2.3, onde se mediram perfis de temperatura em função do raio do vórtice numa altura fixa para vários valores de circulação ambiente imposta. Concluíram que a taxa de perda de massa aumentava de forma evidente com o aumento da circulação ambiente.

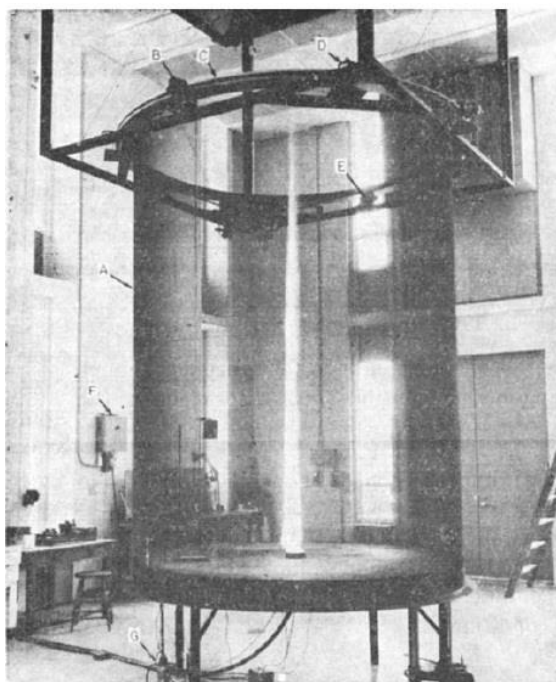


Figura 2.3. Configuração do estudo de Emmons and Ying. (Fonte: Smits *et al.* (2012))

Outro estudo, desta vez realizado com combustível gasoso por Smits *et al.* (2012), através de uma estrutura com a fonte de combustão na base e centrada relativamente a duas paredes semicirculares com diâmetro de 30cm que a envolviam. Estas paredes apareciam colocadas frente a frente com um determinado desvio horizontal para permitir a entrada de ar. Os autores concluíram que se estabeleceram vórtices de fogo e que a altura de chama depende do fluxo ou caudal do combustível mas de forma pouco evidente.

Martin *et al.* (1976) construíram uma câmara de fogo, como se pode ver na Figura 2.4, a fim de produzirem vórtices de fogo para estudarem as suas taxas de queima. A câmara em forma de cilindro estava dividida em três anéis com camadas de madeira. Cada secção da câmara tinha 71cm de altura e 84cm de diâmetro, tinha uma base com 19cm para permitir a entrada de ar, o que resultava numa câmara com um total de 232cm de comprimento. O topo foi coberto por um contraplacado com uma abertura de 30,5cm de diâmetro que impedia a entrada de ar frio e a interrupção periódica do vórtice. Neste estudo utilizaram-se blocos de madeira como combustível com diferentes dimensões e valores de humidade para fazer as medições das taxas de queima. Os autores verificaram que nos ensaios nos quais se verificaram formação de vórtices, os blocos ardião de 1,42 até 4,2 vezes mais rápido do que nos ensaios sem a formação dos mesmos.

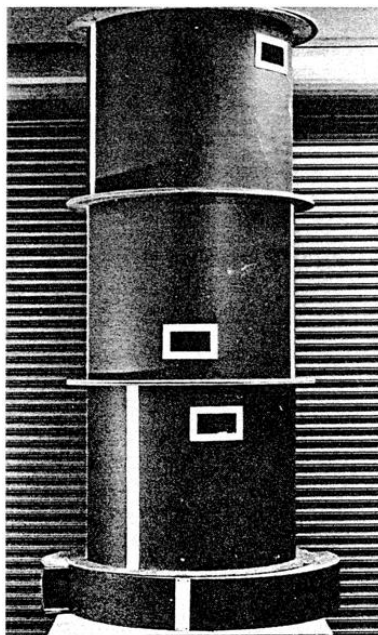


Figura 2.4. Câmara de fogo de Martin, Pendleton e Burgess. (Fonte: Martin *et al.* (1976))

Lei *et al.* (2011) realizaram um estudo para estabelecer relações entre taxas de queima, alturas de chama e temperaturas de chama de vórtices de fogo. Analisaram dois tipos de cenário: 1) queima com vórtice de fogo e 2) queima com chama mas sem vorticidade. Concluíram que as taxas de queima dependem do diâmetro do reservatório tanto na presença do vórtice como na ausência deste, no entanto, a transição para uma queima turbulenta ocorre assim que se aumenta o diâmetro do reservatório. Estabeleceram uma relação crescente entre a altura de chama e o produto da potência com a circulação ambiente.

Lei *et al.* (2012) realizaram um estudo sobre taxas de combustão de vórtices de fogo formados a partir da queima de combustível líquido ejetado em regime laminar e turbulento na câmara de combustão. O fluxo de entrada na camada limite acima da superfície onde se encontra o combustível consiste em duas regiões: uma região reativa externa e uma região não-reativa interna, aplicando-se o modelo de filme estacionário e a analogia de Chilton-Colburn. As taxas de queima de combustível são correlacionadas com a circulação ambiente e com o diâmetro do reservatório do combustível para regimes laminar e turbulento, respectivamente. Ainda no mesmo estudo, os autores afirmam que um vórtice com contornos suaves de chama indica a presença de regime laminar. A transição de regime laminar para turbulento ocorre no fluxo da entrada de ar e com o aumento do diâmetro da base do combustível. Embora o mecanismo de transição não seja claro eles propõem que um

fluxo mais axi simétrico criaria um vórtice mais estável em regime laminar, como é o caso de estudo de Emmons and Ying (1967), onde as condições fronteira (dois semi cilindros) contribuem para um escoamento mais axi simétrico. Diâmetros baixos e escoamentos mais axi simétricos originam vórtices de fogo em estado laminar, contrariamente, diâmetros altos e escoamentos menos axi simétricos produzem um estado turbulento.

Zhou *et al.* (2012) estudaram o efeito do fluxo de circulação sobre a dinâmica de combustão de vórtices de fogo. Os autores estabeleceram relações para a taxa de queima, altura de chama, temperaturas radiais e taxas de fluxo de massa para vórtices de fogo. O fluxo de circulação ajuda a aumentar a área de contato de combustível com a chama e a área real da superfície do combustível resultando numa maior taxa de queima. É indicado que o núcleo rico em combustível, no corpo da chama do vórtice de fogo, afeta significativamente a distribuição da temperatura radial na região de chama contínua. O corpo de chama é descrito como a combinação de um cilindro com um cone.

Outra pesquisa realizada nesta temática foi a de Lei *et al.* (2013), onde foram estudadas as instabilidades de chama em vórtices de fogo, que se definem pela revolução do corpo de chama na transição para um vórtice de fogo e a mudança de orientação do eixo rotacional da chama de um vórtice de fogo estável. As observações experimentais mostraram que, na formação do vórtice de fogo, toda a chama está inclinada e vai girando em torno do eixo geométrico de simetria com o aumento da velocidade angular. É também concluído que a velocidade de entrada do escoamento flutua sincronamente com a revolução da chama.

Os estudos de Lei *et al.* (2011), Lei *et al.* (2012), Lei *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2012) foram todos realizados na mesma estrutura base, que consiste numa torre quadrada com dois metros de largura e quinze de altura, delimitada por vidros temperados e aberta no topo. Cada face tem uma abertura vertical de 20cm junto à periferia para promover a entrada de ar, impondo um escoamento rotacional necessário para produzir vórtices de fogo. A base constituída por madeira de pinho, com um buraco redondo no centro geométrico com 60cm de diâmetro e 10cm de profundidade. Foram encaixados anéis de madeira na base da estrutura para se poderem fazer ensaios com diferentes diâmetros de combustível. O reservatório com combustível estava ligado a uma balança eletrónica para a medição da variação de massa. O gerador de vórtices, utilizado neste estudo, é muito semelhante à estrutura anteriormente descrita e foca-se nos mesmos princípios para a formação de vórtices de fogo.

Lei *et al.* (2010) afirmam que “Mesmo com 50 anos de pesquisa, a dinâmica de combustão por vórtices de fogo está longe de ser completamente esclarecida, principalmente devido a uma escassez de investigação experimental quantitativa”.

Conforme Forthofer *et al.* (2003) afirmam, ainda há muito para compreender e entender sobre este fenómeno, apesar da observação e estudos que já foram feitos revelarem algumas das principais características deste fenómeno de comportamento extremo do fogo.

2.4 Estudo anterior realizado na ADAI/CEIF

Este trabalho é o seguimento de um outro trabalho, que foi realizado por Pinto (2014) no gerador de vórtices (GV), utilizando uma metodologia ligeiramente diferente.

O estudo de Pinto (2014) foi elaborado no GV quando o escoamento era realizado naturalmente através da combustão pelas entradas de ar laterais. A estrutura ainda não estava equipada com ventiladores e a sua base tinha menos 50cm de altura. Neste estudo anterior não foram registados valores de temperaturas nem velocidades de escoamento tal como foi feito no presente trabalho. Foram realizados ensaios com diferentes combustíveis e concluiu-se que o uso de feno e de caruma necessitavam de uma secagem prévia em virtude do seu alto teor de humidade natural, que dificultava a realização dos ensaios com sucesso, sendo apenas analisados os ensaios realizados com mato.

Nesse trabalho realizaram-se vários ensaios onde se alterava o tipo de cesto que comporta o combustível, compararam-se ensaios realizados dentro e fora do GV, e dentro do GV com as entradas de ar cobertas por folha de alumínio, como mostra a Figura 2.5.



Figura 2.5. GV com entradas laterais cobertas por folha de alumínio. (Fonte: Pinto (2014))

Em ensaios realizados dentro do GV, concluiu-se que o diâmetro máximo da chama é inferior e que as potências e alturas de chama são maiores comparativamente aos ensaios realizados fora deste.

Foi realizado um ensaio em que se forçou, numa entrada lateral, o escoamento com uma velocidade de 4 m.s^{-1} , o sucesso deste ensaio levou a que se instrumentasse o GV com quatro ventiladores (um para cada entrada) para forçar a entrada de ar.

Ao contrário de outros estudos, este trabalho foi realizado com combustíveis florestais.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O presente capítulo tem como objetivo a descrição do equipamento, do procedimento experimental e do tratamento de dados.

A disposição do equipamento para a realização dos ensaios está representada na Figura 3.1, onde “C1” é o computador 1, “C2” o computador 2, “VF” o variador de frequências, “CF” a câmara de filmar e “GV” o gerador de vórtices. Estes equipamentos irão ser descritos de seguida.

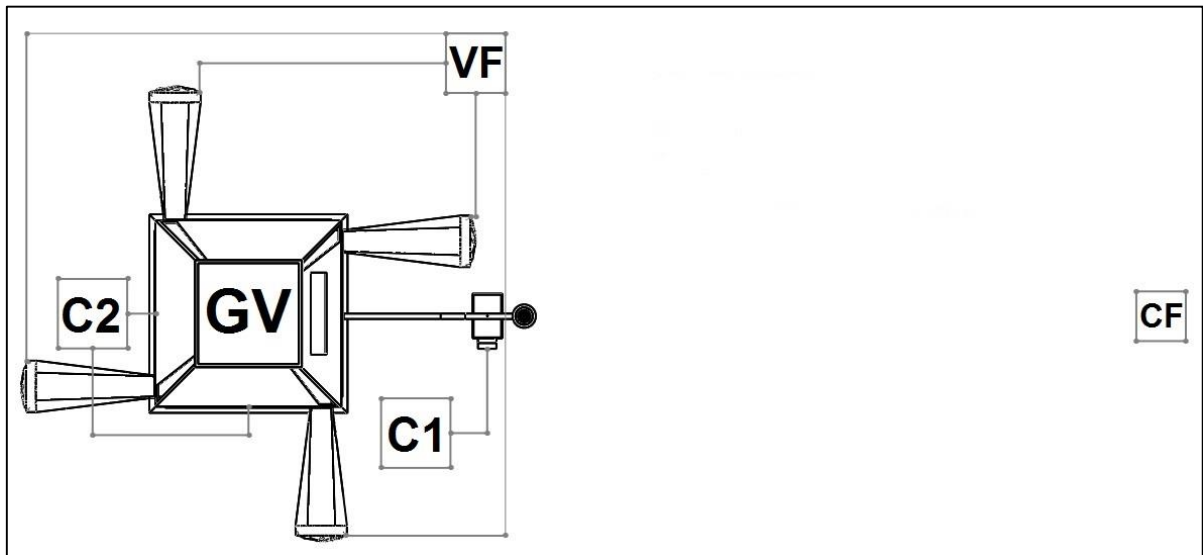


Figura 3.1. Disposição dos equipamentos no local de ensaios.

A disposição do equipamento é complementada com a Figura 3.4, onde se visualizam os equipamentos através de uma fotografia tirada ao aparato experimental.



Figura 3.2. Aparato experimental com a identificação dos equipamentos.

3.1 Equipamento

3.1.1 Gerador de vórtices

O LEIF adquiriu no dia seis de Novembro de 2013 uma estrutura denominada Gerador de Vórtices (GV), concebida e desenhada na ADAI, com aproximadamente oito metros de altura.

O GV tem quatro faces, é constituído por uma base e uma torre, como se pode ver na Figura 3.3, tendo a base cerca de dois metros de altura e quatro metros quadrados de secção, e a torre seis metros de altura e 1 metro quadrado de secção.



Figura 3.3. Distinção entre torre e base do GV.

Na base do GV estão acoplados quatro ventiladores colocados tangencialmente que exercem um escoamento assimétrico, promovendo a formação do vórtice de fogo no sentido anti-horário. A base é constituída em chapa de aço em todas as faces, tendo numa delas uma janela e uma secção de visualização, em vidro temperado.

Na torre do GV, duas das quatro faces são em chapa de aço e as outras duas em vidro temperado para possibilitar a visualização dos vórtices de fogo.

Tanto a base como a torre têm uma abertura vertical do lado direito de cada uma das faces para promover o fluxo de rotação através do escoamento induzido naturalmente pela combustão. O escoamento final resulta do escoamento natural originado pela existência das aberturas laterais, da intensidade da combustão e do escoamento forçado promovido pelos ventiladores.

Como se pode ver, a Figura 3.4 representa o esquema da formação do vórtice de fogo com as linhas de escoamento induzido naturalmente pelas aberturas.

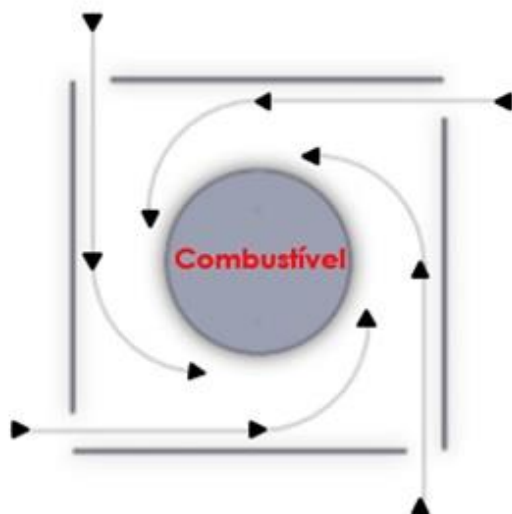


Figura 3.4. Esquema da formação do vórtice de fogo.

Na Figura 3.5 está representado um esquema do GV e o seu perfil com as principais medidas, em metros.

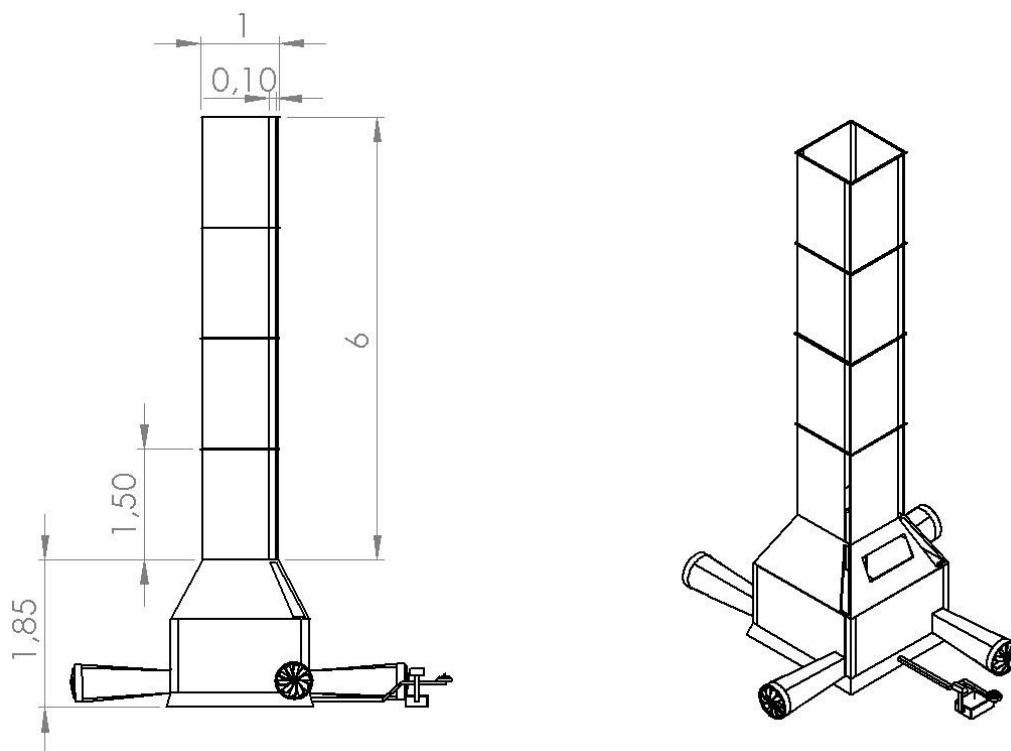


Figura 3.5. Perfil e esquema do GV com as principais medidas

3.1.2 Balanças eletrônicas

Na realização dos ensaios utilizaram-se duas balanças com funcionalidades diferentes. A primeira balança é utilizada para a pesagem do combustível antes da realização do ensaio (A&D HW-100KGL com 1 g de precisão). A segunda balança, que está ligada ao computador 1 (Figura 3.6) permite o registo do decaimento de massa do combustível no interior do GV durante o ensaio de combustão (HW - 15K d=15kg × 0,02 kg).

Dada à impossibilidade da colocação da balança no interior da base do GV, devido às altas temperaturas que se atingem, foi construído um mecanismo em alavanca que liga a balança por um braço a uma plataforma na base do GV onde são colocados os cestos com combustível. O comprimento dos braços do mecanismo é igual não existindo nenhum fator de conversão.



Figura 3.6. Computador e mecanismo que liga a balança à base do GV para registo do decaimento de massa.

3.1.3 Cesto

Apesar de existirem vários cestos com diferentes configurações, neste estudo é apenas utilizado um cesto com 0,76m de altura e 0,5m de diâmetro. Na Figura 3.7 está representado o cesto com e sem combustível.

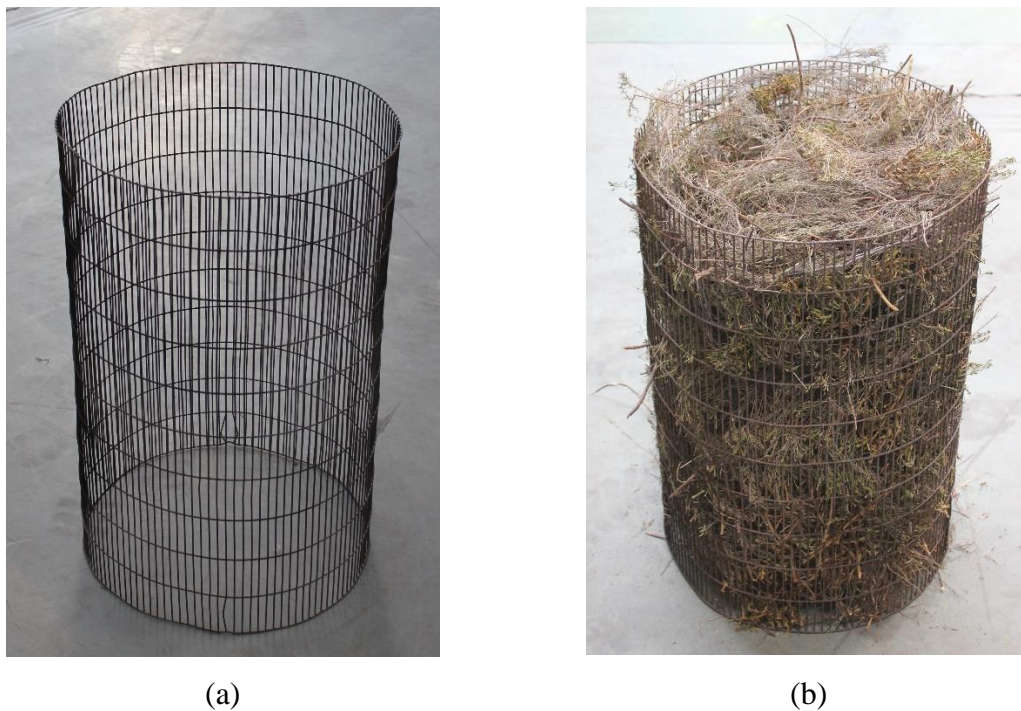


Figura 3.7. Cesto: (a) cesto sem combustível; (b) cesto com combustível.

A Figura 3.8 mostra o cesto dentro do GV no fim de um ensaio, onde podem ser observadas partículas incandescentes que seguem uma determinada trajetória com vorticidade, deixando um rasto luminoso. O comprimento do rasto deixado pelas partículas incandescentes pode ser traduzido pela sua velocidade, um comprimento mais longo indica uma velocidade maior relativamente a um comprimento menor.



Figura 3.8. Cesto no fim de um ensaio.

3.1.4 Analisador do teor de humidade

De modo a analisar o teor de humidade do combustível, utilizou-se um analisador de teor de humidade (OHAUS MB50 com precisão = 0,001g Max = 51 g). Este analisador seca uma amostra que fica sujeita a uma temperatura de 105°C durante aproximadamente doze minutos, determinando o valor do teor de humidade (base húmida) em percentagem. Devido à diversidade da composição do mato, procede-se à recolha heterogénea e proporcional das diferentes espécies que contêm diferentes teores de humidade de modo a que a amostra analisada seja representativa do combustível do ensaio. A massa de combustível pretendida para a realização do ensaio é em base seca, conseqüentemente terá que se adicionar o excesso de massa a partir da humidade através da Equação (3.1), onde m_t é a massa total do combustível, THC é o teor de humidade do combustível e m_0 a massa inicial do combustível.

$$m_t = (1 + THC) \times m_0 \quad (3.1)$$

3.1.5 Ventiladores e variador de frequência

A velocidade de rotação dos ventiladores é proporcional à sua frequência de alimentação. Para uma frequência mais alta obtêm-se valores de rotação mais altos, que se traduzem numa maior velocidade de escoamento (V_{in}) produzido na base do GV (Figura 3.9). Para poder realizar ensaios com diferentes velocidades de escoamento os ventiladores estão ligados a um variador de frequências (Omron Sysdrive 3G3HV Inverter).

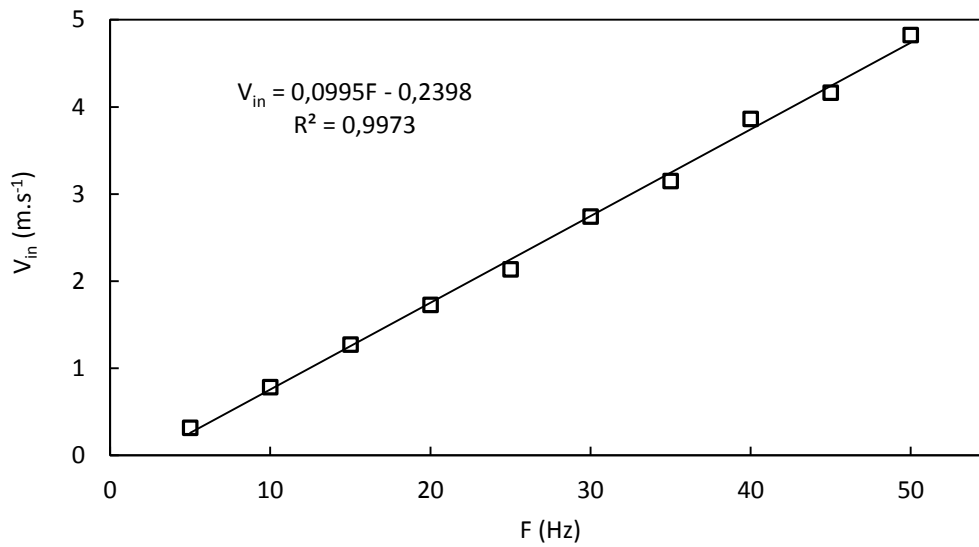


Figura 3.9. Velocidade do escoamento em função da frequência de alimentação.

3.1.6 Proteção da plataforma

Na realização dos primeiros ensaios com ventilação, principalmente nos ensaios com uma elevada velocidade de escoamento, constatou-se que existiam oscilações na plataforma ligada à balança, que resultou na construção de uma estrutura com a finalidade de proteger a base contra a forte ventilação sentida no interior do GV (Figura 3.10).

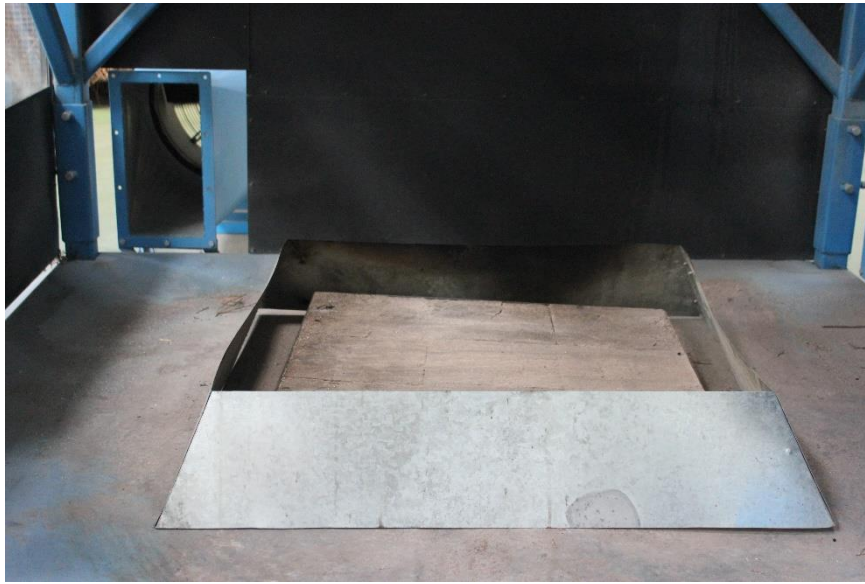


Figura 3.10. Proteção da plataforma para proteger a plataforma do escoamento induzido pelos ventiladores.

3.1.7 Claraboia

Para permitir a exaustão natural dos gases da pluma térmica resultantes da combustão instalou-se uma claraboia como se pode ver na Figura 3.11. A acumulação e o difícil escape dos gases poderia, de alguma forma, influenciar a própria combustão e o desenvolvimento do vórtice. De forma a analisar esta influência, neste estudo realizaram-se ensaios com a claraboia fechada e aberta.

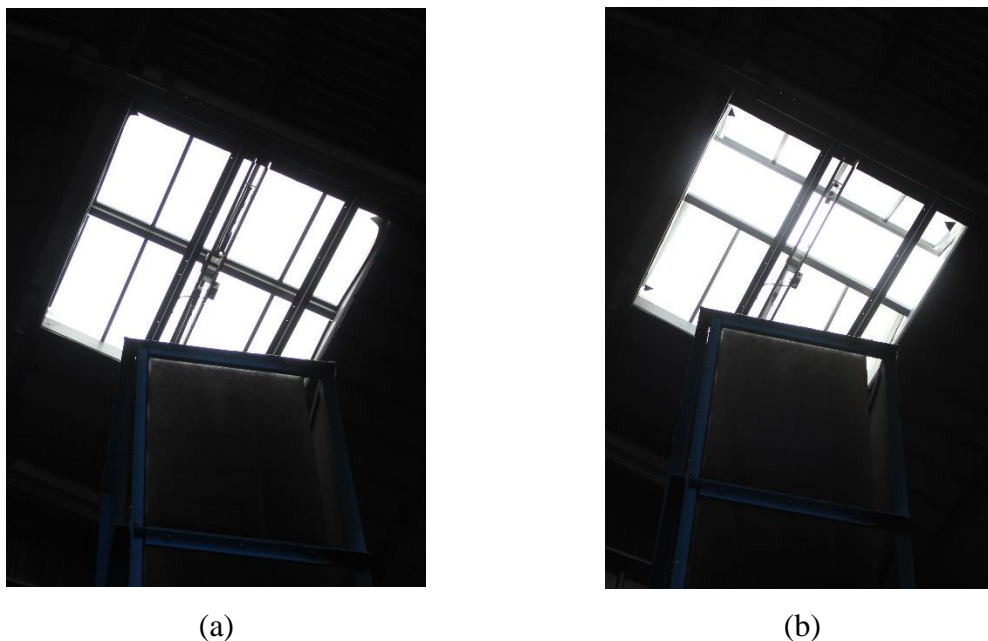


Figura 3.11. Claraboia que permite a exaustão dos gases de combustão: (a) claraboia fechada; (b) claraboia aberta.

3.1.8 Tubos de Pitot e termopares

No GV foram instalados quatro tubos de Pitot: dois na horizontal para medição do escoamento horizontal e os outros dois na vertical para medição do escoamento na vertical. Foram instalados a 0,75m e a 2,25m da base da torre um conjunto de dois tubos de Pitot, um colocado na horizontal e outro na vertical como demonstra a Figura 3.12. Os tubos de Pitot são do tipo S e estão centrados relativamente ao perfil da torre. As velocidades são medidas 30cm a contar do início da face como demonstra a Figura 3.13.

Adicionalmente instalaram-se quatro termopares do tipo K nas extremidades dos tubos de Pitot de forma a determinar a temperatura ao longo do ensaio.

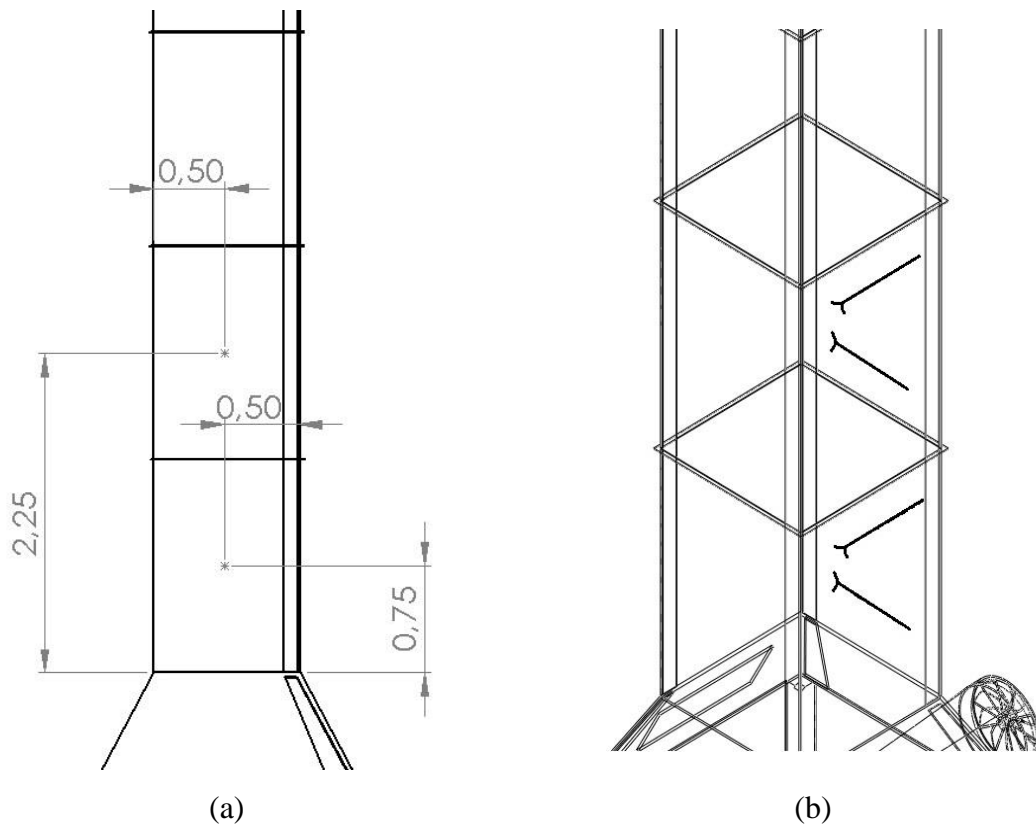


Figura 3.12. Tubos de Pitot: (a) esquema com as distâncias dos tubos de Pitot; (b) esquema com a perspectiva dos tubos de Pitot.

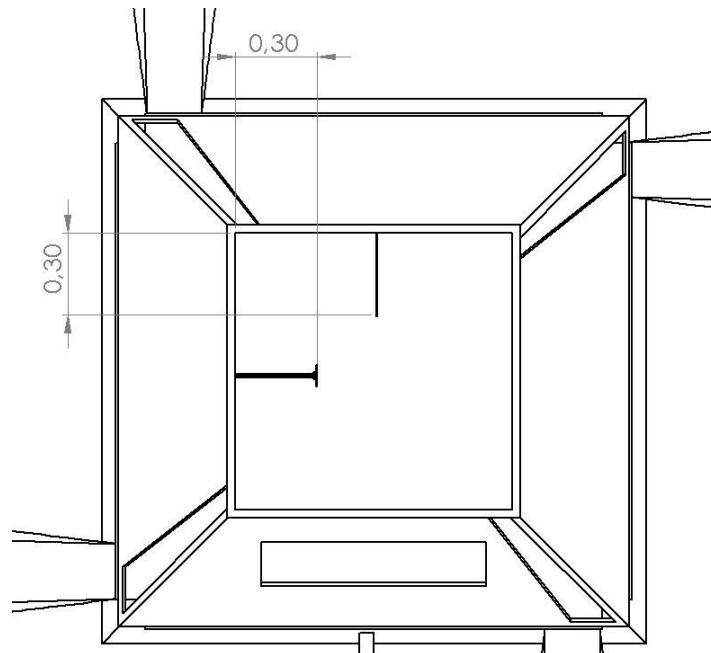


Figura 3.13. Distância da extremidade dos tubos de Pitot à face da torre do GV.

3.1.9 Câmara de filmar

Em todos os ensaios realizados foi utilizada uma câmara de filmar Sony DCR-SR87 para registar as imagens vídeo a fim de as utilizar na determinação das alturas e diâmetros de chama. A câmara de vídeo foi posicionada a aproximadamente 8m do GV e com um ângulo de 20° em relação à horizontal, para que toda a torre possa aparecer na filmagem.

Complementarmente, durante os ensaios, tiraram-se fotografias com uma câmara fotográfica (Canon EOS-550D).

Considerando que a chama está localizada no centro geométrico do GV, através de relações trigonométricas e semelhanças de triângulos, procedeu-se ao cálculo do erro de paralaxe associado às medições das alturas de chama usando as imagens vídeo, como se pode ver na Figura 3.14, para uma altura máxima, em que α é o ângulo entre a altura de chama e o plano horizontal, HR a altura real e HM a altura medida.

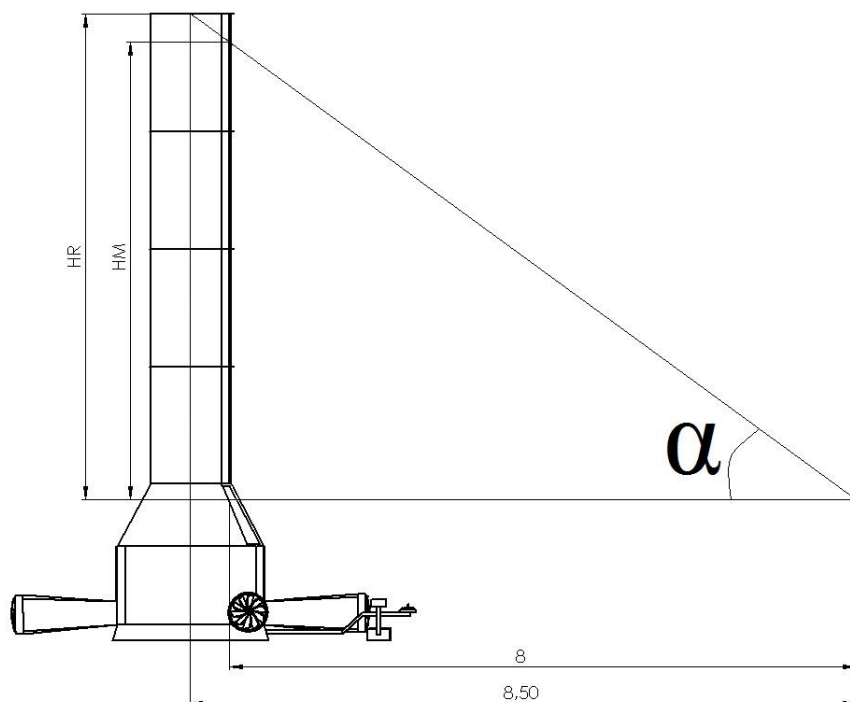


Figura 3.14. Demonstração da diferença entre altura medida e real para uma altura máxima.

Da análise desta figura resulta a Equação (3.2):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{HM}{8} = \frac{HR}{8,5} \quad (3.2)$$

De onde se obtém a Equação (3.3):

$$HR = 1,0625 \times HM \quad (3.3)$$

As alturas medidas são então multiplicadas pelo fator 1,0625 para a determinação da altura real.

3.2 Procedimento experimental

Habitualmente os ensaios eram realizado ao longo do dia. O primeiro ensaio da manhã e da tarde consistia num ensaio sem aquisição de dados que servia unicamente para aquecimento do GV.

Depois da realização do ensaio de aquecimento, o ensaio seguinte apenas era iniciado se a temperatura da plataforma estivesse compreendida entre 50 e 60°C, para que todos os ensaios fossem realizados condições próximas.

Antes de começar o ensaio procedeu-se à medição do teor de humidade do combustível e registou-se o valor da temperatura ambiente e humidade relativa do ar medida numa estação meteorológica portátil existente no LEIF. A quantidade de combustível a utilizar nos ensaios era então pesada e acondicionado num cesto.

De seguida, registava-se a hora do ensaio, coloca-se o cesto no centro geométrico da base do GV, iniciava-se a aquisição de dados de massa, velocidade e temperatura nos computadores 1 e 2. No mesmo instante iniciava-se a filmagem e procedia-se à ignição do combustível no perímetro do cesto, junto à plataforma, como se visualiza na Figura 3.15. A ignição é dada com recurso a um queimador.



Figura 3.15. Ignição do combustível.

No fim da ignição e quando a combustão se apresentava aparentemente estável, ligavam-se os ventiladores na frequência que garantisse a velocidade de escoamento pretendida. A combustão decorria enquanto os dados eram adquiridos e as fotografias tiradas, como as apresentadas nas Figura 3.16 e Figura 3.17. O ensaio era concluído quando os valores de massa permanecem inalterados durante pelo menos cinco segundos.



Figura 3.16. Foto do ensaio GVV28.



Figura 3.17. Fases do ensaio GVV35 separadas entre 20 segundos.

Uma vez o ensaio concluído, retirava-se o cesto e a proteção da plataforma para fora do GV, deixando-os arrefecer e procedia-se à limpeza das cinzas da plataforma bem como da base do GV.

3.3 Tratamento de dados

Os parâmetros em estudo foram transpostos para folhas de cálculo Excel para se proceder ao seu tratamento.

3.3.1 Caracterização térmica do combustível

A energia libertada por unidade de tempo é a potência gerada pelo vórtice, que pode ser calculada a partir da Equação (3.4) onde P é a potência, \dot{m} é a taxa de perda de massa e PCI_H é o poder calorífico inferior em MJ.kg^{-1} tendo consideração o teor em humidade do combustível.

$$P = \dot{m} \times PCI_H \text{ (W)} \quad (3.4)$$

Partindo do estudo de Viana *et al.* (2012) e de EN 14918 (2009) para o cálculo do PCI_H é necessário conhecer o valor do poder calorífico superior (PCS), em base seca, que se converte para poder calorífico inferior (PCI) através da Equação (3.5), onde $w(H)_d$, $w(O)_d$ e $w(N)_d$ são, respetivamente, os teores de hidrogénio, oxigénio e azoto do combustível em base seca que depois é então convertido para poder calorífico inferior tendo em conta o teor de humidade do combustível (PCI_H) através da Equação (3.6) onde THC é o teor de humidade do combustível.

$$PCI = PCS - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d] \text{ (J.g}^{-1}\text{)} \quad (3.5)$$

$$PCI_H = PCI \times (1 - 0,01THC) - 24,43THC \text{ (J.g}^{-1}\text{)} \quad (3.6)$$

Os valores de PCS e das composições químicas elementares do combustível foram retirados de outros estudos recentes. Neste estudo, utilizaram-se os valores de PCS das duas espécies presentes no mato do estudo feito por Lopes (2014) onde a urze toma o valor de $22,4 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e a carqueja o valor de $23,1 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Foram escolhidos os valores deste autor porque o estudo é bastante recente e foi realizado com combustível colhido na mesma região.

A Tabela 3.1 mostra a composição química elementar das duas espécies presentes no mato.

Tabela 3.1. Composição química elementar de *Erica Australis* e *Pterospatum tridentatum*.

Espécie	% N (w/w)	% C (w/w)	% H (w/w)	% S (w/w)	% O (w/w)	% Cinzas (w/w)
Urze (<i>Erica Australis</i>)	0,578	51,704	7,272	0,01	33,026	7,41
Carqueja (<i>Pterospatum tridentatum</i>)	1,021	52,644	7,381	0,01	24,234	14,71

Este procedimento é semelhante ao realizado por Pinto (2014).

3.3.2 Caraterização termodinâmica

Na caraterização termodinâmica as grandezas que são estudadas são a velocidade de escoamento e a temperatura.

A diferença de pressão causada nos tubos de Pitot é convertida através de transdutores Gems 5266-50L (low range differential pressure transmitter) para voltagem. Os transdutores estão ligados a placas que estão inseridas no chassis NI cDAQ-9174. A aquisição das temperaturas é realizada a uma frequência de 1Hz.

3.3.3 Perda de massa e taxa de perda de massa

A abordagem para os valores da perda de massa é igual para todos os ensaios. Os valores da massa são registados ao longo de todo o ensaio em cada segundo numa folha Excel através da ligação da balança ao computador com o *software* RSkey 1.40.

Como na combustão é libertado vapor de água proveniente da humidade do combustível procede-se à análise dos valores da massa, corrigindo-os para base seca. Seguidamente calcula-se a média da massa a cada cinco segundos, ou seja, calcula-se a média da massa relativa a cada intervalo de cinco segundos, utilizando-se os valores em médias.

Por fim, calcula-se a taxa de perda de massa em intervalos de cinco segundos, tendo a taxa de perda de massa máxima um especial interesse para este estudo.

3.3.4 Caracterização geométrica da chama

Na caracterização geométrica da chama obtêm-se dois parâmetros: a altura de chama e o diâmetro de chama.

A altura e o diâmetro de chama são obtidos através do tratamento e análise das filmagens. Em primeiro lugar, com recurso a Adobe Photoshop CC, seleciona-se um *frame* de cinco em cinco segundos ao longo de todo o ensaio. Estes *frames* são posteriormente medidos com a aplicação ImageMeasurement do MATLAB R2015a.

As alturas são medidas nesses *frames* diretamente. Relativamente aos diâmetros, a medição também é feita diretamente a partir das imagens dos *frames*. Se a altura de chama for reduzida a medição é feita apenas num ponto, caso contrário é feita numa média entre dois ou três pontos da chama consoante a sua altura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados obtidos dos ensaios experimentais são analisados e discutidos. Foram realizados um total de 35 ensaios, em que nos três primeiros não se mediram nem analisaram as suas variáveis associadas.

Em Apêndice seguem duas tabelas com os valores máximos das variáveis medidas assim como outros dados relevantes de todos os ensaios.

Todos os ensaios foram realizados com o mesmo cesto e o mesmo combustível (mato), apenas foi variada a velocidade de escoamento forçada na base do GV. Todos os ensaios foram realizados com a claraboia fechada, à exceção dos quatro últimos, em que esta foi aberta. Uma velocidade de escoamento forçada na base do GV com o valor de zero não significa que a velocidade na mesma seja zero, significa que os ventiladores estão desligados e a velocidade de entrada do ar é feita naturalmente pela combustão.

Alguns ensaios apresentaram falhas nas medições das variáveis: os ventiladores pararem a meio do ensaio, a filmagem de um ensaio começa a meio do mesmo, e erros de medição da massa do combustível ao longo do tempo. Durante a apresentação dos resultados e a sua discussão estes erros e a que ensaios correspondem serão devidamente referidos e identificados.

4.1 Perda de massa e taxa de perda de massa

Verificou-se que, independentemente do valor da velocidade forçada na base do GV ou a ausência desta, as curvas de perda de massa são semelhantes para todos os ensaios.

Como se pode ver na Figura 4.1 um exemplo da curva da massa e da taxa de perda de massa em função do tempo.

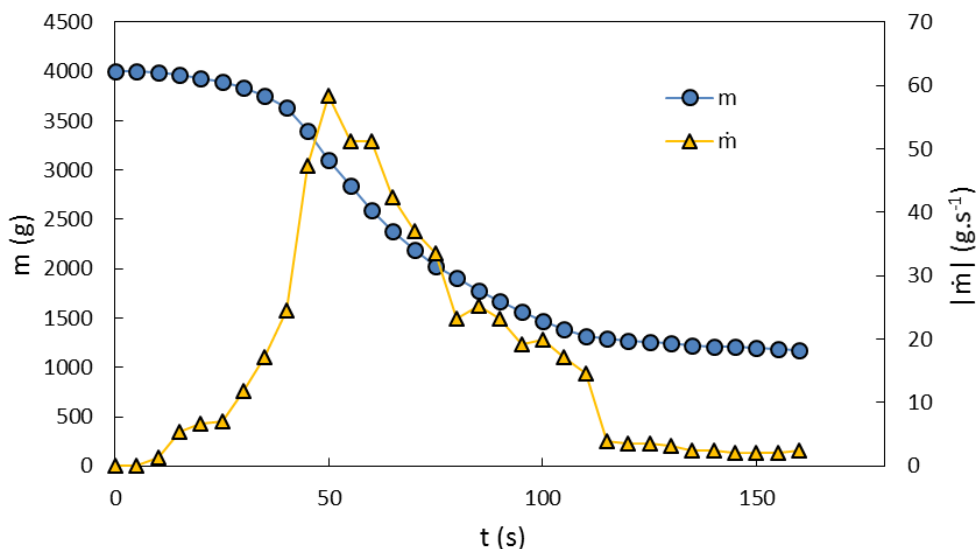


Figura 4.1. Perda de massa e taxa de perda de massa do ensaio GVV31.

Da Figura 4.1 conclui-se que, a perda de massa está dividida em três fases, uma primeira fase que se assemelha a um decréscimo linear, uma segunda que se assemelha a um decaimento exponencial e uma terceira a um decréscimo linear. Relativamente à taxa de perda de massa, conclui-se que o seu pico e valores máximos ocorrem na parte do decaimento exponencial da massa, como seria de esperar.

Posto isto, realizou-se uma análise dos decaimentos exponenciais como se pode ver na Figura 4.2, a todos os ensaios, traçou-se uma exponencial para as segundas fases das perdas de massa a fim de avaliar o seu coeficiente (a) de decaimento exponencial como mostra a Equação (4.1).

$$m = m_0 \times e^{-(at)} \tag{4.1}$$

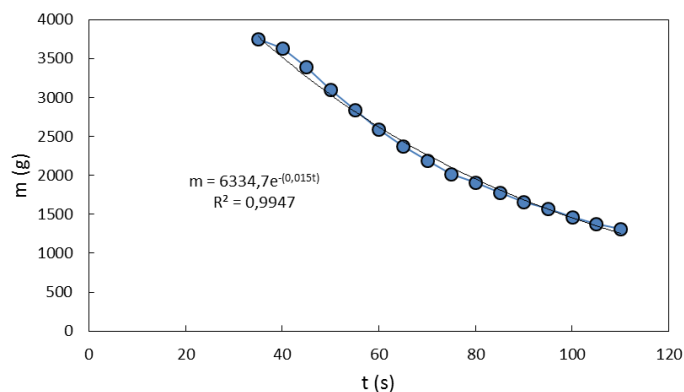


Figura 4.2. Segunda fase da perda de massa do ensaio GVV31.

A Tabela 4.1 mostra o coeficiente (a) de todos os ensaios, para as várias velocidades de escoamento forçadas na base do GV (V_{in}), e a média dos coeficientes (\bar{a}) não contabilizando os ensaios realizados com a claraboia aberta, para cada V_{in} .

Tabela 4.1. Coeficiente (a) e média do coeficiente (\bar{a}) para as várias velocidades (V_{in}).

Ensaio	a	V_{in} (m.s ⁻¹)	\bar{a}
GVV4	0,013	0	0,013
GVV10	0,013		
GVV16	0,012		
GVV25	0,014		
GVV34	0,013		
GVV27	0,014	0,31	0,0135
GVV30	0,013		
GVV6	0,014	0,78	0,0135
GVV14	0,014		
GVV22	0,014		
GVV24	0,012		
GVV32	0,015		
GVV8	0,019	1,73	0,0156
GVV12	0,014		
GVV18	0,013		
GVV20	0,016		
GVV26	0,016		
GVV5	0,008	2,74	0,01275
GVV11	0,012		
GVV13	0,012		
GVV15	0,019		
GVV33	0,017		
GVV9	0,026	3,86	0,0195
GVV17	0,018		
GVV19	0,014		
GVV21	0,02		
GVV35	0,015		
GVV23	0,021	4,83	0,0223
GVV28	0,031		
GVV31	0,015		

Nesta tabela não estão inseridos os ensaios GVV7 e GVV29, ambos devido ao fato dos ventiladores desligarem inesperadamente a meio do ensaio. Os ensaios assinalados a cor-de-laranja foram realizados com a claraboia aberta. Fazendo uma análise conclui-se que os valores obtidos com a claraboia aberta são superiores aos obtidos com a claraboia

fechada, no entanto o escasso número de ensaios realizados com a claraboia aberta não permite uma conclusão mais profunda, sendo necessário realizar mais ensaios com a claraboia aberta.

Como se pode ver também na Figura 4.3, a média dos coeficientes (\bar{a}) com os respectivos desvios e os quatro ensaios realizados com a claraboia aberta assinalados a cor-de-laranja em função da V_{in} , onde foi ajustada uma equação polinomial de 2º grau. Retirou-se o valor mínimo da média do coeficiente \bar{a} (0,01275) a todos os valores para forçar a equação polinomial de 2º grau a obter o mínimo no ponto zero.

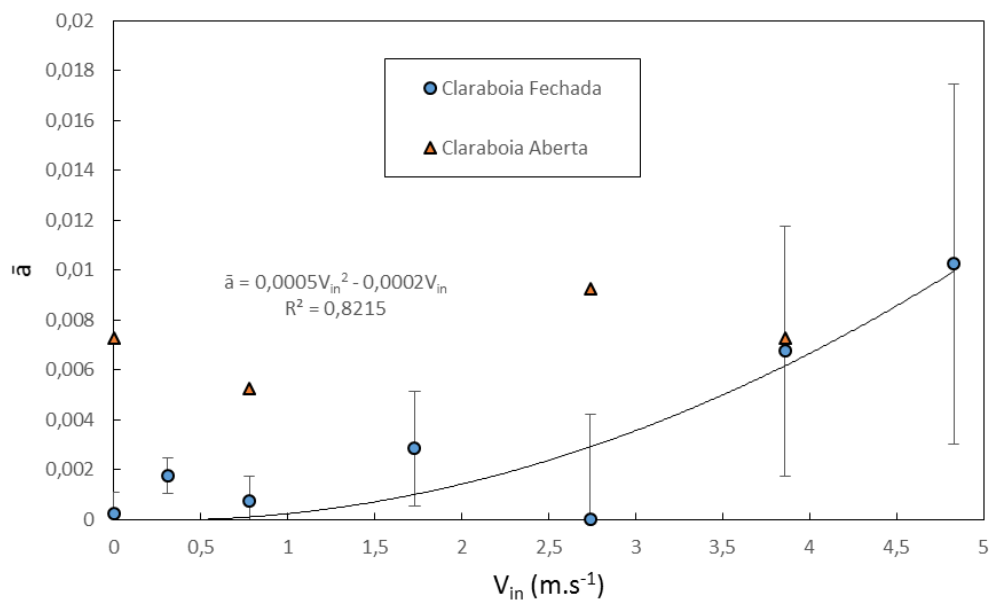


Figura 4.3. Média dos coeficientes (\bar{a}) e ensaios realizados com a claraboia aberta em função da velocidade de escoamento (V_{in}).

Foi elaborado um gráfico que mostra as médias dos valores máximos de taxa de perda de massa ($\dot{m}_{máx}$) em função da V_{in} , como se pode ver na Figura 4.4, onde não se contabilizaram os ensaios realizados com a claraboia aberta.

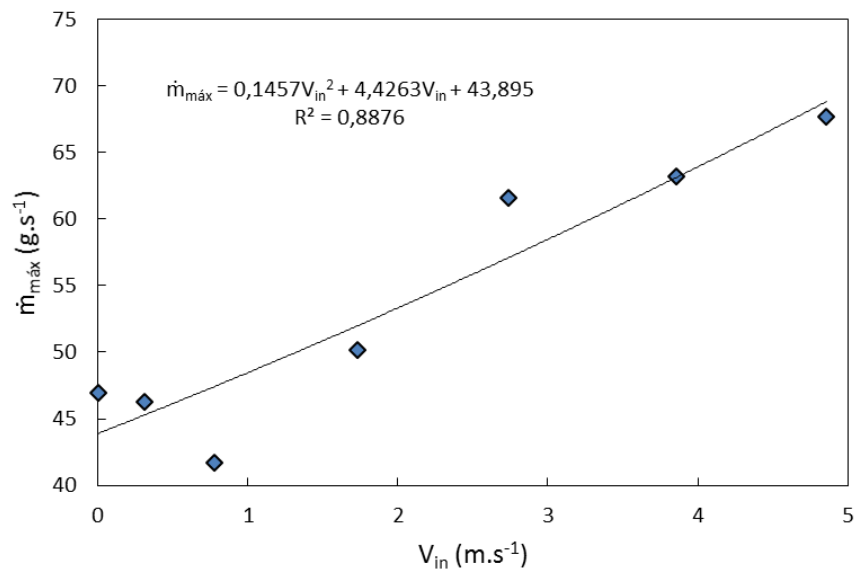


Figura 4.4. Média da taxa de perda de massa máxima ($\dot{m}_{m\acute{a}x}$) em função da velocidade de escoamento (V_{in}).

Como seria de esperar, quanto maior for a velocidade de escoamento, maior serão as taxas de perda de massa máximas atingidas.

4.2 Altura e diâmetro de chama

Um vórtice de fogo é caracterizado pela sua grande altura de chama e pelo seu diâmetro reduzido.

Estas variáveis foram medidas ao longo dos ensaios como se pode ver na Figura 4.5 onde H e D são, respetivamente, a altura e o diâmetro de chama do ensaio GVV32:

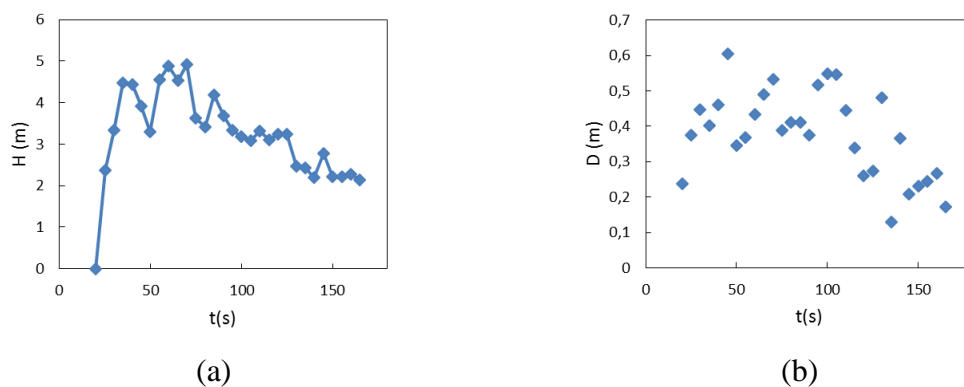


Figura 4.5. Altura e diâmetro de chama do ensaio GVV32: (a) Altura em função do tempo; (b) Diâmetro em função do tempo.

Da Figura 4.5 observa-se a curva típica da variação da altura de chama ao longo do tempo e o registo dos diâmetros de chama também ao longo do tempo. Pinto (2014) comparou ensaios dentro do GV (com vorticidade) e ensaios fora do GV (sem vorticidade), concluindo que a altura máxima de chama atingida num ensaio com vorticidade pode elevar-se até um metro em relação a um ensaio sem vorticidade.

Neste estudo pode-se afirmar que a altura de chama pode elevar-se cerca de 1,5m desde os ensaios sem ventilação até os ensaios realizados com uma ventilação forçada igual ou superior a $2,74 \text{ m.s}^{-1}$.

Relativamente ao diâmetro de chama os resultados são inconclusivos, visto que seria de esperar um diâmetro menor que o diâmetro do cesto, o que não se verifica.

A média dos valores máximos de altura de chama foi relacionada com V_{in} como se pode ver na Figura 4.6. Para esta relação não se contabilizaram os ensaios feitos com a claraboia aberta.

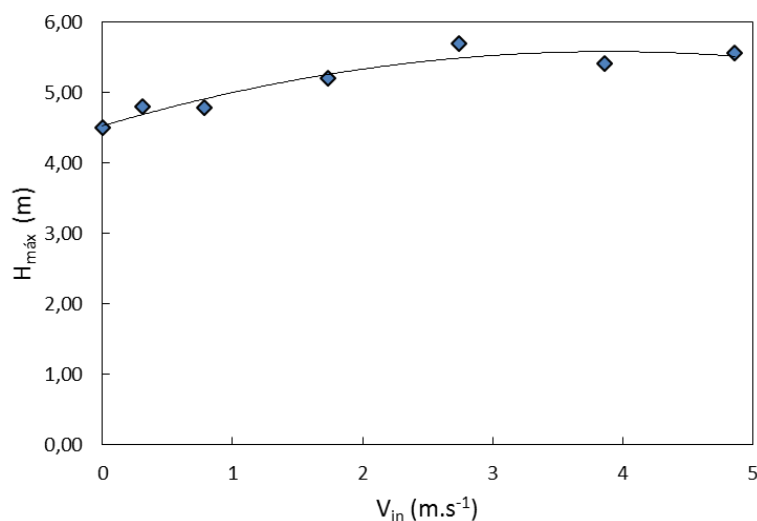


Figura 4.6. Média das alturas máximas ($H_{máx}$) em função da velocidade de escoamento (V_{in}).

Como se pode constatar pela Figura 4.6, há um crescimento da altura de chama com o aumento da V_{in} até $2,74 \text{ ms}^{-1}$, registando-se uma estagnação para valores superiores de V_{in} . Pensou-se que, devido aos ensaios terem sido realizados com a claraboia fechada, a acumulação de fumos no topo do GV poderia influenciar e prejudicar a subida da altura de chama para velocidades de escoamento forçado maiores que $2,74 \text{ ms}^{-1}$. Nos ensaios realizados com a claraboia aberta, só um se realizou com uma $V_{in} > 2,74 \text{ ms}^{-1}$, onde o valor da altura máxima registado, é ligeiramente superior ao da média das alturas de chama para ensaios realizados com

a claraboia fechada. Contudo este resultado não é suficiente para poder afirmar que a acumulação de fumos impede a progressão da chama, são necessários mais ensaios com a claraboia aberta.

As alturas máximas registaram-se nos ensaios GVV11 e GVV28 com valores aproximados de 5,9m, realizados com V_{in} de 2,74 e 4,83 $m.s^{-1}$, respetivamente.

4.3 Potência gerada pela combustão

A potência gerada pela combustão ou a taxa de libertação de calor depende da perda de massa e do THC. Como já foi referido no capítulo três e como o mato é constituído na sua maioria por urze (*Erica Australis*) e carqueja (*Pterospatum tridentatum*), procedeu-se ao cálculo do $PCI_{médio}$ entre estas duas espécies como se pode ver na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. PCI das espécies e média dos PCI.

Espécie	PCI ($MJ.kg^{-1}$)	$PCI_{médio}$ ($MJ.kg^{-1}$)
Urze (<i>Erica Australis</i>)	20,83	21,17
Carqueja (<i>Pterospatum tridentatum</i>)	21,51	

Através do $PCI_{médio}$ calcularam-se os PCI_H , que dependem do THC, para todos os ensaios, como mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3. PCI_H para todos os ensaios.

Ensaio	THC (%)	PCI_H ($MJ.kg^{-1}$)
GVV4-GVV5	12,1	18,31
GVV6-GVV9	11,4	18,48
GVV10-GVV13	12,8	18,15
GVV14-GVV19	13,6	17,96
GVV20-GVV23	11,34	18,49
GVV24-GVV26	12,48	18,22
GVV27-GVV29	8,3	19,21
GVV30-GVV31	10,96	18,58
GVV32-GVV35	10,11	18,78

A Tabela 4.3 demonstra que o PCI_H depende do THC, apesar da sua variação não ser significativa.

Como se pode ver, na Figura 4.7, a curva característica da potência (P) em função do tempo, do ensaio GVV31, que é semelhante à curva da taxa de perda de massa.

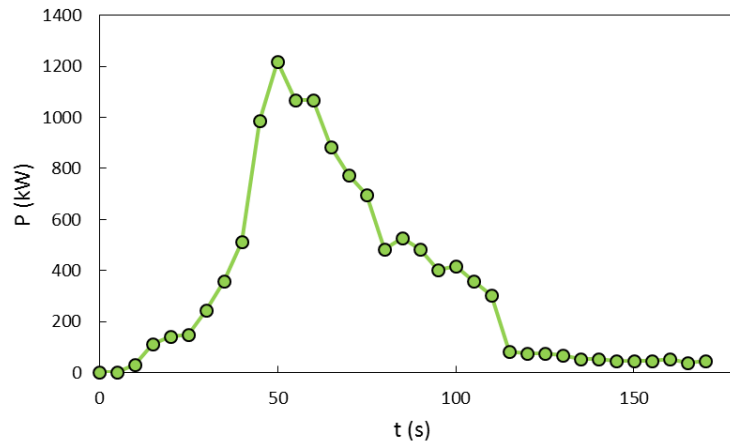


Figura 4.7. Potência gerada pela combustão ao longo do tempo do ensaio GVV31.

Foi produzido um gráfico, como se pode ver na Figura 4.8, das médias das potências máximas para cada velocidade de escoamento forçada, à semelhança do que já foi demonstrado para a média das alturas máximas, não se contabilizando os ensaios realizados com a claraboia aberta. Devido à proximidade dos PCI_H e visto que a potência máxima é atingida no valor de taxa de perda máxima, conclui-se que o aspeto desta figura é semelhante ao da Figura 4.5 (média das taxas de perda de massa máximas em função da velocidade de escoamento forçada).

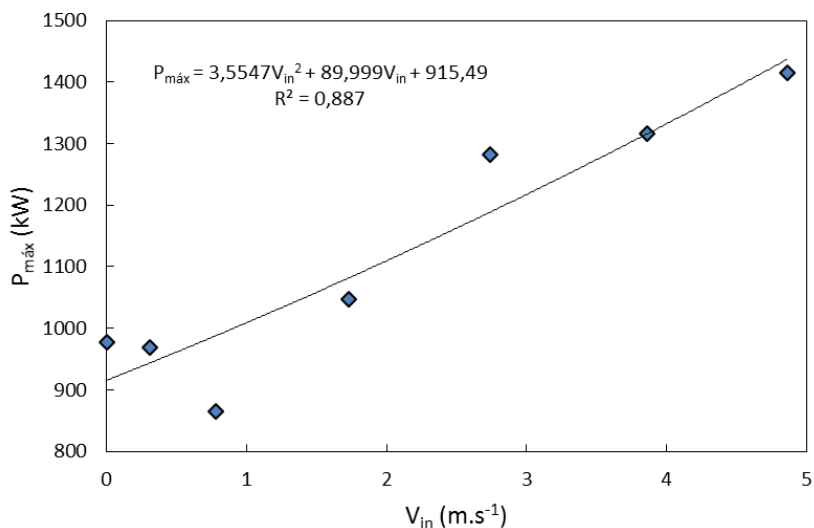


Figura 4.8. Média das potências máximas ($P_{máx}$) em função da velocidade de escoamento (V_{in}).

No estudo de Lei *et al.* (2012) com combustíveis líquidos, registou-se uma potência máxima de 602,52 kW para um diâmetro de 0,5m. Neste trabalho, para o mesmo diâmetro, atinge-se um máximo de 1678 kW para uma V_{in} de 4,83 m.s⁻¹, um valor superior ao registado por Pinto (2014), que foi de 1000 kW, num ensaio sem ventilação.

4.4 Altura de chama e taxa de perda de massa

A altura de chama e a taxa de perda de massa são variáveis muito importantes para este estudo. Como se pode ver, pela Figura 4.9, a altura de chama atinge o seu pico num tempo muito próximo do pico da taxa de perda de massa. Sun *et al.* (2006) compara o aumento no tempo destas duas variáveis para combustíveis florestais (mato característico do sul da Califórnia) na primavera, no outono e para combustíveis mortos. Para a primavera o máximo da altura de chama dá-se muito depois do pico de taxa de perda de massa, para o outono o máximo da altura de chama é atingido ligeiramente depois do pico de taxa de perda de massa e para combustíveis mortos ambas as variáveis atingem os seus máximos aproximadamente ao mesmo tempo. Neste estudo o combustível é colocado num recipiente cilíndrico, muito semelhante ao cesto do GV, em que o diâmetro varia entre 0,3, 0,4 e 0,6 metros e uma altura fixa de 0,2m.

Estes resultados apresentam uma semelhança relativamente a esse estudo para combustíveis mortos, onde o pico da altura de chama está próximo do pico da taxa de perda de massa no tempo.

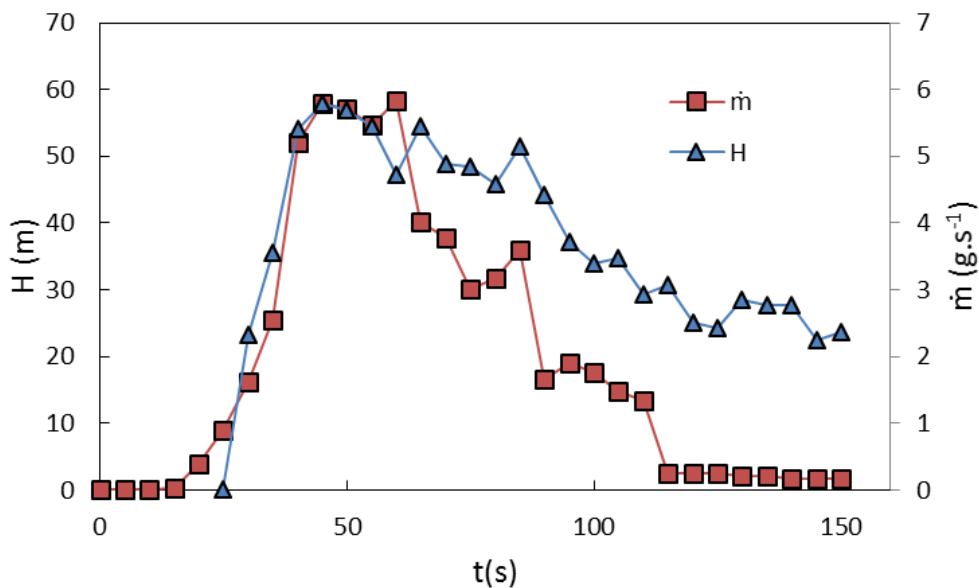


Figura 4.9. Altura (H) e taxa de perda de massa (\dot{m}) do ensaio GVV33 ao longo do tempo.

Neste estudo relacionaram-se as alturas de chama com as taxas de perda de massa, como se pode ver, por exemplo, para o ensaio GVV28 na Figura 4.10.

Foram ajustadas equações potenciais como mostra a equação (4.2) a fim de avaliar a altura inicial (H_0) e o coeficiente b.

$$H = H_0 \times \dot{m}^b \text{ (m)} \tag{4.2}$$

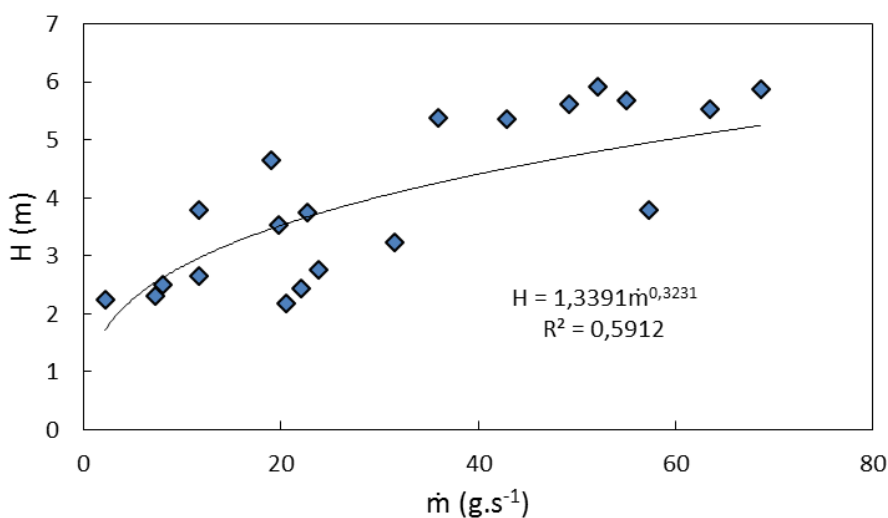


Figura 4.10. Altura (H) em função da taxa de perda de massa (\dot{m}) do ensaio GVV28.

Esta relação foi realizada para todos os ensaios à exceção dos ensaios GVV23, GVV19 E GVV7, e obtiveram-se os valores da altura inicial e do coeficiente como se pode ver na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Análise das dos valores das equações potenciais ajustadas à altura de chama em função da taxa de perda de massa.

Ensaio	H ₀	b	R ²
GVV4	1,12	0,30	0,77
GVV5	1,05	0,34	0,43
GVV6	1,30	0,31	0,71
GVV8	1,19	0,37	0,84
GVV9	1,13	0,35	0,56
GVV10	1,20	0,32	0,85
GVV11	1,17	0,42	0,84
GVV12	1,30	0,33	0,81
GVV13	1,33	0,33	0,59
GVV14	1,21	0,32	0,69
GVV15	1,03	0,40	0,70
GVV16	1,13	0,33	0,76
GVV17	1,21	0,35	0,60
GVV18	1,33	0,32	0,47
GVV20	0,88	0,45	0,80
GVV21	1,27	0,29	0,59
GVV22	1,26	0,30	0,75
GVV24	1,14	0,35	0,74
GVV25	1,34	0,30	0,63
GVV26	1,42	0,30	0,82
GVV27	1,35	0,30	0,80
GVV28	1,34	0,32	0,59
GVV29	1,43	0,29	0,56
GVV30	1,01	0,41	0,67
GVV31	1,36	0,31	0,57
GVV32	1,16	0,35	0,54
GVV33	1,05	0,42	0,72
GVV34	0,89	0,41	0,67
GVV35	1,36	0,33	0,73

Desta Tabela 4.4 resultou um valor da média do coeficiente b de 0,34 e de uma média da altura inicial de 1,20 metros.

Weise *et al.* (2005) realizaram um estudo da relação da taxa de perda de massa e altura de chama para combustíveis vivos. Este estudo conta com mais de 200 ensaios realizados em três tipos de configurações: queima individual de folhas, queima de combustível numa tina circular onde o diâmetro da tina varia entre 0,3, 0,45 e 0,6 metros, e queima de um leito de combustível com 2×1 metros com várias alturas. O combustível usado era mato característico do sul da Califórnia. Este estudo culminou com o ajuste de uma equação potencial, como mostra a equação (4.3), para todos os pontos obtidos em todos os ensaios da altura de chama em função da taxa de perda de massa.

$$H = 0,41 \times \dot{m}^{0.5} \text{ (m)} \quad (4.3)$$

Neste estudo obteve-se a equação (4.4) que é resultante da média das alturas iniciais (H_0) e da média do coeficiente (e).

$$H = 1.20 \times \dot{m}^{0.34} \text{ (m)} \quad (4.4)$$

Da comparação das duas equações conclui-se que, dentro da gama de taxas de perda de massa medidas experimentalmente nos vórtices de fogo e no estudo de Weise *et al.* (2005), os valores da altura de chama (H) são maiores em vórtices de fogo para uma igual taxa de perda de massa (\dot{m}).

4.5 Velocidades e temperaturas do vórtice

Nos ensaios GVV27, GVV28 e GVV29, não foram medidas velocidades nem temperaturas.

4.5.1 Velocidades

Para o estudo das velocidades serão feitas duas abordagens diferentes. Uma abordagem apenas às suas velocidades horizontais e verticais, e uma outra em que se combinam as velocidades resultando num módulo da velocidade com um determinado ângulo β em relação à horizontal, como se pode ver na Figura 4.11.

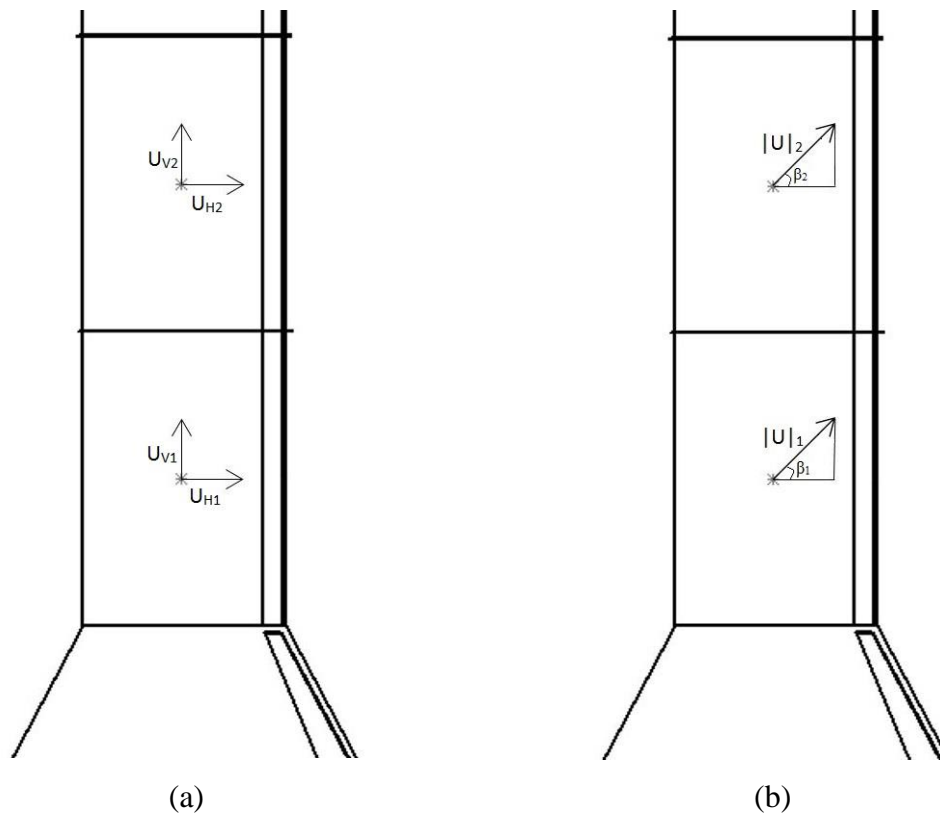


Figura 4.11. Diferentes abordagens às velocidades: (a) velocidades horizontais e verticais; (b) módulo e ângulo das velocidades.

4.5.1.1 Velocidades horizontais e verticais

De todos os ensaios realizados nas mesmas condições, verificou-se a média dos picos de velocidade que se atingiram e escolheram-se os ensaios cujo pico de velocidade se encontrava mais próximo dessa média. Nas seguintes figuras será demonstrado o desenvolvimento das velocidades medidas pelos tubos de Pitot, em função do tempo para ensaios feitos com diferentes velocidades de escoamento forçadas, o eixo do tempo começa em 40 segundos porque é nesse tempo em que, efetivamente, se atingem as velocidades.

Na Figura 4.12 estão as velocidades horizontais para $z=2,70\text{m}$.

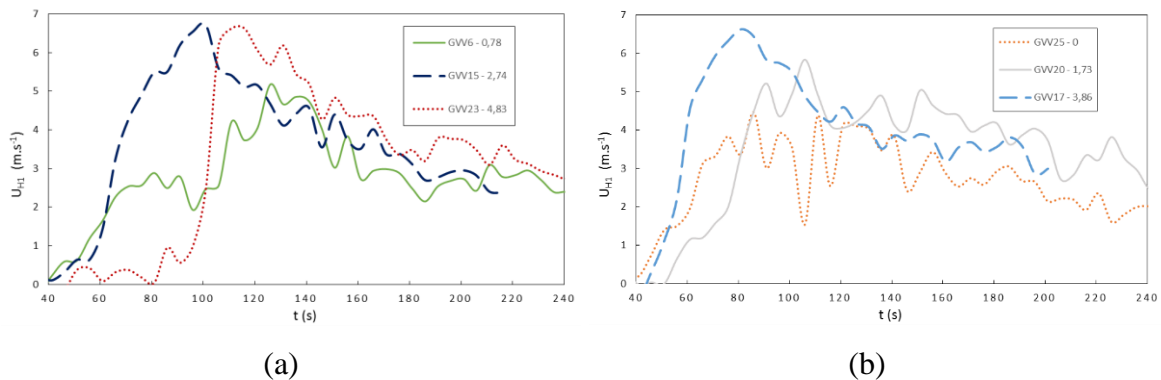


Figura 4.12. Velocidade horizontal para $z=2,70m$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$.

Desta comparação conclui-se que as velocidades atingem valores maiores para velocidades de escoamento forçadas maiores, à exceção do ensaio GVV15, realizado com uma V_{in} de $2,74 m \cdot s^{-1}$, onde a velocidade horizontal atingida é máxima nesta gama de ensaios.

Na Figura 4.13 estão representadas as velocidades horizontais para $z=4,2m$.

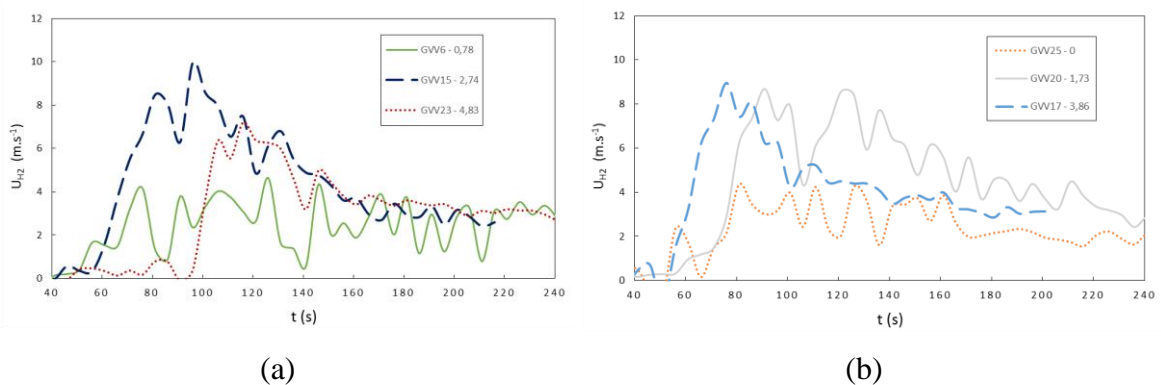


Figura 4.13. Velocidade horizontal para $z=4,20m$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$.

Nesta comparação os resultados são inconclusivos, visto que o pico da velocidade horizontal do ensaio GVV23, realizado com V_{in} de $4,83 m \cdot s^{-1}$, toma um valor menor do que os ensaios GVV17 e GVV20, realizados com V_{in} de $3,86$ e $1,73$, respetivamente.

Na Figura 4.14 estão representadas as velocidades verticais para $z=2,70m$.

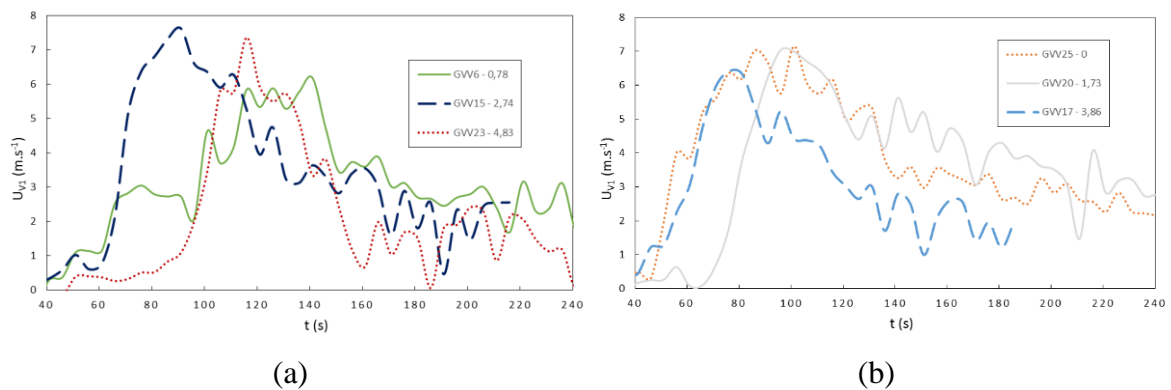


Figura 4.14. Velocidade vertical para $z=2,70\text{m}$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$.

Desta comparação, conclui-se que os picos máximos atingidos pelos ensaios realizados com diferentes V_{in} são todos muito próximos, não existindo qualquer relação entre as velocidades verticais medidas e velocidade de escoamento forçada. O ensaio GVV15, realizado com V_{in} de $2,74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, destaca-se, mais uma vez, pelo pico máximo de velocidade atingida nesta gama de ensaios.

Na Figura 4.15 estão representadas as velocidades verticais para $z = 4.20\text{m}$.

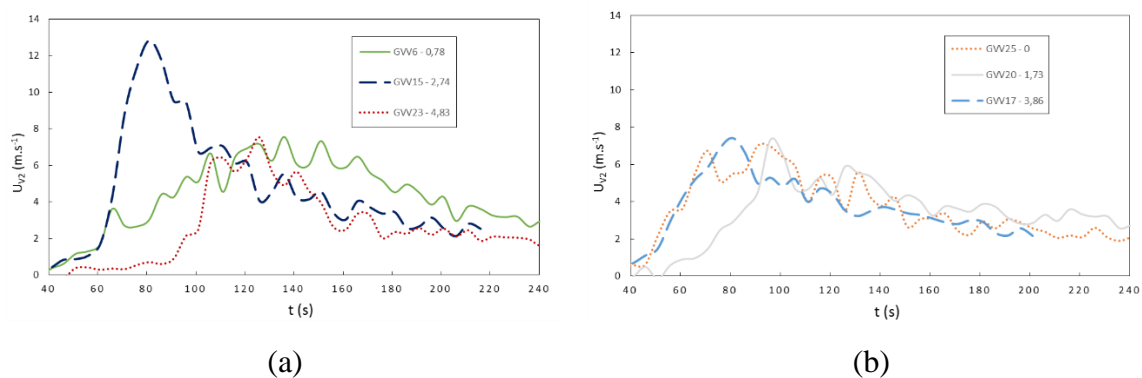


Figura 4.15. Velocidade vertical para $z=4,20\text{m}$: (a) ensaios com $V_{in} = 0,76, 2,74$ e $4,83$; (b) ensaios com $V_{in} = 0, 1,73$ e $3,86$.

Desta comparação vê-se que em todos os ensaios os picos de velocidade vertical máxima atingida são todos muito próximos, a exceção do ensaio GVV15, realizado com V_{in} de $2,74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que, mais uma vez, toma um valor máximo que se destaca dos outros ensaios.

Desta análise conclui-se que o ensaio GVV15, realizado com V_{in} de $2,74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, toma, em todas as velocidades de escoamento medidas, valores máximos. Conclui-se

também que na velocidade horizontal para $z=2,70\text{m}$ existe uma relação crescente entre a velocidade de escoamento medida e a velocidade de escoamento forçada, para $z=4,20\text{m}$ verifica-se o mesmo, à exceção do ensaio do ensaio GVV23, realizado com V_{in} de $4,83\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que toma um valor significativamente menor, não estando consonante com a relação crescente. Para as velocidades verticais os valores medidos, tanto para $z = 2,70$ como para $z = 4.20\text{m}$, são todos muito próximos.

Posto isto, conclui-se que a velocidade forçada influencia a velocidade horizontal do vórtice de fogo mas não influencia a velocidade vertical, e para o ensaio GVV15, realizado com V_{in} de $2,74\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, os valores são máximos para todas as velocidades.

Para tentar compreender melhor esta variação das velocidades horizontais decidiu-se relacionar a média das velocidades horizontais e verticais máximas ($U_{Hmáx}$ e $U_{Vmáx}$) em função da velocidade de escoamento forçada, como mostra a Figura 4.16, para estas relações não se contabilizou o ensaio realizado com V_{in} de $0,31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

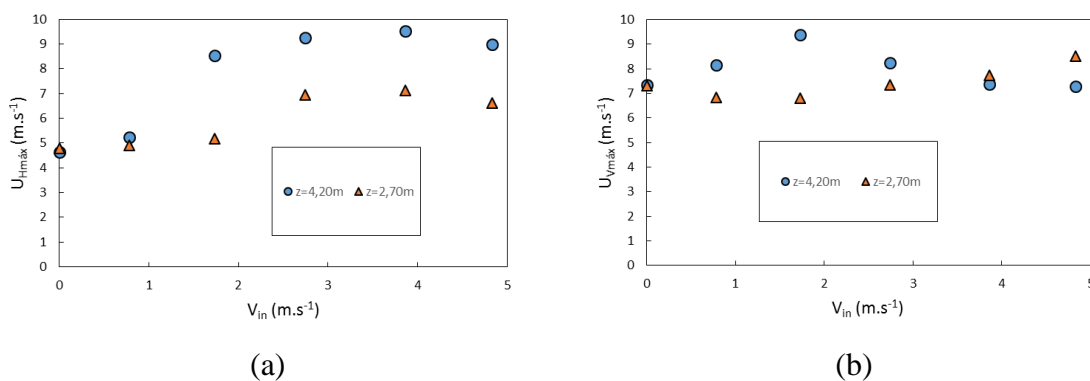


Figura 4.16. Média das velocidades máximas em função da velocidade de escoamento: (a) velocidades horizontais; (b) velocidades verticais.

Através da análise desta figura, conclui-se que existe uma relação de crescimento das velocidades horizontais para as velocidades de escoamento forçadas, á exceção dos ensaios realizados com V_{in} de $4,83\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que não se enquadram neste crescimento. As velocidades horizontais em $z=4,20\text{m}$, para uma V_{in} superior a $0,78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tomam valores muito superiores do que para $z=2,70\text{m}$. Relativamente às velocidades verticais, os valores são todos muito próximos, sendo que para uma V_{in} de $1,73\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, os valores das velocidades atingem o seu máximo para $z=4,20\text{m}$ e o mínimo para $z=2,70\text{m}$.

Para se poder compreender o fato das velocidades no fim do ensaio não voltarem para zero procedeu-se a uma aquisição e análise de dados longa, analisando as velocidades mesmo depois do ensaio estar terminado. Esta análise foi realizada para os últimos seis ensaios. Como se pode ver, pela Figura 4.17 e pela Figura 4.18, para o ensaio GVV35, as velocidades convergem aproximadamente para o valor de 1 m.s^{-1} .

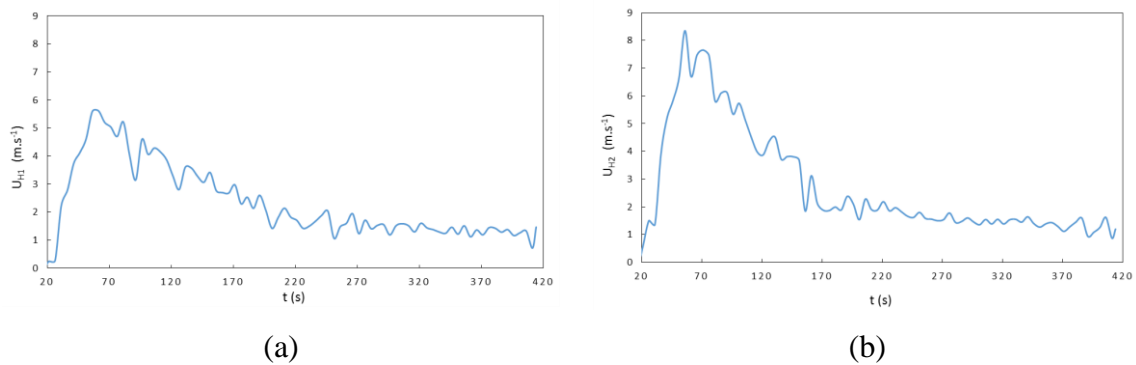


Figura 4.17. Velocidades horizontais ao longo do tempo do ensaio GVV35: (a) velocidade horizontal para $z=2,70\text{m}$; (b) velocidade horizontal para $z=4,20\text{m}$.

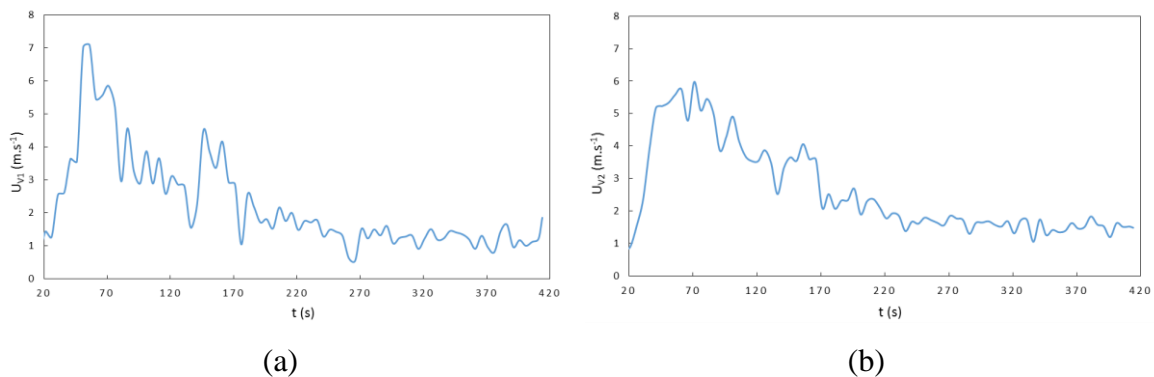


Figura 4.18. Velocidades verticais ao longo do tempo do ensaio GVV35: (a) velocidade vertical para $z=2,70\text{m}$; (b) velocidade horizontal para $z=4,20\text{m}$.

Este fato deve-se a uma corrente de convecção ascendente criada pela combustão lenta que ainda se está a realizar na plataforma. Depois de terminado o ensaio também é possível observar pequenas partículas incandescentes num escoamento ascensional com vorticidade, pelo que os valores aproximados de 1 m.s^{-1} para as velocidades, tanto horizontais como verticais, são perfeitamente aceitáveis.

4.5.1.2 Módulo e ângulo da velocidade

Fazendo um estudo das velocidades pela combinação das suas componentes resulta um módulo da velocidade com um determinado ângulo β em relação à horizontal. Para $\beta = 45^\circ$ as componentes horizontal e vertical da velocidade são iguais, para $\beta < 45^\circ$ a componente horizontal é superior à vertical e para $\beta > 45^\circ$ a componente vertical é superior à horizontal.

Pode-se ver, na Figura 4.19 e na Figura 4.20, a evolução dos módulos das velocidades e dos ângulos ao longo do tempo, do ensaio GVV18.

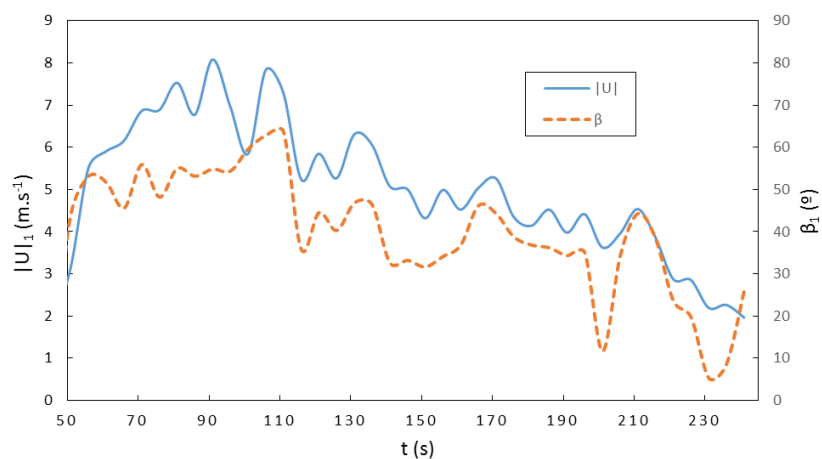


Figura 4.19. Módulo e ângulo da velocidade para $z=2,70\text{m}$ para o ensaio GVV18.

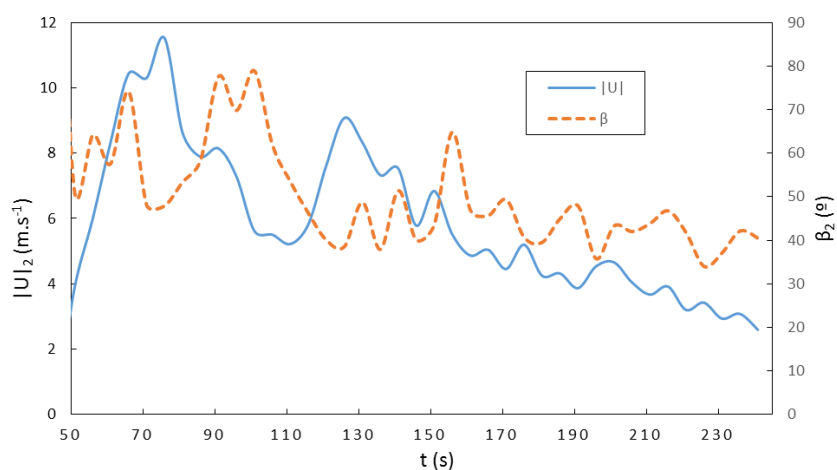


Figura 4.20. Módulo e ângulo da velocidade para $z=4,20\text{m}$ para o ensaio GVV18.

Destas figuras conclui-se que, o ângulo β_1 , para valores próximos do fim do ensaio, toma valores muito próximos de 20° , significando que na parte final do ensaio a

componente horizontal da velocidade é superior à vertical. Para o ângulo β_2 , o ângulo tem uma tendência de se aproximar de 40° , que significa uma componente horizontal mais intensa, mas inferior á que se verifica para $z=2,70\text{m}$.

Este ensaio é só um exemplo, mas, verificou-se que, em geral, o ângulo β_1 nas partes finais dos ensaios, foi superior ao ângulo β_2 , ou seja, a componente horizontal em relação à componente vertical das velocidades para $z=2,70\text{m}$, tende a ser mais intensa do que para $z=4,20\text{m}$. Faz todo o sentido visto que na parte final dos ensaios o vórtice tem alturas de chama curtas, que não chegam a $z=4,20\text{m}$, pelo que a vorticidade faz-se sentir com mais intensidade para $z=2,70\text{m}$.

Analisando as médias dos valores mínimos dos ângulos (β_1 e β_2), para todos os ensaios, a fim de avaliar a componente horizontal em relação á vertical, chegou-se à conclusão que as componentes horizontais para $z=2,70\text{m}$ são, no geral, mais intensas do que para $z=4,20\text{m}$, como mostra a Figura 4.21 que corrobora com os resultados apresentados na Figura 4.19 e na Figura 4.20.

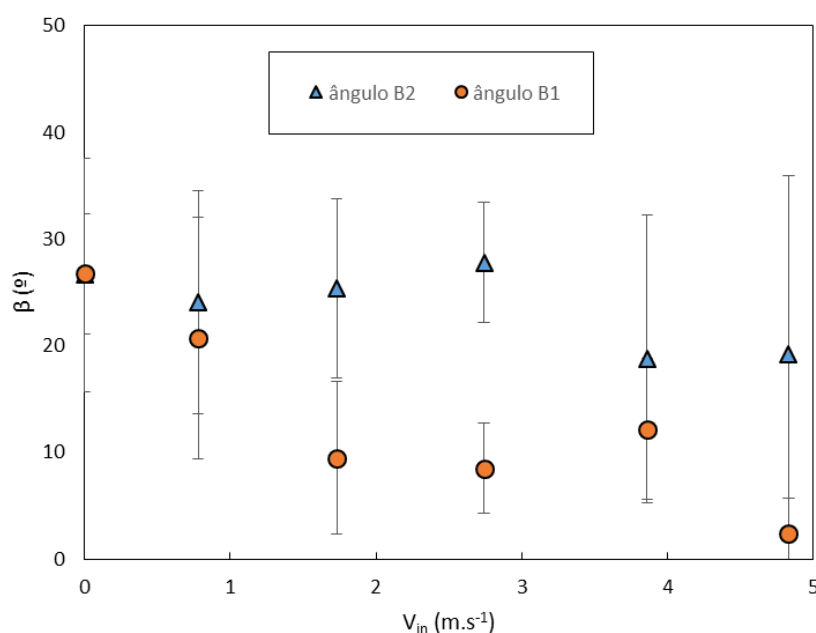


Figura 4.21. Ângulos mínimos atingidos para todos os ensaios em função da V_{in} .

A Figura 4.22 mostra a média dos valores máximos do módulo da velocidade com os respetivos desvios, para cada V_{in} .

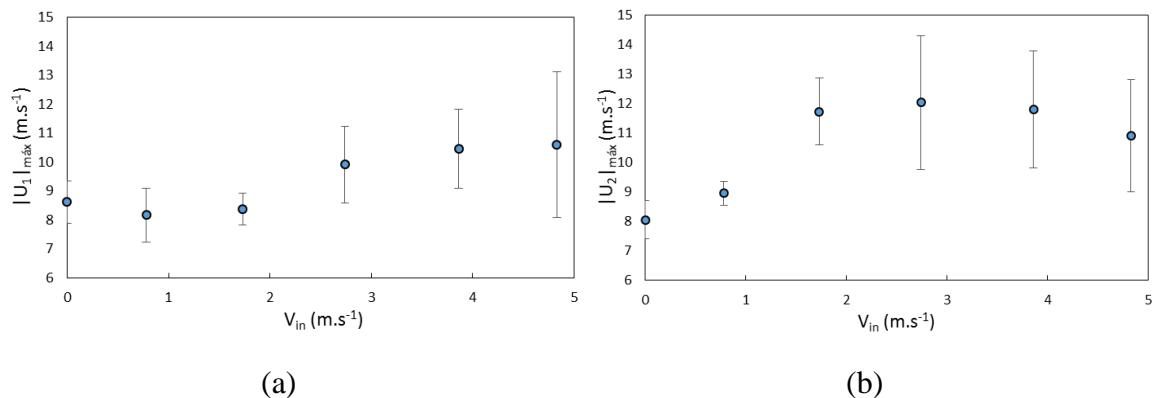


Figura 4.22. Média dos valores máximos do módulo da velocidade: (a) módulo da velocidade para $z=2,70\text{m}$; (b) módulo da velocidade para $z=4,20\text{m}$.

Para $|U_1|_{m\acute{a}x}$ existe um ligeiro crescimento em função da V_{in} e para $|U_2|_{m\acute{a}x}$ existe um crescimento até uma V_{in} de $2,74 \text{ m.s}^{-1}$ e um ligeiro decréscimo até à V_{in} máxima. Para $z=4,20\text{m}$ verifica-se então, que os valores máximos atingidos se dão para uma V_{in} de $2,74 \text{ m.s}^{-1}$.

4.5.2 Temperaturas

As temperaturas registaram-se ao longo do tempo nas extremidades dos tubos de Pitot. Os termopares 1,3 e 2,4 foram colocados nas extremidades dos tubos de Pitot para $z=2,70\text{m}$ e $z=4,20\text{m}$, respetivamente. O registo das temperaturas do termopar 1 não se realizou devido a falhas na aquisição de dados. No Apêndice A segue uma tabela com os valores máximos de temperaturas registados e a que termopares correspondem.

Na Figura 4.23 estão representados gráficos da evolução da temperatura ao longo do tempo do ensaio GVV17 para $z=2,70\text{m}$ e $z=4,20\text{m}$.

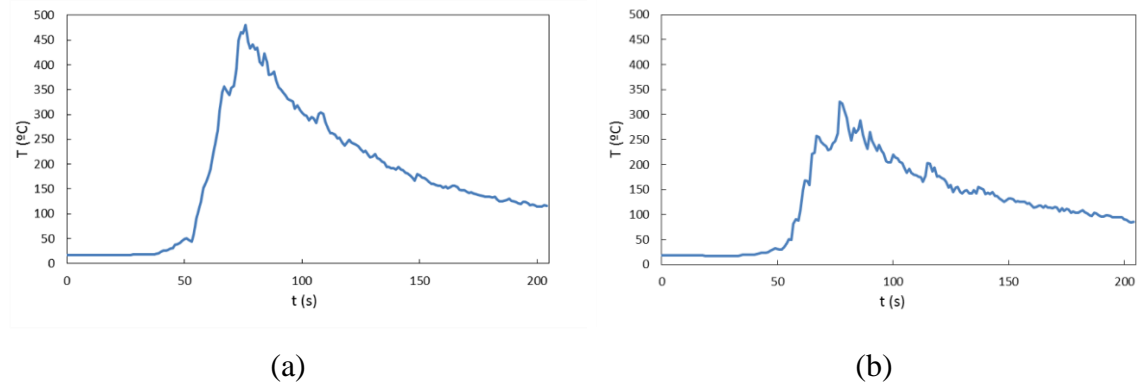


Figura 4.23. Evolução da temperatura ao longo do tempo do ensaio GVV17: (a) temperatura para $z=2,70\text{m}$; (b) temperatura para $z=4,20\text{m}$.

Da análise destas figuras conclui-se que, para $z=4,20\text{m}$, a temperatura apresenta uns crescimentos e decréscimos mais acentuados ao longo do tempo do que para $z=2,70\text{m}$, isto deve-se ao fato do vórtice de fogo não ser completamente estático. Os decréscimos devem-se ao fato das chamas do vórtice saírem do contacto com os termopares, e os crescimentos dão-se quando o vórtice volta a estar em contato com os termopares.

Um estudo interessante seria estudar a revolução do corpo de chama e um perfil de temperaturas do vórtice de fogo a partir do registo de temperaturas através da colocação de mais termopares no GV.

5 CONCLUSÃO

No decorrer do trabalho realizaram-se ensaios com diferentes velocidades de escoamento forçado na base do GV. A configuração do cesto foi igual para todos os ensaios e o combustível usado foi invariavelmente mato. Os últimos quatro ensaios foram realizados com a claraboia aberta. O elevado número de ensaios realizados permitiu obter conclusões bem fundamentadas e contribuíram para um melhor entendimento da formação e do desenvolvimento de um vórtice de fogo

Uma das características mais importantes dos vórtices de fogo que se verificou prende-se com a rapidez com que este atinge uma elevada taxa de perda de massa, uma elevada altura de chama e uma elevada potência, fatores estes que classificam um vórtice de fogo como um fenómeno bastante perigoso. O fato do vórtice de fogo não ser estático e de se poder movimentar transportando fogo, gera imprevisibilidade no seu comportamento, podendo pôr em risco bens materiais assim como vidas humanas.

Através dos resultados obtidos pode concluir-se que, as taxas de perda de massa máxima aumentam, com o aumento da velocidade de ventilação na base do vórtice de fogo. Sobre as alturas de chama máximas atingidas não se pode concluir o mesmo, visto que, para uma velocidade de escoamento forçado superior a $2,74 \text{ m.s}^{-1}$, a altura de chama mantêm-se constante. As alturas de chama máximas medidas nos ensaios realizados com a claraboia aberta foram ligeiramente superiores à média das alturas de chama máximas obtidas nos ensaios realizados com a claraboia fechada, no entanto é necessário realizar mais ensaios com a claraboia aberta, a fim de determinar se a acumulação de fumos no topo do GV limita os valores máximos que a altura de chama pode atingir. Neste estudo criou-se uma relação entre a altura de chama e a taxa de perda de massa. Verificou-se ainda que, existia uma proximidade temporal entre os picos de altura de chama e os de taxa de perda de massa. Em relação às velocidades, pode concluir-se que o aumento da velocidade de escoamento forçado aumenta a vorticidade, até um valor V_{in} de $3,86 \text{ m.s}^{-1}$. As velocidades verticais não são influenciadas pela velocidade de escoamento forçado. Os ensaios realizados com uma velocidade de escoamento forçado de $2,74 \text{ m.s}^{-1}$, apresentam, para todas as velocidades horizontais e verticais, valores muito próximos dos máximos.

Em alguns dos ensaios que se realizaram, o variador de frequências que está ligado aos ventiladores parou inesperadamente pelo que a aquisição de um novo aparelho poderá vir a constituir-se como necessário.

Também se reparou que, algumas vezes, para elevadas velocidades de escoamento forçado, a proteção da plataforma movimentava-se e atingia a plataforma, alterando os valores de massa que eram registados, originando valores de taxas de perda de massa negativos. Aumentar o peso da proteção da plataforma poderia ser uma medida a aplicar com vista à correção deste problema.

Um estudo realizado com diferentes configurações de cesto para diferentes velocidades de escoamento forçadas, seria interessante para avaliar a sua influência no desenvolvimento do vórtice.

A realização de mais ensaios com a claraboia aberta é essencial para determinar se existe ou não influência nas suas características.

Através das relações que se obtiveram é possível, conhecendo o valor de um determinado parâmetro do vórtice de fogo, estimar outro. O combustível florestal utilizado é uma mais-valia neste estudo visto que este está, efetivamente, presente num incêndio florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Battaglia, F., Mcgrattan, K., Rehm, R., Baum, H. (2000), “Simulating fire whirls”, *Combustion Theory and Modelling*, 4:2, 123-138
- Countryman, C.M. (1971), “FIRE WHIRLS... why, when and where”, Forest Service, U.S Department of Agriculture, P.O. BOX 245, Berkeley, California 94701
- Emmons, H.W. e Ying, S.J. (1967), “The fire whirl” *Proceedings of the 11th International Symposium on Combustion*, pp. 475-488, Combustion Institute, Pittsburgh, PA
- EN 1418 (2009), “Solid biofuels determination of calorific value” pp. 49-50
- Forthofer, J. e Butler, B. (2010), “Large scale fire whirls: Can their formation be predicted?”, *Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conference*, October 25-29, Spokane, Washington, USA
- Forthofer, J., Shannon, K., Butler, B. (2003), “Investigating causes of large scale fire whirls using numerical simulation”, USDA Fores Service, Rocky Mountain Research Station, Missoula, MT
- Goens, D.W. (1978), “Fire Whirls”, National Weather Service Western Region, Salt Lake City, Utah
- Hissong, J.E. (1926), “Whirlwinds at oil-tank fire, San Luis Bispo, Califórnia.”, pp. 162. Acedido dia 25 de Maio de 2015, em: <http://docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/054/mwr-054-04-0161.pdf>.
- Lei, J., Liu, N., Lozano, J.S., Zhang, L., Deng, Z., Satoh, K. (2013), “Experimental research on flame revolution and precession of fire whirls”, *Proceedings of the Combustion Institute* 34 2607-2615
- Lei, J., Liu, N., Zhang, L., Chen, H., Shu, L., Chen, P., Deng, Z., Zhu, J., Satoh, K., Ris, J.L. (2011), “Experimental research on combustion dynamics of medium-scale fire whirl”, *Proceedings of the Combustion Institute* 33 2407-2415
- Lei, J., Liu, N., Zhang, L., Deng, Z., Akafuah, N.K., Li, T., Saito, K., Satoh, K. (2012), “Burning rates of liquid fuels in fire whirls”, *Combustion and Flame* 159 2104-2114
- Lopes, A. (2014), “Estudo laboratorial para a utilização de Misturas de Biomassa para a produção de pellets”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Martin, R.E., Pendleton, D.W., Burgess, W. (1974), “Effect of Fire Whirlwind Formation on Solid Fuel Burning Rates” pp. 33-40. *Fire Technology*, Combustion Institute, Western States Section at Pullman, Washington

- Meroney, R.N. (2003), “Fire whirls, fire tornados, and fire storms: physical and numerical modeling”. Proceedings of International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena (PHYSMOD 2003), Prato, Italy
- Pinto, C. (2014), “Desenvolvimento de um Gerador de Vórtices de Fogo de Eixo Vertical”. Tese de Mestrado em Engenharia Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra
- Smits, A.J., Hartl, K.A., Guo, S., Dryer, F.L. (2012), “Laboratory Studies of Fire Whirls” Coupled Atmosphere-Bushfire Modelling Workshop, Princeton University
- Sun, L., Zhou, X., Mahalingam, S., Weise, D.R., (2006) “Comparison of burning characteristics of live and dead chaparral fuels” Combustion and Flame 144 349-359
- Viana, H., Vega-Nieva, D.J., Torres, L.O, Lousada, J., Aranha, J. (2012), “Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain”. Fuel 102 pp. 738-739
- Viegas, D.X., Rossa, C., Ribeiro, L.M. (2011), Incêndios Florestais. Verlag Dashöfer. Lisboa.
- Weise, D.R., Fletcher, T., Smith, S., Mahalingam, S., Zhou, X., Sun, L. (2005) “Correlation of mass loss rate and flame height for live fuels” Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology. Canada
- Zhou, K., Liu, N., Lozano, J.S., Shan, Y., Yao, B., Satoh, K. (2012) “Effect of flow circulation on combustion Dynamics of fire whirl”, Proceedings of the Combustion Institute

APÊNDICE A

Referência Ensaio	Data	Hora	Temperatura ambiente (°C)	Humidade relativa (%)	Humidade combustivel (%)	V_{in} (m.s ⁻¹)	Duração Ensaio (s)	Claroaboa	$m_{perdida\ total}$ (g)	\dot{m}_{max} (g.s ⁻¹)	$L_{n,max}$ (m)	$D_{n,max}$ (m)	P_{max} (kW)	T_{max} (°C)	Termopar da T_{max}
GVV4	19/mar	12:10	20,6	39	12,06	0,00	230	Fechada	3498	48,19	4,30	0,61	1003	554	3
GVV5	19/mar	12:44	20,4	37	12,06	2,74	230	Fechada	3240	68,59	5,37	0,53	1428	575	3
GVV6	19/mar	14:40	18,5	42	11,38	0,78	230	Fechada	3419	43,96	5,26	0,48	917	591	3
GVV7	19/mar	16:00	18,9	41	11,38	4,83	75	Fechada	2783	80,47	5,61	0,50	1678	766	2
GVV8	19/mar	16:20	19,0	41	11,38	1,73	165	Fechada	3474	56,00	5,41	0,51	1168	613	2
GVV9	19/mar	16:45	19,0	42	11,38	3,86	135	Fechada	3744	71,96	5,62	0,62	1501	708	3
GVV10	20/mar	11:15	18,7	44	12,82	0,00	230	Fechada	3641	38,00	4,56	0,99	791	428	3
GVV11	20/mar	11:54	18,7	44	12,82	2,74	230	Fechada	3520	62,42	5,92	0,57	1300	779	2
GVV12	20/mar	12:28	18,7	44	12,82	1,73	230	Fechada	3679	45,33	4,98	0,39	944	623	2
GVV13	20/mar	15:40	18,7	44	12,82	2,74	230	Fechada	3517	48,12	5,01	0,44	1002	613	2
GVV14	23/mar	11:20	19,1	36	13,55	0,78	220	Fechada	3359	48,76	4,46	0,57	1013	338	3
GVV15	23/mar	11:45	19,1	36	13,55	2,74	165	Fechada	3570	67,43	5,79	0,64	1401	720	4
GVV16	23/mar	12:10	19,1	36	13,55	0,00	230	Fechada	3375	51,52	4,33	0,60	1070	438	3
GVV17	23/mar	15:15	16,5	41	13,55	3,86	165	Fechada	3481	58,44	5,69	0,57	1214	558	2
GVV18	23/mar	15:45	16,5	41	13,55	1,73	195	Fechada	3375	46,48	5,23	0,54	970	498	4
GVV19	23/mar	16:20	16,5	41	13,55	3,86	220	Fechada	3555	51,52	4,53		1070	520	3
GVV20	24/mar	11:05	12,8	64	11,34	1,73	230	Fechada	3786	51,42	5,31	0,53	1072	644	2
GVV21	24/mar	11:28	12,8	64	11,34	3,86	170	Fechada	3617	70,93	5,83	0,62	1479	684	2
GVV22	24/mar	12:05	12,8	64	11,34	0,78	230	Fechada	3495	37,23	4,56	0,56	767	455	3
GVV23	24/mar	13:50	12,8	64	11,34	4,83	180	Fechada	3405	63,48	5,31	0,53	1324	497	3
GVV24	24/mar	14:10	15,2	57	12,48	0,78	230	Fechada	3354	36,76	4,86	0,54	765	478	3
GVV25	24/mar	14:40	15,2	57	12,48	0,00	230	Fechada	3343	50,06	4,85	0,72	1042	535	3
GVV26	24/mar	15:30	15,2	57	12,48	1,73	165	Fechada	3501	51,81	5,09	0,57	1079	621	2
GVV27	02/jun	15:50	29,5	36	8,30	0,31	220	Fechada	3469	55,75	4,92	0,74	1168		
GVV28	03/jun	16:15	29,0	37	8,30	4,83	160	Fechada	3326	68,59	5,92	0,71	1437		
GVV29	04/jun	16:30	28,6	38	8,30	0,31	110	Fechada	2742	41,45	4,57	0,80	868		
GVV30	11/jun	12:00	23,7	56	10,96	0,31	569	Fechada	3588	41,67	4,92	0,59	870	536	3
GVV31	11/jun	12:25	23,4	56	10,96	4,83	821	Fechada	3666	58,41	5,43	0,58	1219	570	3
GVV32	11/jun	15:00	24,4	50	10,11	0,78	636	Aberta	3685	53,57	4,92	0,60	1119	626	3
GVV33	11/jun	15:30	25,0	47	10,11	2,74	450	Aberta	3613	58,25	5,79	0,50	1217	448	4
GVV34	11/jun	15:55	24,9	47	10,11	0,00	440	Aberta	3532	55,01	4,73	0,64	1149	652	3
GVV35	11/jun	16:20	23,7	48	10,11	3,86	313	Aberta	3415	60,77	5,69	0,60	1270	520	3

APÊNDICE B

Ensaio	Valores máximos						V_{in} ($m.s^{-1}$)
	z=2.70m			z=4.20m			
	U_H ($m.s^{-1}$)	U_V ($m.s^{-1}$)	$ U $ ($m.s^{-1}$)	U_H ($m.s^{-1}$)	U_V ($m.s^{-1}$)	$ U $ ($m.s^{-1}$)	
GVV4	5,48	7,66	9,42	3,78	6,78	7,45	0
GVV5	7,41	7,98	10,80	9,00	7,39	10,88	2,74
GVV6	5,18	6,19	7,84	4,64	7,56	8,53	0,78
GVV7	8,43	10,63	13,38	11,30	7,77	13,10	4,83
GVV8	5,07	6,42	8,15	8,82	10,41	13,18	1,73
GVV9	8,40	8,51	11,75	10,45	10,42	14,34	3,86
GVV10	5,23	6,37	8,24	3,82	8,15	8,31	0
GVV11	7,89	8,11	11,31	11,69	6,91	13,31	2,74
GVV12	5,24	5,81	7,74	9,24	9,61	11,10	1,73
GVV13	6,97	6,94	9,75	8,44	5,96	9,83	2,74
GVV14	4,68	5,83	8,22	5,19	8,77	9,29	0,78
GVV15	6,72	7,64	9,84	9,97	12,81	15,36	2,74
GVV16	4,08	6,62	7,74	4,45	7,61	7,82	0
GVV17	6,62	6,41	9,17	8,94	7,42	11,30	3,86
GVV18	4,66	6,96	8,08	7,73	10,04	11,53	1,73
GVV19	7,34	7,42	10,43	8,34	6,39	9,94	3,86
GVV20	5,83	7,04	8,89	8,69	7,30	10,30	1,73
GVV21	7,65	9,15	11,93	11,57	6,71	13,37	3,86
GVV22	4,51	6,09	7,32	5,19	8,24	8,77	0,78
GVV23	6,63	7,38	9,91	7,19	7,54	9,80	4,83
GVV24	5,19	6,69	7,76	3,84	8,12	8,71	0,78
GVV25	4,46	7,16	8,33	4,37	6,98	7,64	0
GVV26	5,06	7,74	9,01	8,24	9,53	12,49	1,73
GVV30	3,56	6,22	6,90	5,91	6,00	8,08	0,31
GVV31	4,78	7,52	8,50	8,46	6,57	9,80	4,83
GVV32	4,92	9,40	9,73	7,28	8,02	9,48	0,78
GVV33	5,80	5,97	7,86	7,18	8,11	10,78	2,74
GVV34	4,61	8,81	9,36	6,85	7,17	9,05	0
GVV35	5,61	7,10	9,04	8,35	5,98	10,04	3,86