



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de um Gerador de Vórtices de Fogo de Eixo Vertical

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

Cláudia Sofia Barata Pinto

Orientador

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Júri

Presidente	Professor Doutor Jorge Campos da Silva André Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2014

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Domingos Xavier Viegas, por me dar a oportunidade de trabalhar numa área pela qual sempre tive um grande interesse. Agradeço-lhe, ainda, pela orientação da dissertação, do tema em questão, de toda a disponibilidade demonstrada ao longo da realização deste trabalho, pelos conhecimentos que me transmitiu e por me ter inserido na equipa do CEIF.

Agradeço a toda a equipa do CEIF pelo acolhimento, pela contribuição imprescindível na realização dos ensaios e por todo o apoio prestado.

Manifesto, ainda, o meu agradecimento ao Eng.º Rafael Raposo pelo tempo despendido na colaboração de algumas tarefas e por se mostrar sempre prestável para esclarecer qualquer dúvida por mim colocada.

Um especial obrigado ao João, a pessoa que de mais perto me acompanhou nesta etapa, pela paciência, pelo apoio constante, pela dedicação e pelo forte envolvimento que teve no meu trabalho.

Por último, às pessoas mais importantes da minha vida, e que sem elas nada disto seria possível, os meus Pais e Irmão, um muito sincero obrigado. Aos meus Pais pela oportunidade, confiança e educação que contribuíram para me tornar na pessoa que sou. Ao meu Irmão pela amizade incondicional e pelo espírito de companheirismo.

A todos aqueles que, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu sucesso, deixo aqui o meu agradecimento.

Resumo

Durante um incêndio florestal poder-se-á observar, em determinadas circunstâncias, a formação de vórtices de fogo, sendo difícil de prever a sua evolução, e, ainda, devido à elevada energia contida nestes se tornar um grande perigo para os combatentes.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da formação de vórtices de fogo de eixo vertical em incêndios florestais, nomeadamente o desenvolvimento de uma metodologia de ensaio para analisar as condições de formação desses vórtices e as suas características físicas e termodinâmicas, entre elas, taxas de combustão, energias libertadas, alturas de chama e diâmetros de chama.

Apesar do fenómeno já ter sido alvo de vários estudos experimentais, todos eles tiveram como base o uso de combustíveis líquidos e gasosos, sendo que os utilizados no presente trabalho foram combustíveis florestais, comuns nas florestas portuguesas, o que nos permite uma maior aproximação à realidade. Os combustíveis florestais utilizados foram *Pinus pinaster* (caruma), *Avena sativa* (palha) e mato composto maioritariamente por duas espécies, *Erica australis* (urze) e *Pterospartum tridentatum* (carqueja).

Como projeto adicional, foi conceptualizado e desenvolvido um mecanismo resistente a altas temperaturas, com o intuito de medir a velocidade rotacional gerada pelo vórtice de fogo.

Uma metodologia experimental foi criada e foram executadas as alterações necessárias para observação e estudo de um vórtice de fogo.

Verificou-se que em circunstâncias de vorticidade, as características inerentes à formação de vórtices de fogo são bastante intensificadas em relação a situações onde não se observa a sua formação.

Palavras-chave: Gerador de vórtices de fogo, vórtices de fogo, incêndios florestais, comportamento extremo do fogo, taxas de combustão, potência gerada.

Abstract

During a forest fire it will be possible to observe, in certain circumstances, the formation of fire whirls, making it difficult to predict its evolution, and, also due to the high energy contained in them, these pose a great danger to firefighters.

The present work aims to study the formation of fire whirls with vertical axis on wildfires, including the development of a testing methodology to analyse the conditions of formation of these vortices and their physical and thermodynamic characteristics, including combustion rates, energy released, speed and temperatures.

Although this phenomenon has already been the subject of several experimental studies, all of them were based on the use of fossil fuels, and those used in this study were forest fuels, common in Portuguese forests, allowing us to develop this work in a close to reality scenario . The used forest fuels were *Pinus pinaster* (pine needles), *Avena sativa* (straw) and scrub composed mainly of two species, *Erica australis* (heather) and *Pterospartum tridentatum* (gorse).

As an additional project, a high temperature resistant mechanism was conceptualized and developed, in order to measure the rotational speed of the vortex generated by the fire.

An experimental methodology was created, and necessary changes were made for the observation and study of a fire whirl.

It was found that when a vortex occurs, vortex characteristics inherent to the fire vortex formation are fairly enhanced in comparison to situations where there is no vortex formation.

Keywords Fire whirls generator, fire whirls, forest fires, extreme fire behaviour, combustion rates, generated power.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e objetivos de estudo.....	1
1.2. Revisão bibliográfica	2
1.3. Condições propícias à formação de vórtices de fogo	3
1.4. Estudos experimentais realizados	4
2. Desenvolvimento de um mecanismo de medição de velocidade rotacional de vórtices de fogo.....	7
2.1. Projeto e Construção.....	8
2.1.1. Materiais	8
2.1.2. Constituintes	9
2.2. Leitura de dados.....	10
2.3. Calibração e escolha das pás.....	11
2.4. Conclusões	17
3. Metodologia experimental.....	21
3.1. Equipamento	21
3.1.1. Túnel vertical - Gerador de Vórtices	21
3.1.2. Cestos	22
3.1.3. Analisador do Teor de Humidade.....	24
3.1.4. Balanças eletrônicas	25
3.1.5. Termopar, tubo de Pitot e Computador	26
3.1.6. Câmaras de captura de imagem	27
3.2. Procedimento Experimental.....	27
3.2.1. Descrição geral do método de ensaio	27
3.2.2. Realização dos ensaios no exterior do túnel.....	28
3.2.3. Alterações no túnel	29
3.3. Tratamento de dados.....	32
3.3.1. Taxa de perda de massa	32
3.3.2. Caracterização geométrica da chama	33
3.3.3. Caracterização térmica dos combustíveis.....	33
4. Resultados e discussão	35
4.1. Caracterização física e térmica	35
4.1.1. Massa perdida e taxa perda de massa	35
4.1.2. Geometria da chama – Altura e diâmetro da chama.....	36
4.1.3. Potência gerada.....	37

4.2. Variação das condições de ensaio	39
4.2.1. Variação do diâmetro dos cestos	40
4.2.2. Variação do ambiente de ensaio	42
4.3. Variação de condições de ensaio	44
5. Conclusão	47
Referências bibliográficas	49
Anexo A	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Mecanismo de medição de velocidade rotacional de vórtices de fogo	8
Figura 2.2. Esquema do mecanismo com todos os seus constituintes em detalhe	10
Figura 2.3. Mecanismo montado no torno mecânico	12
Figura 2.4. Diferentes ângulos utilizados no TO para calibração do mecanismo	13
Figura 2.5. Velocidades rotacionais para diferentes escoamentos e ângulos com o conjunto de copos	13
Figura 2.6. Velocidades rotacionais para diferentes escoamentos e ângulos com o conjunto de pás planas	14
Figura 2.7. Velocidades rotacionais para diferentes escoamentos e ângulos com o conjunto de pás curvas	14
Figura 2.8. Estabilidade dos diferentes conjuntos de copos e pás	15
Figura 2.9. Calibração do conjunto de copos	16
Figura 2.10. Calibração do conjunto de discos planos	16
Figura 2.11. Calibração do conjunto de discos curvos	16
Figura 3.1. Túnel gerador de vórtices: (a) GV inicial sem qualquer alteração; (b) esquema com as principais dimensões	22
Figura 3.2. Diferentes cestos utilizados	23
Figura 3.3. Cesto com combustível acondicionado no seu interior	24
Figura 3.4. Analisador de teor de humidade	25
Figura 3.5. Montagem da balança para aferição da perda de massa	25
Figura 3.6. Mecanismo de ligação do túnel à balança: (a) imagem completa; (b) esquema em perspetiva	26
Figura 3.7. (a) Cabo composto pelo termopar e tubo de Pitot envolvidos em fita adesiva de alumínio; (b) Pormenor do tubo de Pitot	27
Figura 3.8. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo	28
Figura 3.9. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo	29
Figura 3.10. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo	29
Figura 3.11. (a) Alterações do GV referentes ao vidro colocado na chapa e do corte lateral; (b) Pormenor do corte lateral	30

Figura 3.12. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo	31
Figura 3.13. Montagem do GV após deslocação de local com elevação de 50 centímetros na altura do túnel.....	32
Figura 4.1. Exemplo de gráfico resultante da perda de massa na formação de um vórtice de fogo e taxa de perda de massa correspondente	35
Figura 4.2. Altura da chama do mato ao longo da duração do ensaio	36
Figura 4.3. Potência gerada ao longo de um ensaio no interior do túnel	39
Figura 4.4. Valores m/m_0 para diferentes alturas de cesto.....	40
Figura 4.5. Variação de $\dot{m}_{\text{máx}}$ com o aumento do diâmetro do cesto	41
Figura 4.6. Variação de $H_{\text{máx}}$ com o aumento do diâmetro do cesto	42
Figura 4.7. Variação de $H_{\text{máx}}$ com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel.....	42
Figura 4.8. Variação de $D_{\text{máx}}$ com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel.....	43
Figura 4.9. Variação da potência média característica com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel.....	43
Figura 4.10. Variação da potência média característica com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Dimensões dos cestos utilizados nos ensaios	23
Tabela 4.1. Poder calorífico superior, em base seca, para urze e carqueija	37
Tabela 4.2. Composição química elementar de <i>Erica Australis</i> e <i>Pterospatum tridentatum</i>	37
Tabela 4.3. PCI e média de <i>Erica Australis</i> e <i>Pterospatum tridentatum</i>	38
Tabela 4.4. PCI tendo em conta o teor de humidade do mato	38
Tabela 4.5. Dados principais obtidos para as diferentes condições de ensaio.....	45

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a – Fator de estabilidade

D [m] – Diâmetro da chama

D_{cesto} [m] – Diâmetro do cesto

H [m] – Altura da chama

$H_{máx}$ [m] – Altura máxima atingida pela chama

H_{cesto} [m] – Altura do cesto

M [%] – Teor de humidade

m_f [kg] – Massa do combustível

m_0 [kg] – Massa inicial de combustível

\dot{m} [g/s] – Taxa de perda de massa

$\dot{m}_{máx}$ [g/s] – Taxa máxima de perda de massa

$\dot{m}_{méd}$ [g/s] – Taxa média de perda de massa

n [rpm] – Velocidade rotacional

$P_{máx}$ [kW] – Potência máxima gerada

$P_{méd}$ [kW] – Potência média gerada

t [s] – Tempo decorrido

U [m/s] – Velocidade de escoamento

$w(C)_d$ [%] - Teor de carbono do combustível, em base seca

$w(O)_d$ [%] - Teor de oxigénio do combustível, em base seca

$w(H)_d$ [%] - Teor de hidrogénio do combustível, em base seca

$w(N)_d$ [%] - Teor de azoto do combustível, em base seca

$w(S)_d$ [%] - Teor de enxofre do combustível, em base seca

α [°] – Ângulo de inclinação do Túnel Oblíquo

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GV – Gerador de Vórtices

LEIF – Laboratório de Estudos Sobre Incêndios Florestais

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

TO – Túnel Oblíquo

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e objetivos de estudo

A complexidade relativa ao comportamento do fogo é uma área que desperta o interesse para a compreensão dos vários fenómenos que ocorrem num incêndio florestal, nomeadamente a formação de vórtices de fogo.

Os vórtices de fogo são estruturas com um desenvolvimento vertical, e que se caracterizam pelo seu movimento rotacional muito forte. Devido à sua imprevisibilidade de ocorrência, às suas características de formação e às consequências que deles advêm, pode ser considerado como um fenómeno de comportamento extremo de fogo.

Um caso que descreve o que foi anteriormente exposto é o exemplo do sucedido na Califórnia em Julho de 1989, no qual, durante o combate a um incêndio florestal se deu a formação inesperada de um vórtice de fogo que se movimentou passando a estrada para o local onde estavam Bombeiros a combater o fogo, atingindo quatro dos Bombeiros, os quais sobreviveram com queimaduras graves.

Acidentes como este podem acontecer em Portugal, colocando em perigo a integridade física de quem os combate e dos meios que possam estar no local. Sendo assim, é essencial um estudo e aprofundamento nesta matéria, para, posteriormente, alertar as entidades envolvidas no combate aos incêndios para este tipo de acontecimentos, pois a informação sobre estes é ainda muito reduzida.

Pretende-se com este trabalho ter uma melhor perceção da formação e do comportamento deste fenómeno através do desenvolvimento de uma metodologia de ensaio e medição de vários parâmetros, entre eles, a taxa de queima de massa de combustível, a potência, a altura máxima de chama e o diâmetro da chama.

O desenvolvimento de uma metodologia de ensaio deve-se ao facto do gerador de vórtices ser um equipamento novo, o qual necessita de ser instrumentado conforme as observações e medições feitas no decorrer dos ensaios, fazendo-se as alterações necessárias para otimizar as condições de estudo da formação de um vórtice de fogo.

1.2. Revisão bibliográfica

Todos os anos em Portugal, na época mais quente do ano, assiste-se à destruição de vários hectares de floresta, consumidos pelo fogo.

Os incêndios florestais são uma catástrofe natural que tem um grande impacto social, económico e ambiental, suscitando assim a preocupação da comunidade científica nesta temática. Deste modo, o estudo e compreensão do comportamento do fogo são ferramentas essenciais para uma boa gestão dos incêndios florestais.

Uma boa forma de lidar com futuros incêndios é através da observação e análise de incêndios já ocorridos no passado, dos quais se retiram várias aprendizagens sobre o comportamento do fogo, e que servem como base de estudo para realização de experiências laboratoriais e criação de modelos contribuindo para um melhor entendimento das características associadas à formação e propagação de um fogo (Alexander e Thomas, 2003).

O modo de propagação de um fogo tem diversas classificações. Viegas *et al.* (2011) propõem uma classificação em dois modos de propagação, comportamento normal e comportamento extremo. No comportamento normal inserem-se o fogo de solo e o fogo de superfície, e no comportamento extremo os fogos de copas, os focos secundários e os fogos eruptivos.

Os vórtices de fogo são caracterizados pela sua taxa de libertação de energia muito elevadas, a sua formação inesperada, pelo seu movimento irregular e dissipação repentina, tornando-os num dos fenómenos associados ao comportamento do fogo mais extraordinários de se observar (Forthofer e Goodrick, 2011). As características enunciadas acima fazem deste fenómeno um bom exemplo de comportamento extremo do fogo, inserindo-se assim no comportamento extremo no que diz respeito à classificação do modo de propagação de um fogo.

Os vórtices de fogo são um fenómeno controverso, pois nem quanto à sua frequência existe consenso. Segundo Meroney (2003) e Taylor *et al.* (2010) os vórtices de fogo são uma forma de fogo rara. Contrariamente, Countryman (1971) e Forthofer e Butler (2010) afirmam que este tipo de fenómeno é mais comum do que se pensava, e que é um evento bastante frequente nos incêndios florestais.

Relativamente aos perigos inerentes a este fenómeno, Countryman (1971) explica que os vórtices de fogo contêm brasas, poeiras e detritos em alta velocidade que permanecem nos turbilhões, os quais podem conter monóxido de carbono e dióxido de carbono, sendo que, devido aos gases nocivos e às altas temperaturas contidos nestes, à sua rápida propagação e ao moverem-se para o exterior do incêndio são uma ameaça para a segurança de quem os combate, fazendo com que seja importante o conhecimento do seu comportamento.

Berl (1963) afirma que os objetivos científicos passam por compreender o comportamento do fogo como um fenómeno físico e químico. Neste sentido, e apesar de ainda haver muito para aprender, as observações e pesquisas feitas ao longo dos anos já revelaram algumas das principais características sobre os vórtices de fogo (Forthofer *et al.*, 2003).

1.3. Condições propícias à formação de vórtices de fogo

Vários estudos já foram realizados com fim a averiguar quais as condições propícias para se formarem vórtices. Desde relatórios descritivos da topografia, combustíveis e meteorologia decorrentes no local antes e após a ocorrência dos incêndios onde se observaram vórtices, até à construção de modelos analíticos para sua caracterização através de simulações laboratoriais.

Pirsko, Sergius e Hickerson (1965) estudaram as condições que levaram à formação de um vórtice de fogo que ocorreu durante um incêndio perto de Santa Bárbara, na Califórnia, em Março de 1964, e concluíram que uma atmosfera instável, caracterizada por altas temperaturas na superfície terrestre, uma humidade relativa muito baixa, além de ventos moderados, uma grande percentagem de biomassa como fonte de calor e o incêndio estar presente a sotavento de um cume foram definidas como potenciais condições.

Mais tarde, em 1967 foi desenvolvida uma pesquisa sobre a origem e características dos vórtices de fogo no seu geral, a qual descreveu que apesar pouco poder ser feito para prevenir um fenómeno deste tipo, já se conheciam alguns sinais que podiam ser observados para prever a formação deste fenómeno, como por exemplo a presença de redemoinhos de vento na área do incêndio, de nuvens *cumulus*, de ventos irregulares, de

uma pluma de fumo sobre o fogo, e geralmente, de uma boa visibilidade (Countryman, 1971).

Forthofer e Butler (2010) analisaram o comportamento do fogo que ocorreu em 2008 na Califórnia, o qual ficou intitulado de *Indians Fire*, e verificaram também a necessidade de uma grande fonte de calor para formação do vórtice de fogo, uma atmosfera instável e uma fonte forte de vorticidade, mas neste incêndio a formação do vórtice deu-se devido ao movimento rotacional ascendente do lado a sotavento da pluma de fumo.

Estudos como os exemplificados anteriormente têm sido relatados por vários autores (Soma e Saito, 1991), (Art *et al.*, 2003) e (Seto, 2012).

De um modo geral as condições que potenciam o desencadear de um vórtice de fogo são uma atmosfera instável, a necessidade de uma grande fonte de calor, de vorticidade e a topografia.

1.4. Estudos experimentais realizados

As caracterizações termodinâmicas e cinemáticas do comportamento do fogo em relação à formação de vórtices de fogo já foram e continuam a ser alvo de vários estudos experimentais realizados nesta área.

Um dos estudos mais antigos referentes a vórtices de fogo foi realizado por Emmons e Ying (1967), citado por Lei *et al.*(2012) , onde foi usada acetona numa panela com 10 cm de diâmetro com tela rotativa com vários valores de circulação de ar ambiente, e concluiu-se que a taxa de perda de massa aumenta com o aumento da circulação de ar ambiente.

Martin, Pendleton e Burgess (1976) construíram uma câmara de fogo de forma a gerarem redemoinhos para estudarem as taxas de queima dos vórtices de fogo. A câmara era em forma de cilindro, dividida por três anéis em camadas de madeira, e as laterais eram feitas em papelão, tinha no total um comprimento de 91 cm, um diâmetro de 84 cm e uma altura de secção de entrada de 19 cm. O topo foi coberto por um contraplacado com uma abertura de 30,5 cm de diâmetro, impedindo assim a entrada de ar frio e a interrupção periódica do vórtice. Foram utilizados blocos de madeira com diferentes dimensões e valores de humidade para fazer a medição das taxas de queima. Concluíram que os ensaios

nos quais verificaram formação de vórtices, os blocos arderam muito mais rapidamente do que naqueles que não houve formação de vórtices para dimensões e humidades idênticas, e que para diferentes dimensões não se verificaram resultados consistentes.

Poucos anos depois, Muraszew, Fedele e Kuby (1979) desenvolveram um modelo analítico que consistiu em equações algébricas, com base nos resultados das medições feitas num gerador de vórtices de canal cilíndrico com 95 cm de diâmetro, 365 cm de comprimento e uma secção cónica no topo, também desenvolvido por eles, no qual se prevê as propriedades mecânicas dos fluídos dos vórtices de fogo experimentais.

Nos anos seguintes vários modelos foram aplicados usando sempre como base combustíveis líquidos e gasosos, como por exemplo para correlacionar as taxas de queima de vórtices de fogo em estados laminares e turbulentos, no qual se considera que há uma região reativa e uma região não-reativa, sendo aplicados o modelo de filme estacionário e a analogia de *Chilton-Colburn*, consumindo combustíveis líquidos (Lei *et al.*, 2012). Ainda do mesmo estudo é afirmado que há uma relação similar entre os fogos produzidos por combustão de líquidos e os produzidos por combustão de sólidos, que consiste num aumento da velocidade da queima quando a rotação do vórtice é muito forte, porém o tempo de queima dos combustíveis sólidos é muito mais longo.

Neste sentido, e tendo em conta que nenhum estudo relativo à formação de vórtices de fogo de eixo vertical utilizando combustíveis florestais foi realizado, é uma mais-valia para o desenvolvimento e aperfeiçoamento daquilo que já se sabe até ao presente momento.

2. DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE ROTACIONAL DE VÓRTICES DE FOGO

Sendo como objetivo do presente trabalho o desenvolvimento de um procedimento experimental para a realização de ensaios no gerador de vórtices, houve a necessidade de criar instrumentação específica para captação de dados no interior e no exterior do gerador. De entre as várias necessidades, surgiu a que motivou o desenvolvimento do instrumento do qual trata este capítulo.

Com a finalidade de quantificar a velocidade rotacional dos vórtices de fogo gerados no interior do túnel, foi lançado o desafio de se criar um mecanismo para o efeito.

A visualização de ensaios e um estudo das condições no interior do gerador enquanto estes decorriam, conduziram ao desenvolvimento de um mecanismo baseado num anemómetro de copos. As temperaturas dentro do gerador são muito elevadas para a aplicação de um anemómetro de copos convencional. Outros tipos de anemómetros disponíveis no mercado são igualmente condicionados pelos limites de temperatura de operação.

Assim, o dispositivo criado, que se pode observar na figura 2.1 (a), foi projetado com o intuito de resistir a temperaturas de 500 °C, durante um determinado período de tempo, nunca superior a três minutos, que corresponde à duração aproximada de um ensaio. A forma dos seus “copos” foi otimizada de forma a lidar com escoamentos que pouco ou nada têm em comum com os escoamentos para os quais são concebidos os anemómetros de copos convencionais.

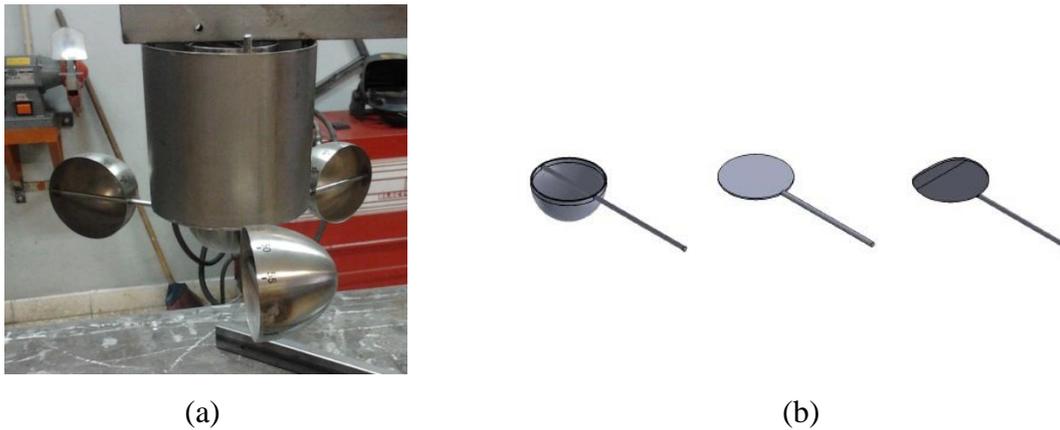


Figura 2.1. (a) Mecanismo de medição de velocidade rotacional de vórtices de fogo com pás em forma de copos; (b) Diferentes tipologias de pás

Nos subcapítulos seguintes será feita uma descrição dos materiais utilizados, quais os constituintes do mecanismo e de que forma o mecanismo faz a leitura dos dados. Após a sua construção será descrita a calibração que foi executada do instrumento e conclusões resultantes desta calibração.

2.1. Projeto e Construção

2.1.1. Materiais

O principal aspeto a ser levado em consideração durante o projeto foi a capacidade do dispositivo resistir a temperaturas tão elevadas. A primeira forma de contrariar os efeitos do excesso de temperatura foi a seleção de materiais adequados. Há que salientar que o mecanismo contém componentes eletrónicos no seu interior, daí se reforçar o cuidado na escolha de material resistente a altas temperaturas.

Desta forma, o mecanismo foi construído em aço inoxidável austenítico tipo 304, que tem uma condutividade térmica de $15 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, a uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Este material apresenta uma reduzida condutividade térmica essencial na tarefa que desempenha no mecanismo. Para além do aço inoxidável, material estrutural do dispositivo, foi utilizada uma fibra cerâmica à base de sílica e alumina como material isolante. Este material é caracterizado pela sua baixa condutividade térmica, baixa densidade e elevada resistência a choques térmicos. É comercialmente usado em equipamentos de climatização

e refrigeração assim como em fornos, e outros equipamentos onde é necessário isolar uma fonte de calor, sendo assim, o ideal para isolar as partes mais sensíveis do mecanismo.

2.1.2. Constituintes

O dispositivo criado é, como já foi referido, semelhante a um anemómetro de copos convencional, diferenciando-se nos materiais utilizados para a sua construção.

Trata-se de um corpo principal cilíndrico oco, com um diâmetro de 100 mm, e 2 mm de espessura. É fechado de ambos os topos. O topo superior é um disco simples de 2 mm de espessura e o topo inferior é um disco de 10 mm de espessura.

O disco de 10 mm de espessura referido acima é a peça mais complexa de todo o anemómetro, pois foi maquinada para segurar o rolamento do eixo que transmite o movimento das pás ao disco do encoder onde se procede a leitura da rotação. É também, a peça que encerra a parte inferior do corpo que mantém todo o conjunto coeso, através de 4 parafusos que o atravessam e fecham por aperto ambos os topos contra o corpo principal.

O veio central transmite o movimento das pás, como já foi referido, até ao disco onde se dá a leitura.

No interior do corpo principal do mecanismo existe ainda um espaço preenchido pelo isolante que separa a parede externa exposta da parte interna, onde se encontram os componentes mais sensíveis.

As pás do mecanismo são 3, e foram feitos 3 conjuntos, como se pode observar na figura 2.1 (b). A peculiaridade do escoamento no interior do túnel obrigou ao teste dos 3 conjuntos de forma a obter o que melhor lê a rotação do vórtice. São, portanto, 3 discos redondos com 60 mm de diâmetro completamente planos com 1.5 mm de espessura, 3 discos também de 60 mm de diâmetro, 1.5 mm de espessura, mas com uma ligeira curvatura, e finalmente 3 copos aproximadamente semiesféricos com os mesmos 60 mm de diâmetro.

A figura 2.2 esquematiza todos os constituintes do mecanismo que foram acima descritos.

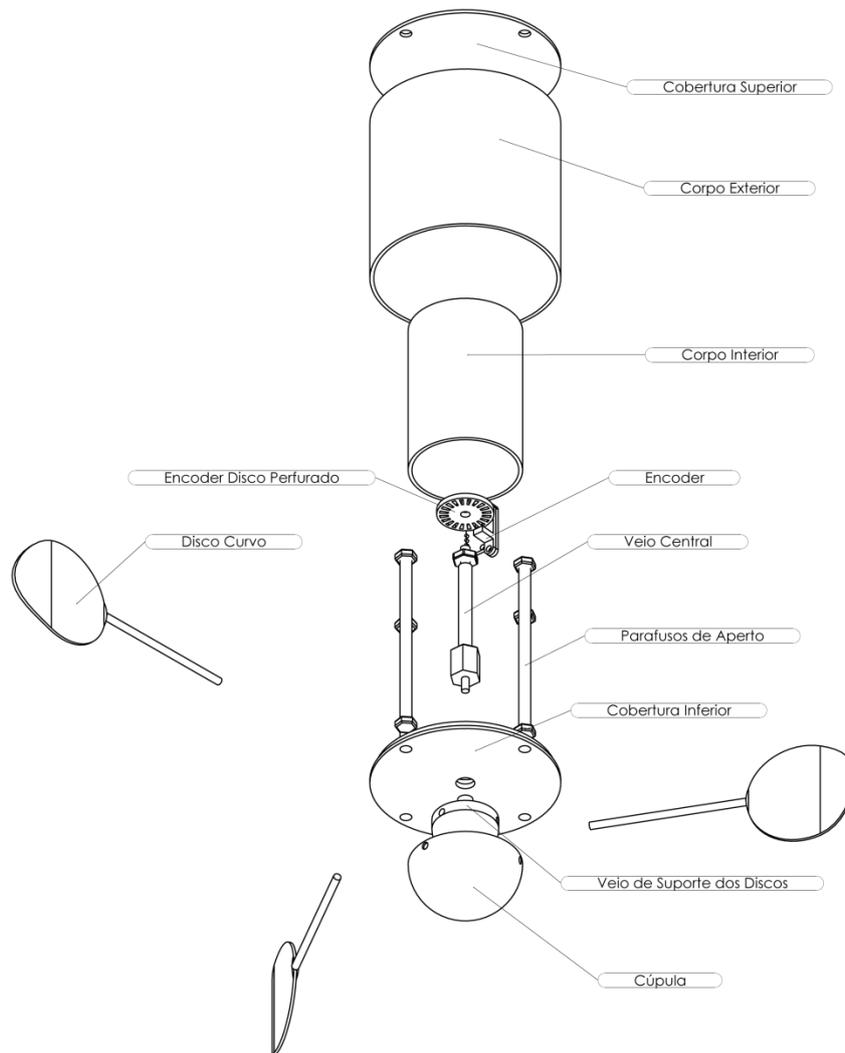


Figura 2.2. Esquema do mecanismo com todos os seus constituintes em detalhe

2.2. Leitura de dados

A leitura de dados consiste no movimento que é transmitido das pás por um veio até ao local no interior do dispositivo onde se encontra o encoder.

Existem vários tipos de encoders, o utilizado no mecanismo desenvolvido trata-se de um encoder ótico, com uma resolução de 40 pontos por rotação marcados por 20 furos num disco de acrílico.

A forma como a leitura é feita é bastante simples. Um emissor de infravermelhos envia um feixe de luz contra um recetor imediatamente a sua frente, e entre o emissor e o recetor roda o disco perfurado. A passagem por um furo do disco permite a

recepção deste feixe, e, conseqüentemente, um sinal de 5 V de tensão é emitido para o microcontrolador, quando o disco roda para uma zona sem furo, interrompe a emissão do feixe e de imediato o recetor deixa de enviar os 5 V, passando a enviar 0 V. A alternância entre os sinais de 5 V e 0 V indica ao microcontrolador a posição do veio que através de alguns cálculos transforma sinais digitais I/O em rpm.

O microcontrolador usado no dispositivo é um Atmega328 montado numa placa Arduino Uno Rev3. Trata-se de um microcontrolador de fonte aberta, acessível e de grande potencialidade. Para além da leitura dos dados do encoder, o Arduino está a correr um código que permite devolver diretamente para o computador os dados que se pretendem, que são o tempo do ensaio, o número de voltas, o tempo de cada volta e o valor em rpm dessa mesma volta. Qualquer outro tipo de dados pode ser obtido assim que implementado o código para tal.

2.3. Calibração e escolha das pás

A obtenção de uma medição correta seja ela do que for é sempre função da boa ou má calibração do equipamento usado para obter essa medição. Equipamentos mal calibrados produzem resultados tal e qual o equipamento bem calibrado, contudo introduzem erro à medição.

Para obter os melhores resultados procedeu-se então à calibração do mecanismo. Esta calibração dividiu-se em duas fases:

1. Verificação dos aspetos mecânicos do mecanismo e de leitura do código executado pelo microcontrolador;
2. Escolha do conjunto de pás a usar para o tipo de escoamento existente no interior do túnel e qual a relação entre os valores lidos no mecanismo e o escoamento existente.

Na primeira fase o mecanismo foi então montado num torno mecânico que tem valores de rotação fixos e conhecidos, como se pode observar na figura 2.3. Estes testes, descritos de seguida foram realizados nas oficinas do DEM.

O objetivo desta primeira calibração foi identificar qualquer falha na construção ou erro de código do microcontrolador, por comparação entre os valores provenientes do mecanismo e os previamente conhecidos do torno. Antes de proceder a

qualquer comparação, o próprio torno foi objeto de calibração. Com o auxílio de um tacómetro digital ligado diretamente ao cabeçote fixo do torno leram-se as rotações deste.

Os valores obtidos foram como seria de esperar diferentes dos indicados na tabela de rotações do próprio torno. O desgaste devido á idade é o responsável pelas diferenças e por isso se fez a calibração prévia do equipamento antes de este servir para calibrar o mecanismo.

Da calibração propriamente dita resultou uma confirmação da aptidão mecânica e do *software* do mecanismo.



Figura 2.3. Mecanismo montado no torno mecânico

A segunda fase da calibração foi executada no Túnel Oblíquo (TO), equipamento que se encontra no LEIF, e que possibilita direcionar o escoamento de vários ângulos em relação ao eixo do anemómetro, e ainda variar a velocidade deste. Com esta calibração decidiu-se o conjunto que melhor quantifica a rotação num vórtice de fogo.

Foi organizado um procedimento de calibração que consistiu numa série de ensaios para cada conjunto de pás, onde se fez variar a velocidade do escoamento e o seu ângulo de forma consistente, para obter resultados conclusivos.

Cada conjunto de pás foi então sujeito a 5 velocidades de escoamento diferentes por cada ângulo testado. As velocidades testadas foram 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s e 25 m/s e os ângulos foram, 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°, sendo os 0° perpendiculares ao eixo do mecanismo.

Na figura 2.4 estão as imagens do TO, com o mecanismo no seu interior, para as inclinações 0°, 30° e 90°, respetivamente.



Figura 2.4. Diferentes ângulos utilizados no TO para calibração do mecanismo

Com os dados obtidos de cada um dos conjuntos procedeu-se à comparação que levou a escolher determinado conjunto de pás em detrimento dos outros dois.

As figuras 2.5, 2.6 e 2.7 demonstram as leituras das rotações efetuadas pelo mecanismo a diferentes inclinações, velocidade de escoamento e conjunto de pás.

As linhas que unem os pontos não são representativas do comportamento das leituras entre os valores de inclinação definidos, contudo permitem verificar, que para diferentes velocidades de escoamento o mesmo conjunto de pás, apresenta valores coerentes.

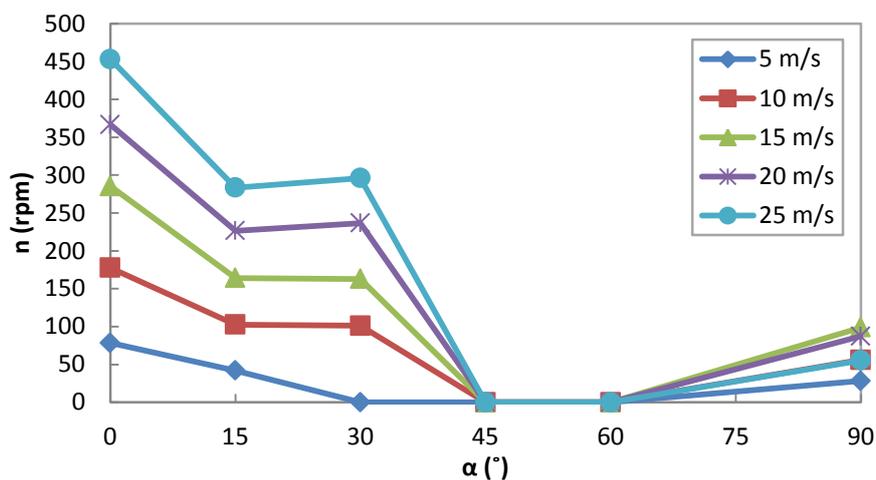


Figura 2.5. Velocidades rotacionais para diferentes escoamentos e ângulos com o conjunto de copos

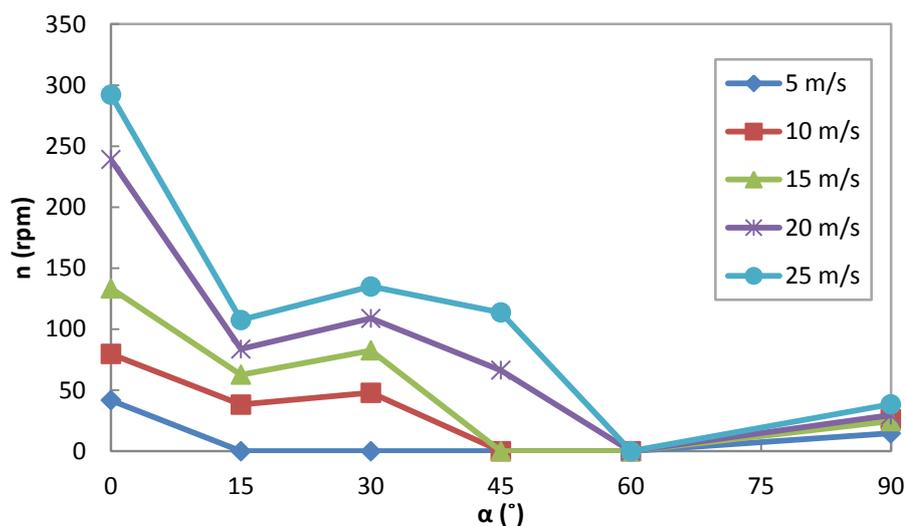


Figura 2.6. Velocidades rotacionais para diferentes escoamentos e ângulos com o conjunto de pás planas

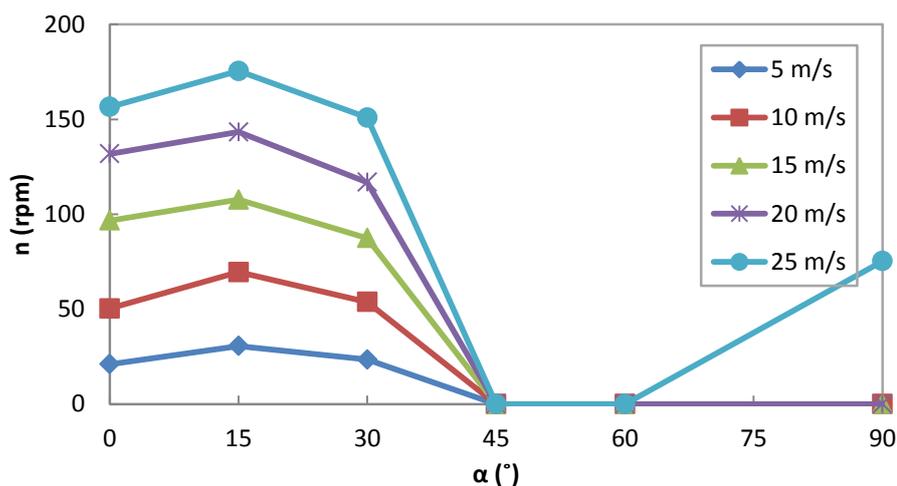


Figura 2.7. Velocidades rotacionais para diferentes escoamentos e ângulos com o conjunto de pás curvas

Dos gráficos das imagens acima, podemos ainda verificar que os dados obtidos são mais estáveis dos 0° até aos 30°, não se verificando o mesmo nos restantes ângulos. As leituras a 45° e a 60° são nulas à exceção dos discos planos que, para velocidades mais elevadas, apresentaram rotação.

A calibração do mecanismo envolveu a caracterização da rotação obtida, as velocidades e as inclinações, que vão além das esperadas no interior do gerador de vórtices de fogo.

Das observações efetuadas no decorrer dos ensaios, estimou-se que a inclinação da chama no interior do túnel não ultrapasse os 30°. O conhecimento destas fronteiras

permite excluir precisamente as inclinações para as quais se obteve resultados menos estáveis.

Podemos agora cingir a escolha do melhor conjunto de pás a utilizar com a observação dos resultados até aos 30° de inclinação. Como já foi dito, todos os conjuntos apresentam um comportamento consistente com o aumento da velocidade do escoamento, mas não se pode dizer o mesmo quando comparados os conjuntos de pás entre si. Para demonstrar isso mesmo, procedeu-se à comparação dos conjuntos de pás através do gráfico da figura 2.8.

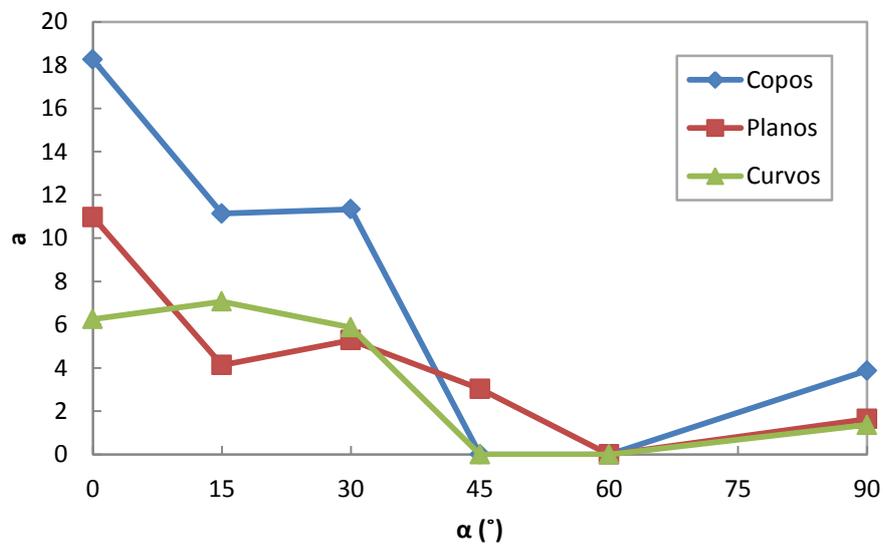


Figura 2.8. Estabilidade dos diferentes conjuntos de copos e pás

Neste gráfico temos as inclinações no eixo das abcissas e um fator a no eixo das coordenadas. O fator a define a estabilidade das leituras, e foi calculado através do declive das curvas de calibração de cada conjunto demonstradas nas figuras 2.9, 2.10 e 2.11.

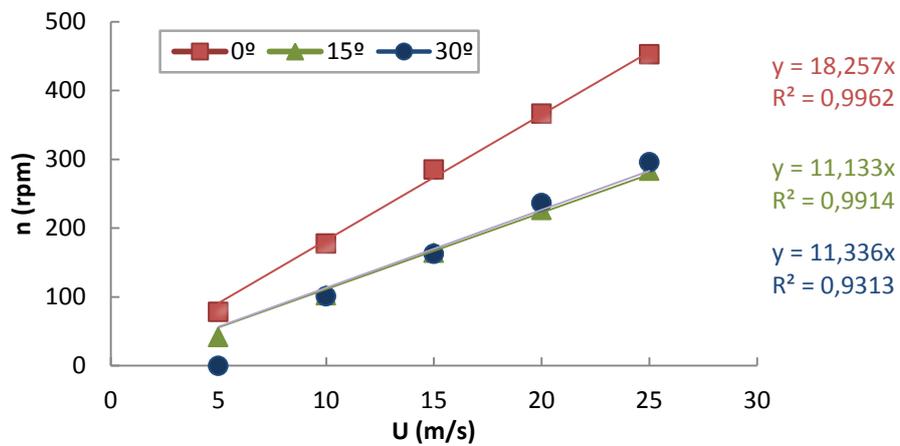


Figura 2.9. Calibração do conjunto de copos

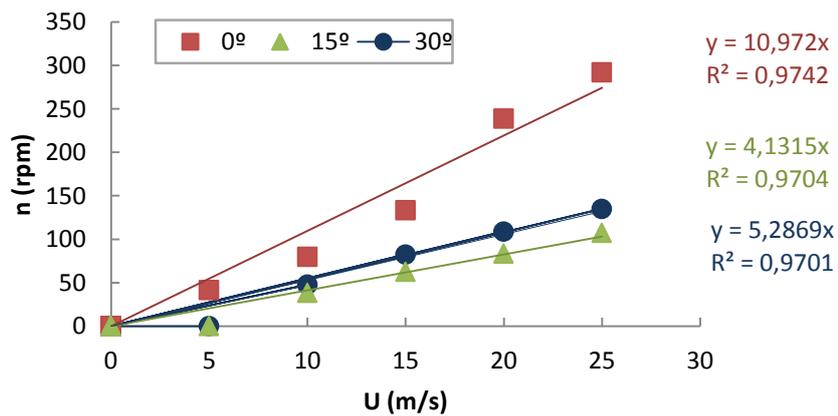


Figura 2.10. Calibração do conjunto de discos planos

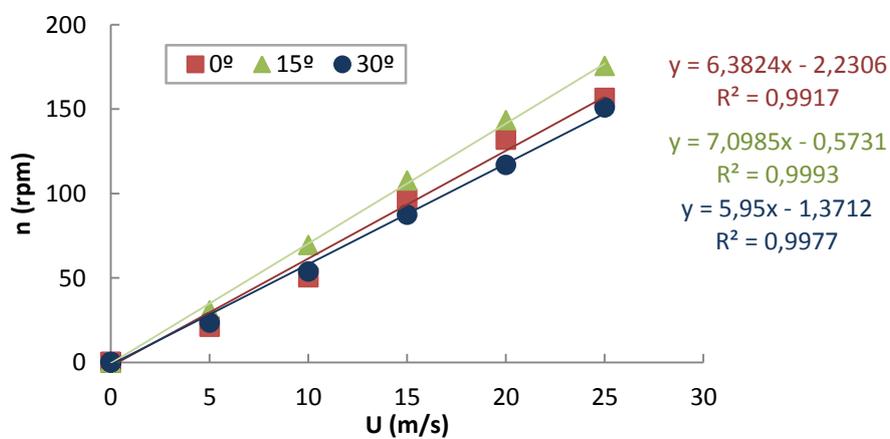


Figura 2.11. Calibração do conjunto de discos curvos

A análise do fator **a** do gráfico na figura 2.8 permite concluir que o conjunto de pás, com o comportamento mais estável é o conjunto dos discos curvos. Este conjunto apresenta valores de **a** mais próximos para cada inclinação em relação aos valores de **a** obtidos pelos outros conjuntos para as mesmas inclinações. Esta estabilidade indica melhores resultados para a gama de inclinações do escoamento esperadas no interior do GV, sendo o gráfico da figura 2.11 o respeitante às retas de calibração do mecanismo.

2.4. Conclusões

A primeira função do mecanismo será a calibração dos ventiladores recentemente acoplados ao GV. Após esta calibração a sua função será aquela para o qual foi projetado, que é medir a velocidade rotacional de vórtices de fogo no interior do gerador de vórtices.

Apesar de ainda não ter sido posto à prova e não estar exposta qualquer falha do mecanismo, existem algumas melhorias já identificadas, que ficam aqui enumeradas:

- O veio que transmite o movimento das pás ao disco do encoder está apenas apoiado num ponto por um rolamento, esta situação conduz a um ligeiro desalinhamento do veio devido á folga do rolamento de esferas. A utilização de um segundo rolamento no topo do veio, mais perto do disco do encoder seria uma solução possível, assim como o uso de um rolamento de agulhas ao invés do de esferas que possui menor folga axialmente, e acompanha o veio por uma maior altura. Tanto uma solução como a outra possuem o inconveniente de aumentar a fricção, conduzindo a uma menor sensibilidade;
- O diâmetro exterior do mecanismo foi assim projetado para uma melhor proteção da eletrónica sensível a temperatura no seu interior, contudo as dimensões tiveram por base outros equipamentos para funções que apenas tem em comum as temperaturas elevadas, podia-se por isso otimizar as dimensões para valores menores, estudando a transmissão de calor entre as várias camadas do corpo do mecanismo, alterando os materiais se surgissem outros mais capazes;

- A distância entre o rotor das pás e o corpo principal do mecanismo podia ser aumentada, de forma a diminuir a interferência do escoamento vertical na rotação das pás. O escoamento ao embater no corpo principal do mecanismo desvia-se deste entrando em contacto com as pás e provoca interferência nas leituras independentemente do conjunto de pás usado. Para resolver este problema propõe-se o uso de um veio mais comprido no interior de um tubo adaptado ao corpo principal. Esta modificação resolveria também a questão do apoio do veio, criando mais pontos de contato e, eliminando assim a folga e consequentemente o desalinhamento;
- A forma do corpo principal podia também ser otimizada para um perfil que causasse menos perturbações ao escoamento;
- A resistência a altas temperaturas pode ser melhorada se for reduzido ao máximo o uso de componentes eletrónicos. Uma vez que apenas interessa conhecer as rotações do mecanismo, podia-se eliminar o encoder, substituindo-o por um simples interruptor mecânico, que a cada volta fechasse uma vez o circuito. O fecho do circuito por um instante a cada rotação permitia ao microcontrolador contar o número de voltas e o tempo de cada uma, e assim determinar as rotações por unidade de tempo. O interruptor pode ser obtido por uma indentação ou relevo no veio, que mecanicamente fechasse o circuito montado na parte estática do mecanismo. Esta alteração permite reduzir o tamanho do mecanismo para pelo menos um terço, mas implica uma perda de informação em comparação ao uso de um encoder;
- Em sentido contrário a adaptação de outro encoder no veio permitiria fazer uma melhor caracterização do movimento, passaria a ser possível definir o sentido da rotação;
- Por último, a retificação das pás é de extrema importância, pois a mais ligeira diferença no peso ou na geometria existente em apenas uma das pás provoca vibração do veio e leituras deficientes.

O desenvolvimento do mecanismo de medição de velocidade rotacional foi efetuado com sucesso. Devido à falta de tempo, não foi possível passar à fase de utilização do mecanismo para obter dados no interior do GV, não podendo estes constar no presente trabalho.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O CEIF é uma unidade da ADAI dedicada à investigação aplicada no campo dos incêndios florestais, e que está ligado ao DEM da FCTUC.

Os ensaios foram realizados no LEIF que é uma infraestrutura pertencente ao CEIF/ADAI, e que se situa no aeródromo da Lousã.

Foram realizados 32 ensaios, mas para análise e tratamento de dados não se tiveram em conta os primeiros, sendo estes somente para observação de funcionamento do túnel.

Os combustíveis florestais utilizados foram *Pinus pinaster* (caruma), *Avena sativa* (palha) e mato.

O presente capítulo tem como objetivo descrever os procedimentos e alterações feitas ao longo dos ensaios, sendo descritos por ordem toda a sua evolução.

3.1. Equipamento

3.1.1. Túnel vertical - Gerador de Vórtices

Para a realização dos ensaios, o LEIF adquiriu um túnel vertical denominado Gerador de Vórtices (GV), projetado pelo Professor Xavier Viegas, com aproximadamente 8 metros de altura e 1 m² de secção.

O GV é composto por quatro faces, duas faces protegidas por vidro temperado e duas faces em chapa de aço. Cada uma das faces do GV tem uma abertura vertical, a toda a altura do túnel, com 10 cm de largura, posicionada do lado direito de cada uma das faces. As aberturas asseguram que a entrada do ar induzido pela combustão entre no túnel, conferindo, assim, um fluxo de rotação necessário para a formação do vórtice de fogo.

Na figura 3.1 estão representados uma imagem e um esquema do GV original com as respetivas dimensões.

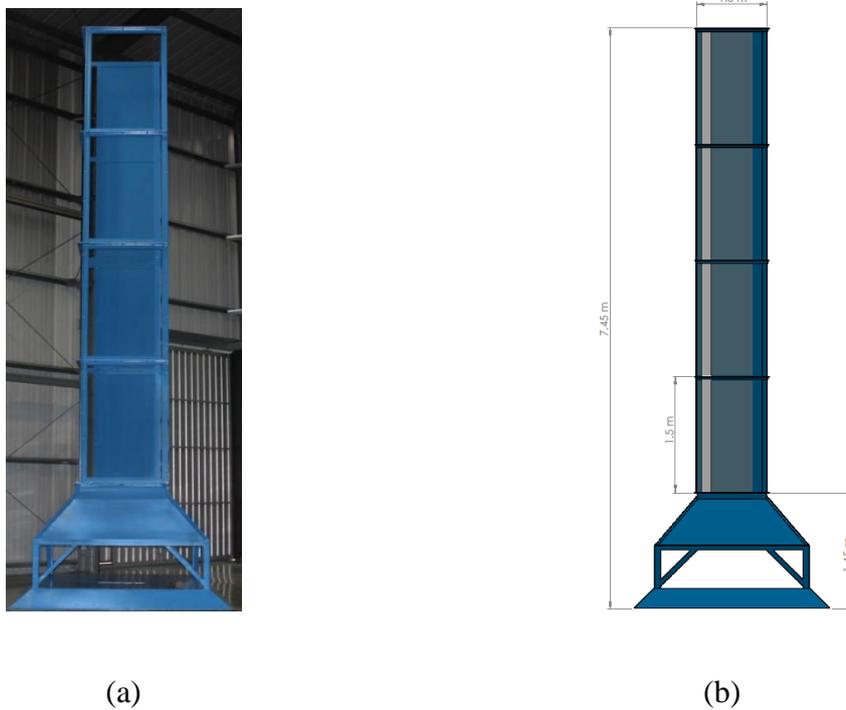


Figura 3.1. Túnel gerador de vórtices: (a) GV inicial sem qualquer alteração; (b) esquema com as principais dimensões

Tratando-se de um equipamento novo e único, foi necessário proceder a alterações no túnel com o decorrer dos ensaios, que serão descritas na próxima secção.

3.1.2. Cestos

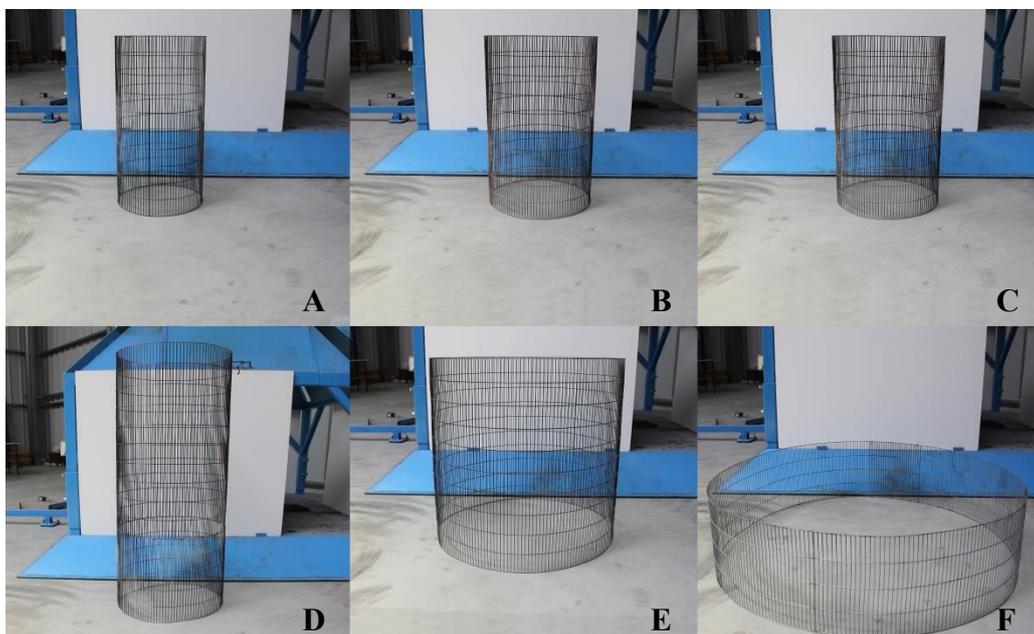
Foi necessário arranjar uma solução para acondicionar o combustível, utilizado no decorrer dos ensaios, de modo a colocar no interior do GV. Deste modo, foram, então, construídos seis cestos de diferentes dimensões.

Na tabela 2.1 estão representados os diferentes diâmetros, alturas e massas dos cestos.

Tabela 3.1. Dimensões dos cestos utilizados nos ensaios

Cesto	Altura (m)	Diâmetro (m)	m_{cesto} (kg)
A	0,760	0,350	3,210
B	0,760	0,500	4,160
C	0,760	0,500	4,040
D	1,160	0,500	6,050
E	0,760	0,800	4,620
F	0,305	1,120	2,670

Os diferentes cestos serão utilizados para analisar qual o mais indicado para visualização e estudo das características do vórtice. Na figura 3.2 estão representados todos os cestos construídos e em cada imagem está indicada a letra correspondente ao cesto em questão.

**Figura 3.2.** Diferentes cestos utilizados

A figura 3.3 mostra um dos cestos já preparado e colocado na base do braço de ferro ligado à balança.



Figura 3.3. Cesto com combustível acondicionado no seu interior

3.1.3. Analisador do Teor de Humidade

O analisador de teor de humidade (*AND MX-50 resolução 0.01% Max = 51 g*), presente na figura 3.4, mede a humidade do combustível, no qual é colocado uma amostra do combustível a ser utilizado no ensaio, e esta seca por ação de uma lâmpada que sujeita a amostra a 105 °C, aproximadamente, durante 15 minutos.

Como a maioria dos ensaios foram realizados com mato e este é composto por mais que uma espécie, teve-se o cuidado de fazer uma seleção e recolha diversificada de amostras para análise do teor de humidade, pois diferentes espécies apresentam diferentes teores de humidade.

Estas medições foram efetuadas para saber qual a massa de combustível necessária para cada ensaio, tendo como massa de combustível inicial pretendida, em base seca, $m_0 = 4$ kg. Sendo assim, foi calculada a massa de cada componente na mistura pela fórmula:

$$m_f = (1 + M) \times m_0 \quad (3.1)$$



Figura 3.4. Analisador de teor de humidade

3.1.4. Balanças eletrónicas

No decorrer dos ensaios foram utilizadas duas balanças com finalidades distintas.

Uma das balanças (A&D HW-100KGL com 20 g de precisão) foi utilizada para fazer a pesagem do combustível total a colocar no interior do cesto.

A outra balança (HW - 15K d=15kg \times 0,02 kg) teve como finalidade aferir as perdas de massa devidas á queima do combustível ao longo de cada ensaio. Estando a lidar-se com altas temperaturas não foi possível colocar a balança diretamente no interior da base do túnel, sendo assim, foi necessário engenhar um mecanismo constituído por uma balança ligada por um braço de ferro à base do túnel onde foram colocados os cestos, como se pode observar na figura 3.5.



Figura 3.5. Montagem da balança para aferição da perda de massa

A figura 3.6 mostra uma imagem e um esquema do túnel completo onde se pode visualizar em geral a montagem da balança.

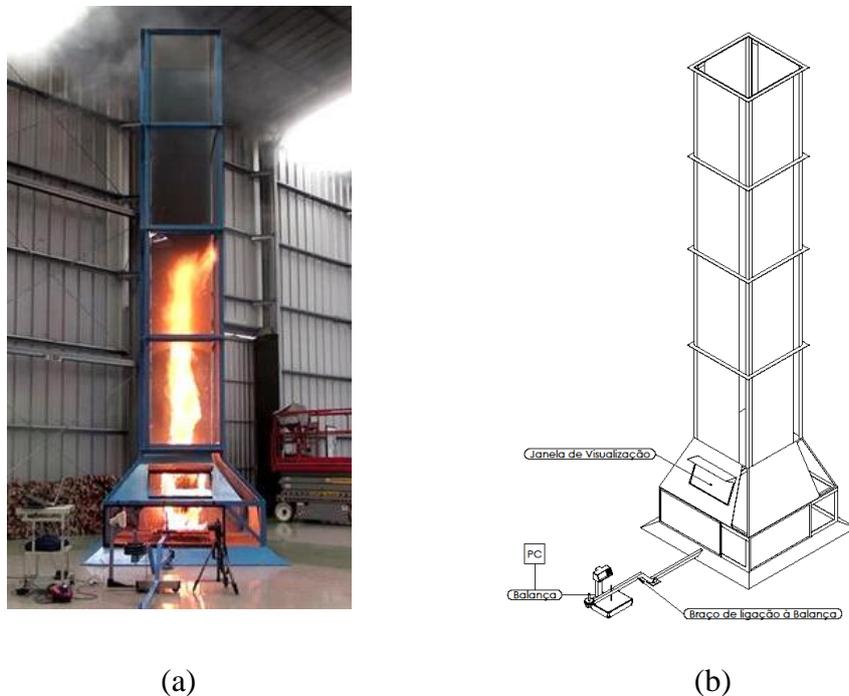


Figura 3.6. Mecanismo de ligação do túnel à balança: (a) imagem completa; (b) esquema em perspectiva

3.1.5. Termopar, tubo de Pitot e Computador

Como se pode observar na figura 3.7, a montagem é constituída pelo termopar para medição de temperaturas instantâneas e pelo tubo de Pitot para medição das velocidades de escoamentos, ambos envolvidos com fita adesiva de alumínio e ligados por cabos ao computador que processa os dados recebidos durante todo o ensaio.

O termopar e o tubo de Pitot foram utilizados em poucos ensaios, não sendo os dados registados por estes tidos em conta para tratamento de dados.

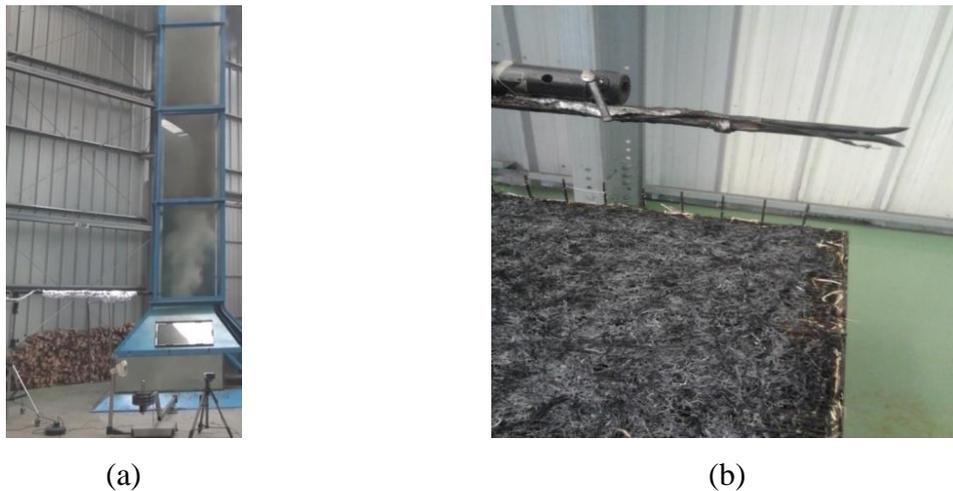


Figura 3.7. (a) Cabo composto pelo termopar e tubo de Pitot envolvidos em fita adesiva de alumínio; (b) Pormenor do tubo de Pitot

3.1.6. Câmaras de captura de imagem

No decorrer dos ensaios foram usadas duas câmaras de filmar, uma filmou os valores apresentados na balança e a outra filmou o ensaio no geral. Estas filmagens foram usadas para posterior tratamento de dados, no qual a primeira para saber a perda de massa ao longo do tempo, e a segunda para tirar dados da altura da chama ao longo do tempo. Como ponto de referência, o início de cada ensaio foi marcado por um sinal sonoro, a fim de alinhar os tempos para todos os dispositivos.

Para facilitar o tratamento de dados, a câmara que filmou a balança foi retirada, pois foi feita uma ligação da balança ao computador, sendo que a partir do ensaio 23, inclusive, os dados foram recebidos diretamente no computador.

Também foram captadas imagens por câmaras fotográficas.

3.2. Procedimento Experimental

3.2.1. Descrição geral do método de ensaio

A preparação dos ensaios iniciou com a recolha de uma amostra de combustível, e, de seguida, anotou-se o tipo de combustível, temperatura ambiente e humidade relativa do ar. Posteriormente procedeu-se à medição do teor de humidade do combustível no analisador de teor de humidade.

Feita a medição do teor de humidade do combustível, fez-se a determinação do peso total de combustível a utilizar nos ensaios, como já referido. De seguida fez-se a pesagem do combustível na balança e colocou-se no interior do cesto.

Após toda esta preparação o cesto foi colocado no interior do túnel, fez-se a ativação da ignição com o uso de um fio de lã embebido em gasolina e colocado no cesto a rodear o seu perímetro, ou então, utilizou-se o maçarico.

Todos os ensaios foram registados em imagens feitas pelas câmaras e por dados recebidos pelo computador. Na figura 3.8 observam-se as várias fases do decorrer de um dos últimos ensaios realizados, já com o túnel devidamente instrumentado.

Terminados os ensaios, deixou-se arrefecer o cesto, retirando-o depois. Procede-se à limpeza da base onde esteve colocado o cesto, estando pronto para a realização de um novo ensaio.



Figura 3.8. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo

3.2.2. Realização dos ensaios no exterior do túnel

Foram feitos alguns ensaios no exterior do túnel, e para estes serem executados foi necessário retirar o braço de ferro e a base do interior do túnel e colocar no exterior. Na figura 3.9 pode observar-se as várias fases de um dos ensaios.



Figura 3.9. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo

A partir do dia 5 de Março, inclusive, já foram realizados ensaios no interior e exterior do túnel, sequencialmente, não sendo assim necessário mover o braço de ferro para o exterior do túnel, pois foi construído outro com a mesma forma para estar no exterior do túnel.

3.2.3. Alterações no túnel

Desde a aquisição do GV têm vindo a ser feitas algumas alterações neste, as quais visam a melhoria na observação e no estudo da formação dos vórtices.

A primeira alteração foi feita em Janeiro nas laterais da base, as quais eram abertas, sendo então parcialmente cobertas. Numa primeira fase os ensaios realizaram-se como ilustra a figura 3.10, e depois a abertura da frente do túnel foi substituída por uma placa de vidro para se visionar o interior da base, continuando as restantes aberturas com chapa. Esta alteração permitiu com que a entrada de ar na base fosse menor e controlada.



Figura 3.10. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo

Como se pode observar na figura 3.11, em Fevereiro foi feito um corte retangular na chapa do equipamento e inserido um vidro para se observar facilmente o ensaio no interior da sua base. Também se verificou outra modificação que consistiu nos cortes laterais na chapa, em que o corte inicia-se com uma largura igual à das aberturas ao longo do túnel, de 10 cm, e que aumenta finalizando com 20 cm de largura. Teve como objetivo averiguar se estes cortes tinham influência nos resultados dos ensaios.

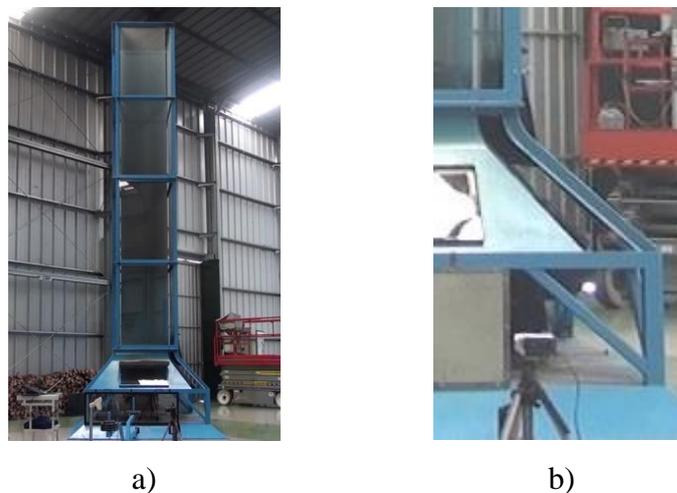


Figura 3.11. (a) Alterações do GV referentes ao vidro colocado na chapa e do corte lateral; (b) Pormenor do corte lateral

No dia 14 de Março foram feitas alterações correspondentes à colocação de quatro tubos de Pitot e quatro termopares (cada termopar está junto de cada tubo de Pitot) no interior do túnel em diferentes locais, para medição das velocidades e temperaturas ao longo do ensaio. Foram feitas quatro pequenas aberturas nas faces laterais da chapa de aço para inserir os respetivos instrumentos, duas a 2,20 metros de altura a contar da base (uma em cada face) e duas a 3,70 metros também a contar da base (uma em cada face). As aberturas numa das faces foram para colocar os tubos de Pitot na horizontal, com a designação H2 (em baixo) e H4 (em cima), e na outra face com a designação V1 (em baixo) e V3 (em cima).

A figura 3.12 mostra dois dos tubos de Pitot montados como descrito acima, um posicionado na horizontal e outro na vertical, e os respetivos termopares em cada um dos tubos de Pitot.



Figura 3.12. Tubos de Pitot montados na lateral da chapa

Neste mesmo dia foi colocado um ventilador n uma das entradas do GV, e foi feito um ensaio para se observar qual a influência da entrada de ar forçado a 4 m/s no interior do túnel.

No dia 27 de Março todas as entradas foram cobertas por folha de alumínio, como se pode observar na figura 3.13.

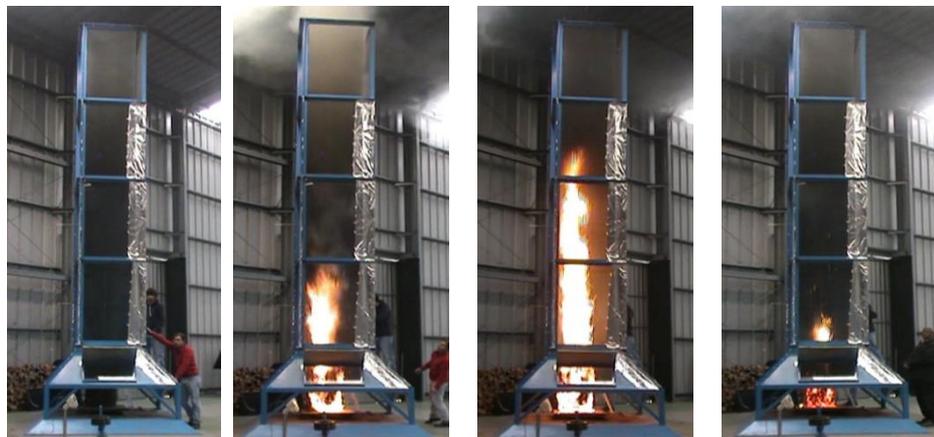


Figura 3.13. Ensaio completo com imagens de quatro fases distintas da formação do vórtice de fogo

No dia 28 de Maio, o GV foi deslocado para outro local no LEIF e a base do gerador de vórtices foi elevado 50 centímetros, como se pode verificar na figura 3.14. Este aumento tem como objetivo principal uma maior facilidade de acesso ao interior do túnel para manobras na colocação dos cestos com combustível.



Figura 3.14. Montagem do GV após deslocação de local com elevação de 50 centímetros na altura do túnel

3.3. Tratamento de dados

Os ensaios experimentais para caracterização dos parâmetros em estudo no presente trabalho foram, após conclusão, submetidos ao tratamento de dados, de modo a alcançar-se resultados concretos. Este tratamento foi obtido através de folhas de cálculo do Excel.

Os principais valores resultantes do tratamento de dados estão representados em anexo na tabela A1.

3.3.1. Taxa de perda de massa

Os valores da perda de massa foram registados no decorrer do ensaio diretamente para uma folha de Excel através de um cabo que fazia ligação da balança ao computador, registando o valor de massa a cada segundo.

Numa primeira abordagem foi necessário corrigir os valores da perda de massa, para base seca, pois durante a combustão é libertada água sob a forma de vapor de água, sendo necessário ter os valores da perda massa sem o fator humidade.

Após este acerto foi calculada a média da massa a cada cinco segundos, sequencialmente, ao longo do ensaio e para cada ensaio, isto é, calculou-se a média da massa relativa a cada intervalo de cinco segundos.

De seguida foi calculada a taxa de perda de massa ao longo da duração do ensaio em intervalos de cinco segundos, tendo interesse o valor da taxa máxima de perda de massa e o valor da taxa média de perda de massa característica. Nesta última foi feito o

cálculo da taxa média de perda de massa para os cinco pontos mais significativos que correspondem aos cinco pontos máximos da taxa de perda de massa em cada ensaio.

3.3.2. Caracterização geométrica da chama

A altura da chama e o diâmetro da chama foram dois parâmetros também de interesse no estudo da formação de um vórtice de fogo.

Estes parâmetros foram retirados através de tratamento de imagem, isto é, a câmara de filmar foi utilizada para gravar os ensaios e a partir destas filmagens foram medidas as alturas máximas das chamas de cinco em cinco segundos. Em relação ao diâmetro máximo foram escolhidos 3 pontos da chama a cada 5 segundos e feita a sua média.

3.3.3. Caracterização térmica dos combustíveis

Um dos parâmetros que também é de grande interesse no estudo de um vórtice de fogo é a potência gerada pelo vórtice de fogo, pois este fenómeno é caracterizado por uma elevada energia libertada.

A potência gerada consiste na energia libertada por unidade de tempo e é calculada com base na equação seguinte:

$$P = |\dot{m}| \times PCI_{Hum} \quad (W) \quad (3.2)$$

Na equação 3.2 é necessário calcular qual o poder calorífico inferior tendo em conta o valor do teor de humidade (PCI_{Hum}) para os combustíveis utilizados e qual o combustível em questão. Para calcular este valor foi necessário saber o poder calorífico superior (PCS), em base seca, e de seguida converteu-se para poder calorífico inferior (PCI) que se calcula a partir da equação 3.3. Somente depois calcula-se então o PCI_{Hum} conforme a equação 3.4.

$$\begin{aligned} PCI &= PCS + 61,5 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d] - 218,3 \times w(H)_d \\ &= PCS - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d] \quad (J/g) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} PCI_{Hum} &= [PCS - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d]] \times (1 - 0,01M) - 24,43M \\ &= PCI \times (1 - 0,01M) - 24,43M \quad (J/g) \end{aligned} \quad (3.4)$$

É de salientar que os valores de PCS, bem como os valores das composições químicas elementares dos diferentes combustíveis foram retirados de estudos recentes, os quais serão discutidos no capítulo seguinte.

De seguida foi calculada a potência gerada ao longo da duração do ensaio em intervalos de cinco segundos, tendo interesse o valor potência máxima e o valor da potência média característica. Nesta última foi feito o cálculo da potência para os cinco pontos mais significativos que correspondem aos cinco pontos máximos da potência em cada ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão exibidos os resultados obtidos dos ensaios experimentais bem como a análise dos mesmos, tendo em conta também a análise de resultados conforme se foi instrumentando e testando o GV, isto é, saber qual a influência das medições efetuadas conforme as alterações feitas no decorrer dos ensaios.

É necessário referir que as análises de resultados foram somente feitas em relação ao mato, pois trata-se do combustível mais representativo na superfície da região, sendo de fácil obtenção. Além disso, os ensaios com o uso de palha e de caruma necessitavam de uma secagem prévia pois o teor de humidade presente neles dificultava a realização dos ensaios com sucesso, enquanto o mato não necessitava de qualquer preparação.

4.1. Caracterização física e térmica

4.1.1. Massa perdida e taxa perda de massa

Dos dados obtidos da massa perdida de combustível no decorrer do ensaio foi possível observar que independentemente das alterações efetuadas no GV ou utilização de diferentes cestos a curva característica da perda de massa da formação de um vórtice de fogo é semelhante.

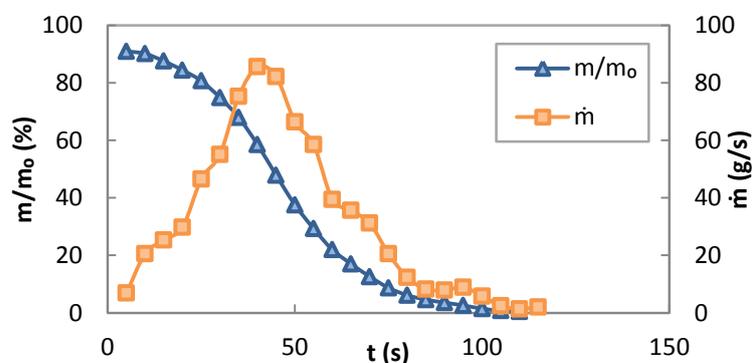


Figura 4.1. Exemplo de gráfico resultante da perda de massa na formação de um vórtice de fogo e taxa de perda de massa correspondentes ao ensaio GV31

Da figura 4.1 pode verificar-se que nos primeiros 25 segundos de ensaio houve uma ligeira perda de massa equivalente ao início da combustão e que nos 25 segundos seguintes (dos 25 segundos ao 75 segundos) houve um decréscimo acentuado de queima de massa que corresponde ao valor da taxa de perda de massa máximo, aos 40 segundos, como era de esperar.

Isto observa-se em todos os ensaios, variando somente a duração do ensaio ou o valor de queima de massa total, conforme as características do ensaio.

4.1.2. Geometria da chama – Altura e diâmetro da chama

A altura e o diâmetro de chama num vórtice de fogo são parâmetros importantes quando se estuda este fenómeno, têm um aspeto visual bastante peculiar, caracterizado por uma grande altura e um reduzido diâmetro de chama.

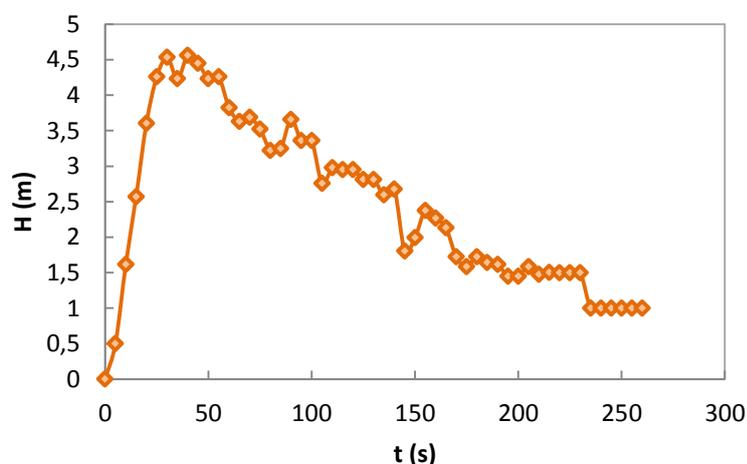


Figura 4.2. Altura da chama do mato ao longo da duração do ensaio GV33

Da figura 4.2 observa-se uma curva típica da variação da altura da chama com o decorrer do ensaio, tanto para ensaios no interior do túnel como no exterior, a única diferença entre eles é a altura da chama máxima atingida, sendo que quando se trata de um vórtice de fogo a altura máxima atingida pode elevar-se entre 0,5 metros e 1 metro em relação à de um ensaio sem vorticidade.

Em relação ao diâmetro da chama, era esperado um valor representativamente inferior ao diâmetro do cesto, contudo isso não se verificou, sendo assim, os resultados foram inconclusivos.

4.1.3. Potência gerada

Como referido no tratamento de dados, foi necessário calcular a potência gerada. Na tabela 4.1 estão os diferentes valores do PCS para as duas espécies presentes no mato. São estudos de diferentes autores e pode observar-se que estes variam entre 21 e 24 MJ/kg.

Tabela 4.1. Poder calorífico superior, em base seca, para urze e carqueija

Referência	PCS (b.s.) (MJ/kg)	
	Urze	Carqueija
A. Lopes (2014)	22,4	23,1
R. Schmitz (2009)	21,48	20,91
H. Viana <i>et al.</i> (2012)	24,117	21,365
Estudo ADAI	20,893	-

Os valores escolhidos para o presente cálculo foram o estudo feito pelo Lopes (2014) pois é o estudo mais recente e foi feito com combustível colhido na região. Na tabela 4.2 está representada a composição química elementar para cada espécie.

Tabela 4.2. Composição química elementar de *Erica Australis* e *Pterospatum tridentatum*

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

Com as equações (3.3) e (3.4) calcularam-se os valores do PCI, fazendo-se uma média, como se pode verificar na tabela 4.3 e de seguida calcularam-se os valores de PCI tendo em conta o teor de humidade do mato, como se observa na tabela 4.4.

Tabela 4.3. PCI e média de *Erica Australis* e *Pterospatum tridentatum*

Amostra	PCI (MJ/kg)	PCI _{méd} (MJ/kg)
<i>Erica Australis</i> (Urze)	20,83	21,17
<i>Pterospatum tridentatum</i> (Carqueja)	21,51	

Tabela 4.4. PCI tendo em conta o teor de humidade do mato

Ensaio	M	PCI _{méd} (MJ/kg)	PCI _{Hum} (MJ/kg)
GV15 a GV17	18,2	21,17	16,87
GV21 a GV24	18		16,92
GV25 a GV29	16		17,39
GV30 a GV33	14,4		17,77
GV34 e GV35	14,5		17,75
GV36 e GV37	12,04		18,24

Da tabela 4.4 verifica-se que o teor de humidade tem influência nos resultados, apesar de a sua variação não ser muito significativa. Um estudo interessante a realizar-se seria a o estudo da formação de um vórtice de fogo perante diferentes teores de humidade para um mesmo combustível florestal.

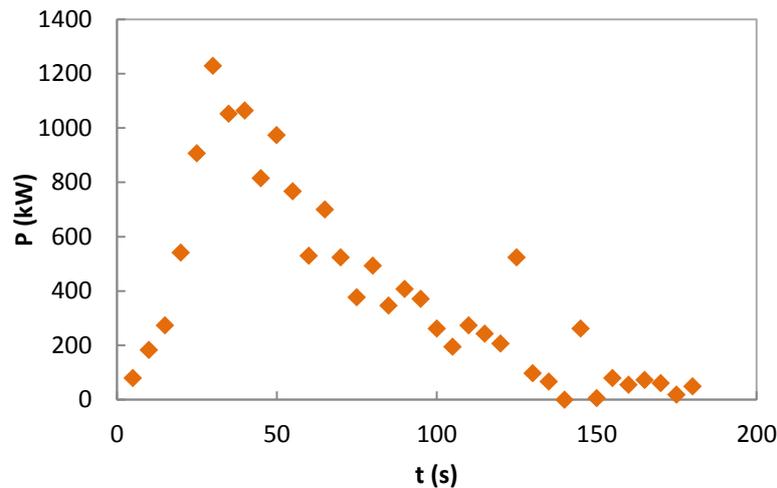


Figura 4.3. Potência gerada ao longo do ensaio GV30

Na figura 4.3 está representada a curva característica da potência em função do tempo num ensaio feito no interior do túnel. Como era de esperar, a sua configuração é semelhante às curvas da taxa de perda de massa.

As potências geradas pelos vórtices de fogo podem atingir aproximadamente os 2000 kW, como se pode verificar na tabela A1 em anexo.

Em estudos realizados com combustíveis líquidos as potências atingidas são bastante menores, como por exemplo, para valores registados por Lei *et. al* (2011), nos quais se observou o valor máximo de 602, 52 kW para um cesto de diâmetro de 0,50 m e no presente estudo para o mesmo diâmetro são atingidos 1000 kW.

4.2. Variação das condições de ensaio

Neste subcapítulo fez-se uma análise comparativa fazendo variar certas condições de ensaio, a fim de se ver quais os que obtêm melhores resultados a essas variações.

As variações consistem no aumento do diâmetro dos cestos, na variação do ambiente de ensaio, isto é, comparação entre ensaios realizados no exterior e no interior do túnel e a nas alterações temporárias feitas no GV, tais como, o uso de ventilador, a cobertura das aberturas do GV, um ensaio realizado no exterior e outro no interior do túnel.

4.2.1. Variação do diâmetro dos cestos

Os cestos são um equipamento indispensável para a realização dos ensaios e as suas dimensões, mais concretamente o diâmetro, têm influência nos resultados obtidos, daí o interesse em ter cestos com diferentes dimensões

De entre os cestos que foram construídos existem três tipos de cestos com diâmetros iguais mas diferentes alturas, dois com 0,76 m e outro com 1,16 m. Sendo assim, para saber se as alturas dos cestos não têm influência na análise de resultados, foi feita uma comparação entre algumas características estudadas para se observar se o cesto com 1,16 m de altura estava dentro da gama de valores dos cestos com 0,76 m.

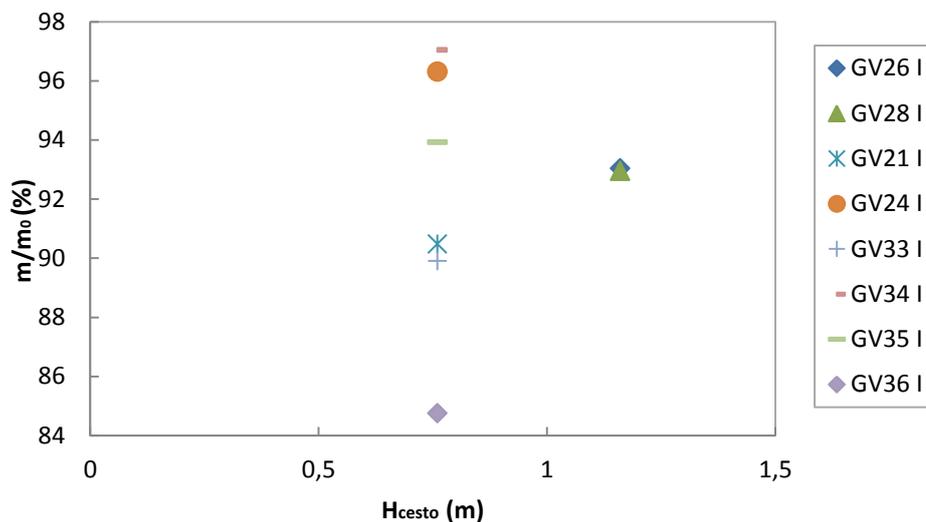


Figura 4.4. Valores m/m_0 para diferentes alturas de cesto

Utilizou-se como base de comparação a massa perdida total, pois tem-se como ponto fixo a carga de combustível inicial, que é sempre igual em todos os ensaios ($m_0 = 4000$ g).

Como se pode verificar na figura 4.4, os dois pontos correspondentes a altura de 1,16 m (cesto D) estão entre a gama de valores dos pontos correspondentes a altura 0,76 m (cesto C). Como ambos os cestos têm o mesmo diâmetro pode-se então desprezar a diferença de altura de cestos, tendo em conta somente o diâmetro dos cestos.

Desta forma podem-se fazer as devidas comparações não havendo necessidade de distinguir os cestos pela altura destes.

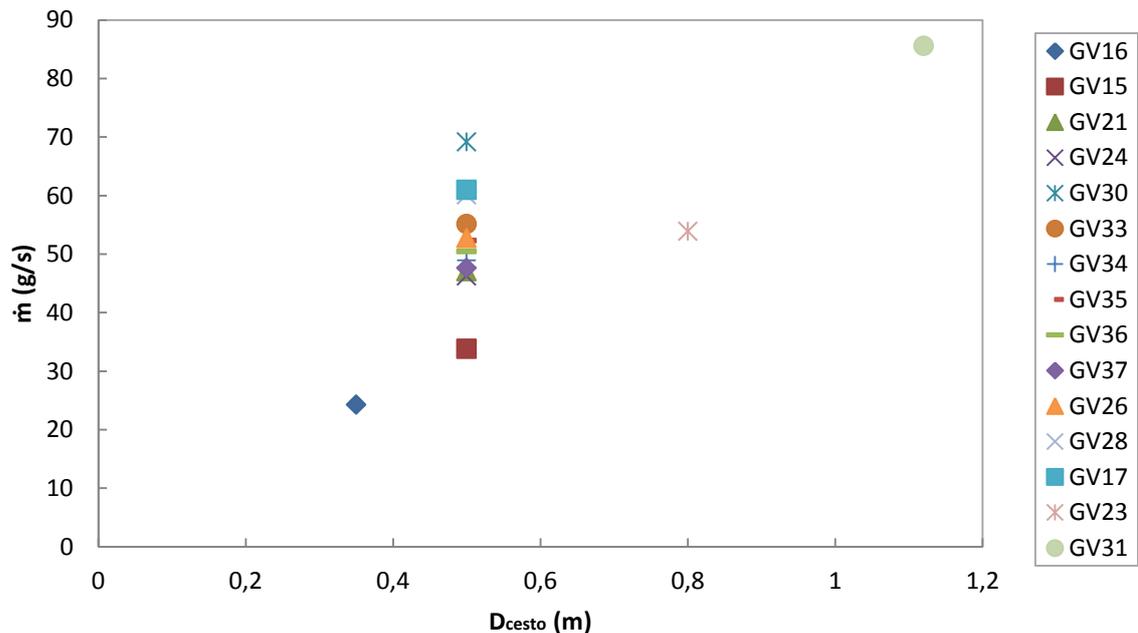


Figura 4.5. Variação de $\dot{m}_{\text{máx}}$ com o aumento do diâmetro do cesto

No geral, os valores para a taxa de perda de massa máxima aumentam com o aumento do diâmetro do cesto. A quantidade de ensaios feitos para os diâmetros de 0,35 m, 0,8 m e 1,12 m é muito reduzida, sendo uma pequena amostra de ensaios para se concluir de facto que existe uma relação entre aumento da taxa de perda de massa e aumento do diâmetro do cesto.

Mesmo assim, pode concluir-se, com certezas, que comparando o valor da taxa de perda de massa máxima do cesto com o menor diâmetro com o de maior diâmetro, independentemente do número de ensaios efetuados, que existe um aumento de taxa de queima de massa.

Na figura 4.6 pode observar-se que os valores de altura da chama para o diâmetro de 0,5 m são mais concisos em relação aos da figura 4.5, e que se verifica um aumento da altura da chama máxima com o aumento dos diâmetros, exceto para o diâmetro de cesto maior. Isto pode dever-se ao mato inicial colocado para realização do ensaio não ser o suficiente para atingir um pico máximo de chama, ou o facto do diâmetro do cesto ser exagerado para as dimensões da base do túnel onde se colocava o cesto.

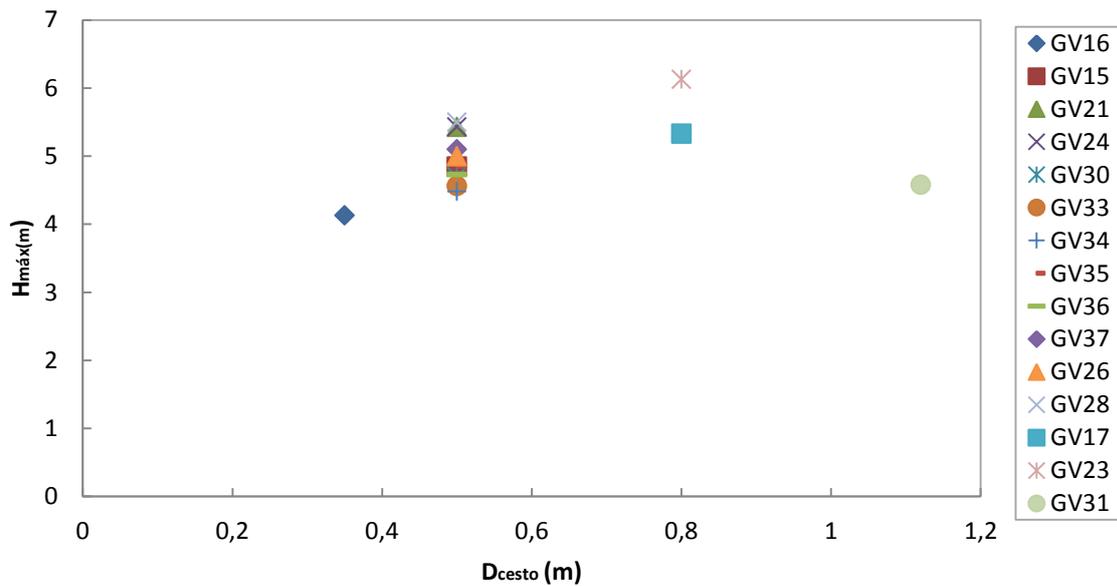


Figura 4.6. Variação de $H_{máx}$ com o aumento do diâmetro do cesto

4.2.2. Variação do ambiente de ensaio

Foram realizados ensaios no interior do túnel e outros no exterior do túnel para se analisar quais as diferenças observadas entre um fogo com vorticidade e um sem vorticidade.

Tiveram-se em conta para análise de dados os ensaios com características semelhantes nas dimensões do cesto, no teor de humidade e hora de realização.

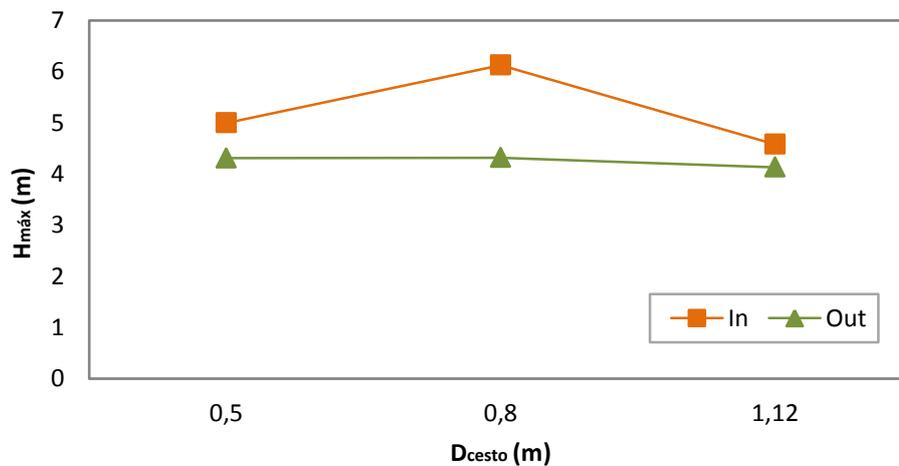


Figura 4.7. Variação de $H_{máx}$ com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel

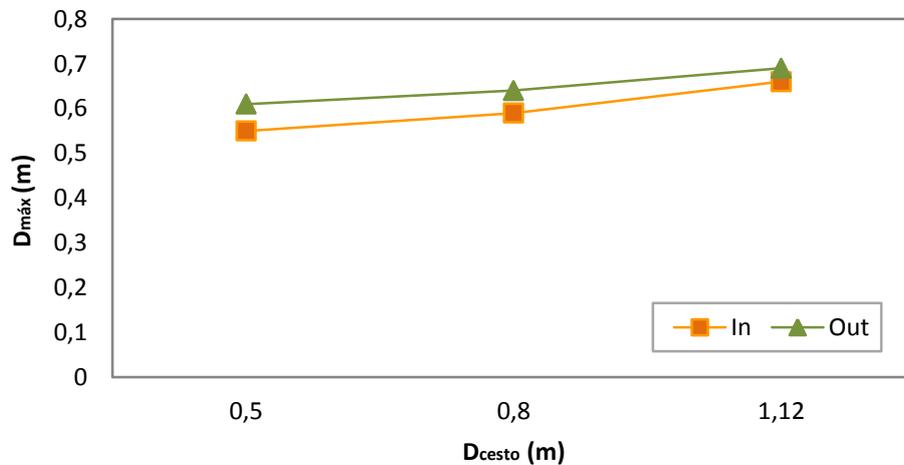


Figura 4.8. Variação de $D_{máx}$ com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel

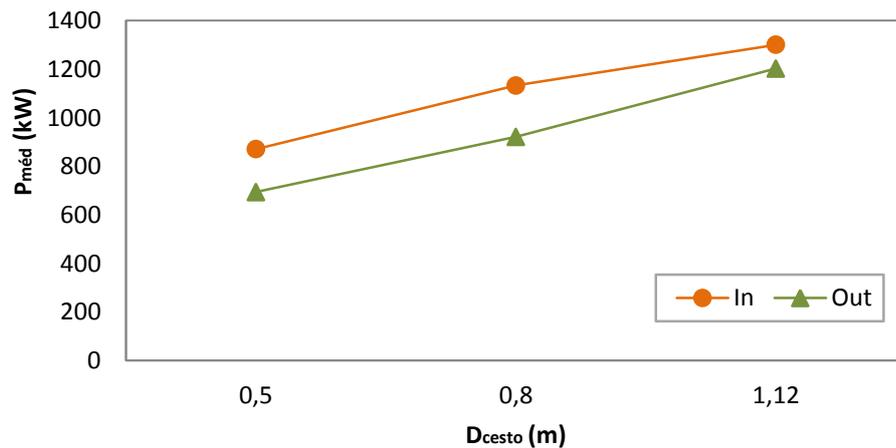


Figura 4.9. Variação da potência média característica com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel

É observável nas figuras 4.7 e 4.9 que as alturas máximas de chama e potências geradas pela combustão do mato são superiores nos ensaios onde se observa vorticidade, já o diâmetro máximo da chama é inferior quando há vorticidade, como se pode visualizar na figura 4.8. Isto acontece devido ao movimento de rotação gerado pelo fogo no interior do túnel que faz com que o seu diâmetro se reduza e altura de chama aumente, isto é, a conservação de momento faz com que a redução de diâmetro leve a uma aceleração do movimento rotacional, criando uma redução de pressão, havendo uma capacidade sucção

de oxigénio fresco elevada que traz mais vorticidade, acelerando ainda mais a velocidade rotacional (Meroney, 2003).

Na figura 4.7, é importante notar que o valor da altura máxima para o cesto de maior diâmetro diminuiu em relação aos outros, o que não é um comportamento comum, pois a potência gerada pelo vórtice referente a este cesto é maior, sendo então de esperar que a altura máxima tivesse o mesmo comportamento.

Apesar das diferenças visualizadas na variação do ambiente do ensaio (exterior/interior) estas diferenças não são muito significativas. Para potenciar estas observações de vorticidade no fogo será necessário induzir-lhe uma circulação de ar forçada a fim de ter melhores resultados, além de se poder estudar todas as características em função de diferentes velocidades de escoamento possíveis de variar.

4.3. Variação de condições de ensaio

As análises da variação de condições do ensaio foram feitas tendo o cuidado de utilizar o mesmo diâmetro de cesto, teores de humidade do mato semelhantes e realização dos ensaios a horas próximas, a fim de existir uma menor interferência destas condições, que de outra forma podem levar a um acréscimo de erro.

Os quatro casos em estudo consistiram:

- Na utilização de um ventilador direcionado a uma das entradas da base do túnel forçando a entrada de ar a 4 m/s;
- Na cobertura de todas as entradas de ar do túnel;
- Num ensaio normal no interior do túnel;
- Num ensaio normal no exterior do túnel.

Destes quatro ensaios distintos surgiram diferenças entre eles, tanto a nível de observação direta da formação ou não do vórtice, como do tratamento de dados realizado.

Na tabela 4.3 podem observar-se a duração do ensaio, a percentagem de massa queimada e a potência máxima gerada para cada caso.

Tabela 4.5. Dados principais obtidos para as diferentes condições de ensaio

Condição de ensaio	Duração de ensaio (s)	Massa queimada (%)	Potência máxima (kW)
Ventilador	180	99	1229
Coberto	230	90	992
Interior	260	90	980
Exterior	205	83	882

Da leitura da tabela 4.5, verifica-se que dos quatro casos em estudo aquele no qual foi utilizado o ventilador é o que apresenta resultados mais interessantes, pois num menor tempo de duração de ensaio obteve-se a potência máxima mais elevada. Daqui conclui-se que a adição de um escoamento forçado potencia as características estudadas do vórtice, pois há uma maior sucção de oxigénio fresco criando uma maior velocidade rotacional, como já foi explicado.

Como era esperado, o ensaio realizado no exterior do túnel, isto é, aquele que não apresente vorticidade, é o que tem uma potência menor.

Na figura 4.10 estão bem evidenciadas as diferenças para os 4 casos em estudo.

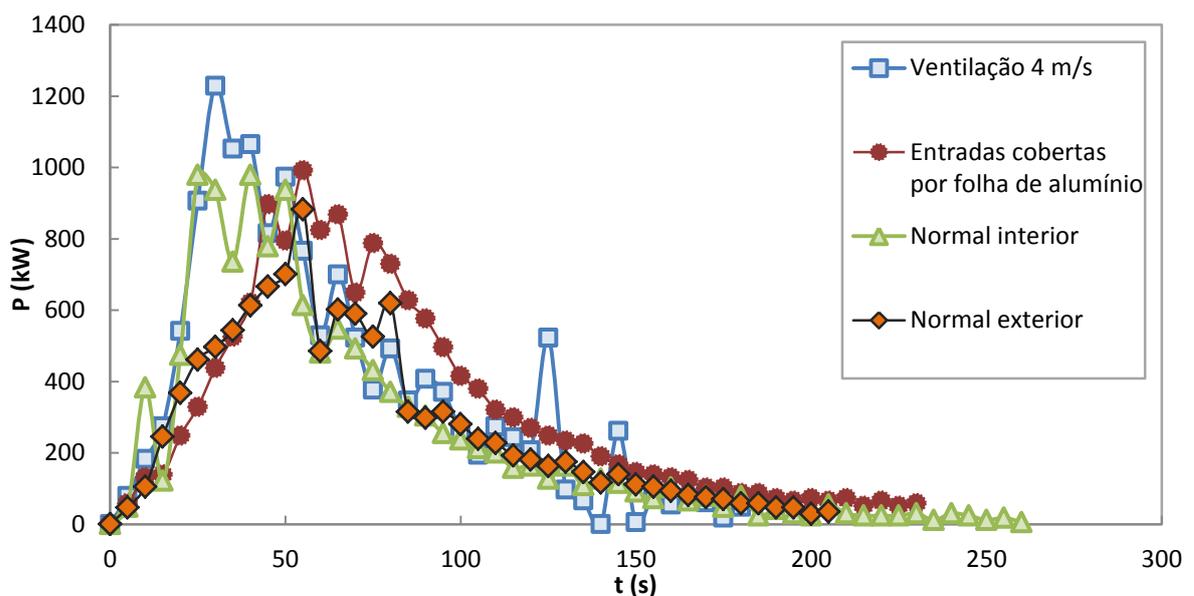


Figura 4.10. Variação da potência média característica com o aumento do diâmetro do cesto no interior e exterior do túnel

A figura acima é, de um modo geral, uma boa representação das diferenças associadas a cada ensaio, e qual a importância que têm no estudo de um vórtice de fogo. Verifica-se que uma das características importantes é a rapidez com que se atinge uma elevada potência gerada, e é um dos fatores que fazem dos vórtices de fogo um fenómeno bastante perigoso e imprevisível, como mostram as curvas da potência para o ventilador e para o ensaio no interior do túnel. Já num incêndio no qual não ocorre vorticidade a potência atingida é bastante menor, demorando mais tempo a alcançá-la como mostra a curva relativa ao ensaio no exterior.

O comportamento apresentado pela curva relativa às aberturas cobertas por folha de alumínio é mais lento a atingir a potência máxima mas atinge uma potência semelhante ao ensaio normal no interior do túnel. Este crescimento mais lento pode dever-se ao facto de não existir ar a entrar ao longo do túnel, só nas aberturas das bases, e isto faz com que a velocidade rotacional não seja tão elevada.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo base o desenvolvimento do gerador de vórtices de fogo, nele foi definido o procedimento experimental de ensaio, foram testadas e implementadas diferentes configurações, e desenvolvida instrumentação personalizada, para obter variados tipos de dados, tudo isto baseado nos ensaios efetuados no próprio gerador de vórtices.

O procedimento experimental desenvolvido visou uniformizar o procedimento de ensaio em estudos futuros. Se todos os ensaios obedecerem a uma base semelhante os resultados obtidos serão mais facilmente comparados, contribuindo assim para melhores conclusões.

À medida que os ensaios foram sendo feitos, tentou-se sempre estudar de que forma a alteração de diferentes parâmetros influenciavam a formação e as características do vórtice de fogo. Parâmetros como o tipo de combustível, o diâmetro do cesto, a existência de entradas de ar, as suas dimensões e a alteração da velocidade do escoamento, foram alguns dos parâmetros testados. A percepção do efeito de cada alteração, espelhado nos resultados dos ensaios foi determinante na compreensão de todo o fenómeno.

Os dados retirados do gerador são a principal ferramenta usada no estudo da formação e desenvolvimento de vórtices de fogo, o uso de dispositivos que permitam obter mais e melhores dados são por isso de extrema importância.

Dos 32 ensaios realizados foi possível verificar que uma das características importantes em ensaios com formação de vórtice de fogo é a rapidez com que se atinge uma elevada potência gerada, uma grande altura de chama e uma grande taxa de perda de massa, sendo fatores que fazem dos vórtices de fogo um fenómeno bastante perigoso e imprevisível. Já num ensaio em que não se verifica vorticidade a potência atingida, alturas de chama e taxas de perda de massa são bem menores.

Para além dos equipamentos usados surgiu a necessidade de quantificar a velocidade rotacional do vórtice de fogo, para a qual foi apresentada e desenvolvida a solução referida no capítulo dois. No futuro outros mecanismos serão desenvolvidos, devido à crescente necessidade de obter novos dados.

Em estudos futuros, seria importante efetuar um maior número de ensaios para as mesmas condições, isto permitirá retirar conclusões mais fortes, ou seja, melhor fundamentadas. A variação de apenas um parâmetro de cada vez contribui para um conhecimento mais preciso da forma como este influencia todo o fenômeno. A utilização de outros tipos de combustíveis e a diferentes humidades, foram parâmetros que se concluiu serem de grande importância, e por isso deviam também ser alvo de estudos futuros.

Ao nível das melhorias a efetuar no gerador e na sua instrumentação seria importante repensar a forma utilizada na medição das alturas e do diâmetro da chama. O desenvolvimento de um programa de tratamento de imagem que calculasse o diâmetro e altura da chama automaticamente através do contraste seria uma solução possível.

O aspeto visual do gerador de vórtices podia também ser melhorado se o sistema de medição de massa fosse substituído por uma célula de carga montada debaixo da base dos cestos.

O estudo efetuado neste trabalho e os resultados retirados deste, permitiram sem qualquer dúvida o desenvolvimento do gerador de vórtices.

O número de ensaios efetuado, as várias condições testadas e os parâmetros que se foram variando, contribuíram para um melhor entendimento da formação e do desenvolvimento de um vórtice de fogo, contudo o número de ensaios sob as mesmas condições foi reduzido para conferir sustentação a determinadas conclusões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, M.E., Thomas, D.A. (2003). *Wildland fire behavior case studies and analyses: value, approaches, and practical uses*. Fire Management Today. 63(3): 4-7.
- Battaglia, F., Mcgrattan, K., Rehm, R., Baum, H. (2000). *Simulating fire whirls, Combustion Theory and Modelling*, 4:2, 123-138.
- Berl, W. G. (1963). *What basic fire research can learn from forest fires based on a lecture to Division of Forest Fires, Society of American Foresters Boston, Massachusetts*.
- Countryman, C. M. (1971) *Fire Whirls...Why, When, and Where*, USFS Pacific Southwest Research Station, Berkeley, Calif, USA.
- Emmons, H.W., Ying, S.J. (1967) The fire whirl, in Proceedings of the 11th International Symposium on Combustion, pp. 475– 488, Combustion Institute, Pittsburgh, Pa, USA..
- Forthofer J., Shannon, K., Butler, B. (2003). 4.2. *Investigating causes of large scale fire whirls using numerical simulation*, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Missoula, MT.
- Forthofer, J., Butler, B. (2010). *Large scale fire whirls: Can their formation be predicted?*, in Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conference, October 25-29, Spokane, Washington, USA.
- Forthofer, J.M., Goodrick, S.L. (2011). *Review of Vortices in Wildland Fire*. Journal of Combustion. 2011: 14 pp.
- Lei, J., Liu, N., Zhang, L., Denga, Z., Akafuah, N.K., Li, T., Saito, K., Satoh, k. (2012) *Burning rates of liquid fuels in fire whirls*, Combustion and Flame, 159 (6): 2014-2114..
- Lopes, A. (2014). *Misturas de Biomassa*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Martin, R. E., Pendleton, D.W., Burgess, W. (1976) *Effect of fire whirlwind formation on solid fuel burning rates*, Fire Technology, 12(1):, 33–40 pp.
- Meroney, R. N. (2003). *Fire whirls, fire tornados, and fire storms: physical and numerical modeling*. in Proceedings of International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena (PHYSMOD '03), Prato, Italy.
- Muraszew, A., Fedele, J.B., Kuby, W.C. (1979) *The fire whirl phenomenon*, Combustion and Flame, 34 : 29–45 pp.
- Pirsko, A. R., Sergius, L.M., Hickerson, C.W. (1965). *Causes and Behavior of a Tornadic Fire Whirlwind*, USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest & Range Experiment Station, Berkeley, Calif, USA.

- Rossa, C., Viegas, D.X., Ribeiro, L.M. (2011). *Incêndios Florestais*. Verlag Dashöfer. Lisboa.
- Schmitz, R. (2009). *Caracterização energética das espécies arbustivas representantes em Portugal*. UTAD, Vila Real, Portugal : 49.
- Seto, D. (2012). *"Observations and Analysis of Fire-Atmosphere Interactions during Fire Front Passage"* Master's Theses. Paper 4212.
- Soma, S., Saito, K. (1991). *Reconstruction of firewhirls using scale models*, Combustion and Flame. 86 (3) : 269–284.
- 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 : 737-745 pp.

ANEXO A

Tabela A.1 – Dados gerais do tratamento de dados de todos os ensaios

Referência Ensaio	Data	Hora	Temperatura ambiente (°C)	Humidade relativa (%)	Humidade combustivel (%)	Combustível	Cesto	m (g)	Configuração Ensaio	Duração Ensaio (s)	m _{perdida} (g)	m _{max} (g/s)	H _{máx} (m)	D _{máx} (m)	P _{max} (kW)
GV15	10/fev	13:23	10,9	66	18,2	Mato	B	4500	I/G1/M	230	3149,3	33,83	4,9	0,45	570,75
GV16	10/fev	13:49	10,9	66	18,2	Mato	A	4200	I/G1/M	370	4161,66	24,28	4,13	0,38	409,57
GV17	10/fev	14:13	10,9	66	18,2	Mato	E	4500	I/G1/M	180	4187,83	60,99	5,33	0,61	1028,9
GV18	10/fev	15h44	10,9	66	18,5	Feno	B	7300	I/G1/M	520	2791,21	11,48	-	-	381,31
GV19	10/fev	16:06	10,9	66	15,1	Caruma	B	4000	I/G1/M	300	3853,78	31,38	4,53	0,45	423,62
GV20	10/fev	16:23	10,9	66	18,5	Feno	B	1760	I/G1/M	260	1626,25	29,37	2,60	0,46	472,61
GV21	05/mar	12:37	14	67	18	Mato	C	4000	I/G1/M	250	3618,82	47,07	5,43	0,52	796,39
GV22 *	05/mar	12:54	14	67	18	Mato	C	4000	O/G1/M	110	2177,59	29,36	5,43	0,50	496,7
GV23	05/mar	13:14	14	67	18	Mato	E	4000	I/G1/PC	145	2919,86	53,92	6,13	0,59	912,38
GV24	05/mar	13:46	14	67	18	Mato	C	4000	I/G1/PC	240	3852,36	46,25	5,43	0,52	1037,8
GV25	05/mar	15:27	19	65	16	Mato	E	4000	O/G1/PC	210	3697,68	67,86	4,32	0,64	1180,3
GV26	05/mar	15:42	19	65	16	Mato	D	4000	I/G1/PC	210	3721,20	52,75	5,00	0,55	917,36
GV27	05/mar	16:02	19	65	16	Mato	D	4000	O/G1/PC	205	3323,04	50,74	4,65	0,53	882,3
GV28	05/mar	16h27	19	65	16	Mato	D	4000	I/G1/PC	170	3717,84	60,14	5,5	0,66	1045,9
GV29	05/mar	16h41	19	65	16	Mato	D	4000	O/G1/PC	200	3491,04	47,71	4,31	0,61	829,71
GV30	14/mar	17:07	19,9	45	14,4	Mato	C	4000	I/G2/PC	180	3968,42	69,16	4,70	0,55	1229,1
GV31	14/mar	17:27	19,9	45	14,4	Mato	F	4000	I/G1/PC	115	3639,71	85,60	4,58	0,66	1521,1
GV32	14/mar	17:44	19,9	45	14,4	Mato	F	4000	O/G1/PC	195	3732,16	102,04	4,13	0,69	1813,2
GV33	14/mar	18:16	19,9	45	14,4	Mato	C	4000	I/G3/PC	260	3596,20	55,13	4,56	0,61	979,6
GV34	27/mar	12:03	11,3	68	14,5	Mato	C	4000	I/G3/PC	250	3881,7	48,91	4,48	0,51	1014,7
GV35	27/mar	12:12	11,3	68	14,5	Mato	C	4000	I/G3/PC	210	3756,87	52,33	4,86	0,56	1085,7
GV36	27/mar	15:13	14	57	12,4	Mato	C	4000	I/G3/PC	255	3390,12	50,46	4,73	0,44	1050,6
GV37	27/mar	15:52	14	57	12,4	Mato	C	4000	I/G4/PC	230	3596,86	47,65	5,10	0,48	992,26

Legenda:

P_{med}	Potência média
P_{max}	Potência instantânea máxima
m_{perdida total}	Massa de combustível queimado
ṁ_{max}	Taxa de perda de massa máxima
L_{máx}	Altura de chama máxima
D máx	Diâmetro médio da chama máximo
I	Ensaio realizado no interior do túnel (In)
O	Ensaio realizado no exterior do túnel (Out)
G1	Túnel com corte lateral na chapa
G2	Túnel com corte lateral na chapa e uso de ventilador
G3	Túnel com corte lateral na chapa e medição de velocidade com tubo de Pitot
G4	Túnel com corte lateral na chapa e medição de velocidade com tubo de Pitot e todas as aberturas do túnel cobertas por folha de alumínio
M	Dados da perda de massa obtidos por máquina de filmar
PC	Dados da perda de massa obtidos diretamente no computador

Cesto	Altura (mm)	Diâmetro	m_{cesto}
A	760	350	3,21
B	760	500	4,16
C	760	500	4,04
D	1160	500	6,05
E	760	800	4,62
F	305	1120	2,67