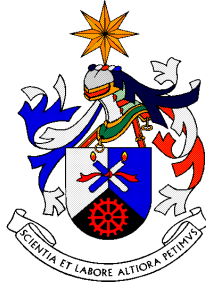


**Universidade da Beira Interior**



**Escoamento do ar em torno da Ilha do Pico  
e a operacionalidade do seu aeroporto**



**Rui Fernando da Costa Medeiros**

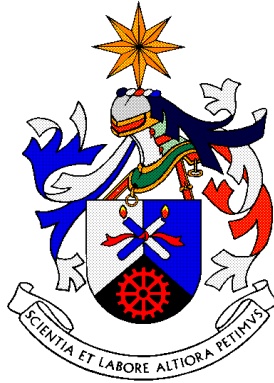
Dissertação para a obtenção do grau de mestre em

**Engenharia Aeronáutica**

Covilhã, Junho 2009



**Universidade da Beira Interior**



**Escoamento do ar em torno da Ilha do Pico  
e a operacionalidade do seu aeroporto**

**Rui Fernando da Costa Medeiros**

**Dissertação orientada por:**

Prof. Dr. Eng. Jorge Manuel Martins Barata

Prof. Dr. Eng. André Resende Rodrigues da Silva

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em

**Engenharia Aeronáutica**

Covilhã, Junho 2009

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Prof. Dr. Eng. Jorge Manuel Martins Barata pelo acolhimento da ideia e pelo acompanhamento deste estudo e Prof. Dr. Eng. André Resende Rodrigues da Silva por toda a ajuda prestada durante os trabalhos experimentais, pela motivação e por todo o tempo que despendeu para me apoiar na elaboração desta dissertação.

Quero agradecer ao Sr. Rui Manuel Tomé Paulo pela imprescindível ajuda na construção do modelo da ilha do Pico e pelo apoio durante a fase experimental.

Agradeço ao Sr. Ricardo Dias, técnico de meteorologia do aeroporto do Pico pelo tempo dispensado, pelas informações e ponto de vista de quem conhece bem o tempo no local em estudo.

Agradeço ao Eng. José Riscado pela ajuda com o software ArcView.

Não posso deixar de salientar o papel da minha família que me deu apoio incondicional durante toda a minha formação que me permite estar agora aqui a escrever este texto, para todos eles fica o meu obrigado. Ainda um obrigado especial ao meu irmão, Duarte Medeiros, que também ajudou durante a fase experimental e à minha Mãe que reviu o texto final.

Agradeço ainda aos meus colegas Joel Fonseca, Luís Paulo e Pedro Meireles com os quais partilhei recursos da universidade, tendo sido muito importante a sua colaboração e compreensão durante a fase experimental do estudo bem como o apoio que prestaram ao longo do ano.

Agradeço ainda aos meus amigos João Resendes pelo acesso aos METAR do aeroporto do Pico, José Melo pelo apoio e cedência da foto da capa e ao Valter Medeiros pela informação geográfica da ilha do Pico.

# Índice

Agradecimentos .....	i
Abstract .....	iv
Índice de figuras .....	v
Índice de gráficos.....	vi
Glossário .....	vii
1. Introdução.....	1
1.1. Caracterização geral da Ilha do Pico .....	1
1.2. Aeroporto do Pico.....	2
1.3. Motivação .....	3
1.4. Escoamentos em torno de terreno montanhoso .....	5
1.4.1. Estabilidade atmosférica.....	7
1.4.2. Distúrbios atmosféricos em regiões montanhosas .....	10
1.4.2.1. Ondas de montanha de propagação vertical .....	10
1.4.2.2. Ondas de montanha presas a jusante.....	11
1.5. Previsão de escoamentos em terreno montanhoso.....	14
1.5.1. Modelos numéricos .....	14
1.5.2. Camada limite atmosférica e simulações em túneis de vento.....	16
1.6. Casos de estudo .....	18
1.6.1. Værnes.....	18
1.6.2. Juneau.....	19
1.6.3. Nice .....	20
1.6.4. Innsbruck.....	20
1.6.5. Malvinas .....	21
1.7. O caso Colorado Springs .....	21
1.7.1. Descrição do equipamento e técnicas de obtenção de dados .....	22
1.7.2. Fenómenos identificados .....	24
1.8. Sumário.....	27

2. Metodologia.....	28
2.1. Análise dos relatórios METAR.....	29
2.2. Construção de um modelo da Ilha do Pico.....	30
2.3. Simulação em túnel de vento .....	31
3. Resultados .....	33
3.1. Introdução .....	33
3.2. Análise dos METAR de 2007 do Pico e Horta.....	33
3.2.1. Variações na direcção do vento .....	34
3.2.2. Variações na intensidade do vento .....	43
3.3. Análise de METAR's específicos .....	44
3.4. Indicações visuais de fenómenos turbulentos no Pico.....	49
3.5. Simulação em túnel de vento .....	55
3.6. Sumário.....	67
4. Conclusões.....	68
5. Bibliografia.....	72

## **Abstract**

This dissertation studies the airflow around Pico Island in the Azores and the problems it represents to the operation of aircraft at the island airport.

The objective is to gain some knowledge about the characteristics of the local flow in order to identify problematic areas that could be avoided allowing operations in weather conditions that are currently off limits due to the lack of information on phenomena related to the influence of mountains terrain in the flow.

To do this, a statistical study of the wind data collected at Pico and Faial Island was carried out to find discrepancies that can be attributed to the influence that Pico Mountain has in the flow. Then, a wind tunnel visualization of the flow around the Island was conducted, the results were compared to the data collected before and to visual clues of the flow observed at the Island, in order to identify some of the characteristics of the flow, most of them known to be common in mountainous areas, under different wind directions at the airport site.

With this data, some assumptions of the best runway to use and where the most problematic phenomena should be encountered in the approach areas were made.

## Índice de figuras

Figura 1 Localização da ilha do Pico .....	1
Figura 2 Localização do aeroporto do Pico.....	3
Figura 3 Limites de vento recomendados no Pico .....	4
Figura 4 Ondas de gravidade.....	8
Figura 5 Ondas de Kelvin-Helmholtz .....	9
Figura 6 Ondas de montanha de propagação vertical com quebra .....	11
Figura 7 Ondas de montanha presas a jusante e nuvens associadas .....	12
Figura 8 Rotor e tempestade de vento pela encosta .....	13
Figura 9 Aeroporto do Pico, foto virada a Su-sudeste com vento Sudoeste.....	50
Figura 10 Chapéu com esteira, foto virada a Su-sudeste com vento Sudoeste.....	51
Figura 11 Lenticulares, foto virada a Este tirada na cabeceira da pista 27.....	52
Figura 12 Imagem de satélite com lenticulares a marcar ondas de montanha.....	53
Figura 13 Vista aérea do aeroporto, foto virada a Sudeste com vento Sudeste .....	53
Figura 14 Espuma levantada pelo vento, foto virada a Noroeste com vento Sudeste.....	54
Figura 15 Vento Sul, plano do fumo a cerca de 2,5 km Oeste do aeroporto.....	57
Figura 16 Vento Sul, plano de fumo sobre o aeroporto .....	57
Figura 17 Vento sul, plano de fumo a cerca de 2,5 km Este do aeroporto.....	58
Figura 18 Vento Sul, plano de fumo a cerca de 5 km Este do aeroporto .....	58
Figura 19 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 2,5 km a Oeste do aeroporto.....	59
Figura 20 Vento Sudoeste, plano de fumo sobre o aeroporto.....	60
Figura 21 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 2,5 km a Este do aeroporto.....	60
Figura 22 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 5 km a Este do aeroporto.....	61
Figura 23 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 7,5 km a Este do aeroporto.....	62
Figura 24 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 10 km a Este do aeroporto.....	62
Figura 25 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 7,5km a Oeste do aeroporto.....	63
Figura 26 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 5km a Oeste do aeroporto .....	63
Figura 27 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 2,5km a Oeste do aeroporto.....	64
Figura 28 Vento Sudeste, plano de fumo sobre o aeroporto .....	64
Figura 29 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 2,5km a Este do aeroporto.....	65
Figura 30 Vento Sul, plano de fumo horizontal .....	66
Figura 31 Vento Sudoeste, plano de fumo horizontal.....	66
Figura 32 Vento Sudeste, plano de fumo horizontal.....	67

## Índice de gráficos

Gráfico 1 Predominância dos ventos no Pico.....	33
Gráfico 2 Distribuição do vento no Pico com vento de 10, 20 e 30 graus na Horta.....	35
Gráfico 3 Distribuição do vento no Pico com vento de 40, 50 e 60 graus na Horta.....	36
Gráfico 4 Distribuição do vento no Pico com vento de 70 e 80 graus na Horta.....	37
Gráfico 5 Distribuição do vento no Pico com vento de 90, 100 e 110 graus na Horta .....	38
Gráfico 6 Distribuição do vento no Pico com vento de 120 e 130 graus na Horta.....	38
Gráfico 7 Distribuição do vento no Pico com vento de 140, 150 e 160 graus na Horta .....	39
Gráfico 8 Distribuição do vento no Pico com vento de 170, 180 e 190 graus na Horta .....	40
Gráfico 9 Distribuição do vento no Pico com vento de 200, 210 e 220 graus na Horta .....	40
Gráfico 10 Distribuição do vento no Pico com vento de 230, 240, 250, 260 e 270 graus na Horta .	41
Gráfico 11 Distribuição do vento no Pico com vento de 280, 290 e 300 graus na Horta .....	42
Gráfico 12 Distribuição do vento no Pico com vento de 310, 320, 330, 340, 350 e 360 na Horta...	42
Gráfico 13 Relação entre a intensidade dos ventos no Pico e Faial.....	44
Gráfico 14 Dados de calibração do túnel de vento .....	55
Gráfico 15 Perfis da camada limite.....	56

## **Glossário**

ATP – Avião regional de 64 lugares

BKN – Broken, camada de nuvens a cobrir de 5/8 a 7/8 do céu

CAT – Clear Air Turbulence, turbulência em ar limpo

Doppler – Radar meteorológico que usa o efeito doppler para visualizar fenómenos meteorológicos

FEW – Camada de nuvens a cobrir de 1/8 a 2/8 do céu

IFR – Instrument Flight Rules, regras de voo por instrumentos

ILS – Instrument Landing System, sistema de ajuda rádio à aproximação de precisão

I.M. – Instituto de Meteorologia

Jet stream – Correntes de vento forte na zona da tropopausa

KT – Knots, medida de intensidade do vento, nós

LPHR – Código ICAO para o aeroporto da Horta

LPPI – Código ICAO para o aeroporto do Pico

METAR – Meteorological Aerodrome Report, relatório das condições meteorológicas de aeródromo

Microbursts – rajadas de vento descendente altamente localizadas provenientes de nuvens de tempestade

PIREPS – Pilots Reports, relatórios de ocorrências anormais em voo submetidos por pilotos

SATA – Serviço Açoreano de Transportes Aéreos

SCT – Scattered, camada de nuvens a cobrir de 3/8 a 4/8 do céu

VFR – Visual Flight Rules, regras de voo visual

Wind Shear – Variações bruscas na direcção e/ou intensidade do vento no tempo e no espaço

# 1. Introdução

## 1.1. Caracterização geral da Ilha do Pico

A ilha do Pico faz parte do arquipélago dos Açores, um grupo de 9 ilhas situadas no Atlântico Norte. Estas ilhas estão ainda divididas em 3 grupos de ilhas mais próximas, fazendo o Pico parte do grupo central onde se incluem para além desta o Faial, S. Jorge, Graciosa e Terceira. A ilha do Pico goza de uma grande proximidade com o Faial, que se encontra a oeste separada por um canal de apenas 6 km de largura. A Norte está a ilha de S. Jorge, a uma distância aproximada de 18 km (figura 1).



**Figura 1 Localização da ilha do Pico**

A ilha do Pico ocupa uma área planificada de 446,4 km<sup>2</sup>, com um comprimento máximo de 46,35 km e um perímetro de cerca de 119 km. A ilha é dominada pela montanha, que lhe dá o nome, com 2351 metros de altura, que é a principal restrição à implementação de procedimentos de voo por instrumentos na zona. Além da montanha do Pico, existem outras elevações na parte oriental da ilha que ultrapassam os 1000 metros de altura.

O povoamento do Pico iniciou-se em 1460 e é actualmente habitada por quase 15 mil pessoas, segundo os censos de 2001. Administrativamente a ilha divide-se em três concelhos; Madalena, S. Roque e Lajes.

Em termos genéricos o clima da ilha do Pico é temperado oceânico, caracterizando-se por temperaturas amenas com pequenas amplitudes térmicas anuais, precipitação regular ao longo de todo o ano, elevada humidade relativa do ar, céu geralmente nublado e ventos fortes frequentes.

Os ventos predominantes na ilha são os do quadrante sudoeste, embora nos meses de Outubro a Dezembro sejam mais comuns os ventos do quadrante sul e nos meses de Maio e Julho haja uma predominância de ventos do quadrante nordeste. Os dados disponibilizados pelo instituto nacional de meteorologia e geofísica, recolhidos entre 1983 e 1993 no aeroporto do Pico, mostram que as velocidades médias mensais variam entre 11,4 km/h em Julho e 20,9 km/h em Janeiro. Os valores mais elevados de velocidades médias são atingidos com ventos do quadrante sudoeste, com 28,3 km/h em Dezembro e 27,4 km/h em Fevereiro e com ventos do quadrante noroeste em Janeiro, atingindo os 27,3 km/h [Nunes, 1999].

## **1.2. Aeroporto do Pico**

Os primeiros estudos para a construção de uma pista de aviação no Pico remontam a 1946, mas, por questões políticas, a pista que se destinava a servir o então distrito da Horta, foi construída no Faial. Assim, só a 5 de Maio de 1976 é que se iniciaram as obras de construção da pista do Pico, inicialmente por iniciativa do exército, mas a obras acabaram por ser concluídas sobre a alçada do Governo Regional dos Açores. A pista foi inaugurada a 25 de Abril de 1982, na altura com apenas 1200 metros. Esta infra-estrutura foi construída num local em que a morfologia do terreno envolvente só permite uma orientação da pista sensivelmente Este/Oeste, o que faz com que seja penalizada com ventos do quadrante Sul, que é por sinal um vento dominante, o que levanta algumas questões sobre a escolha do local inicial.

Em 1990, aquando da chegada dos novos aviões ATP para a frota da SATA, foi considerada necessária a ampliação da pista, com vista a uma melhor operacionalidade deste tipo de avião. Concluídas as obras, a pista fica com 1520 metros de comprimento por 30 de largura.

Doze anos mais tarde aumentou-se mais uma vez a pista com o intuito de possibilitar a operação de aviões de médio curso. Esta ampliação não se ficou só pela pista, tendo todo o aeroporto sido alvo de intervenção com vista à sua requalificação. Assim, o Pico ficou dotado de uma pista com um comprimento máximo utilizável de 1745 metros, uma nova aerogare, placa de estacionamento, torre de controlo, serviço de socorro e combate a incêndios e um novo armazém de carga.

Em Abril de 2005 o Pico recebe pela primeira vez um voo directo de Lisboa.

O aeroporto do Pico fica situado a 8 km da vila da Madalena a uma altitude de 34 metros. É gerido pela SATA Gestão de Aeródromos e possui uma pista com orientação 09/27 com 1745 metros de comprimento por 45 de largura. A pista tem iluminação e pode ser utilizada para voos

nocturnos. São aceites voos VFR e IFR, sendo que a aproximação por instrumentos é baseada no locator PI. Actualmente já foi adjudicada a instalação de um sistema ILS.

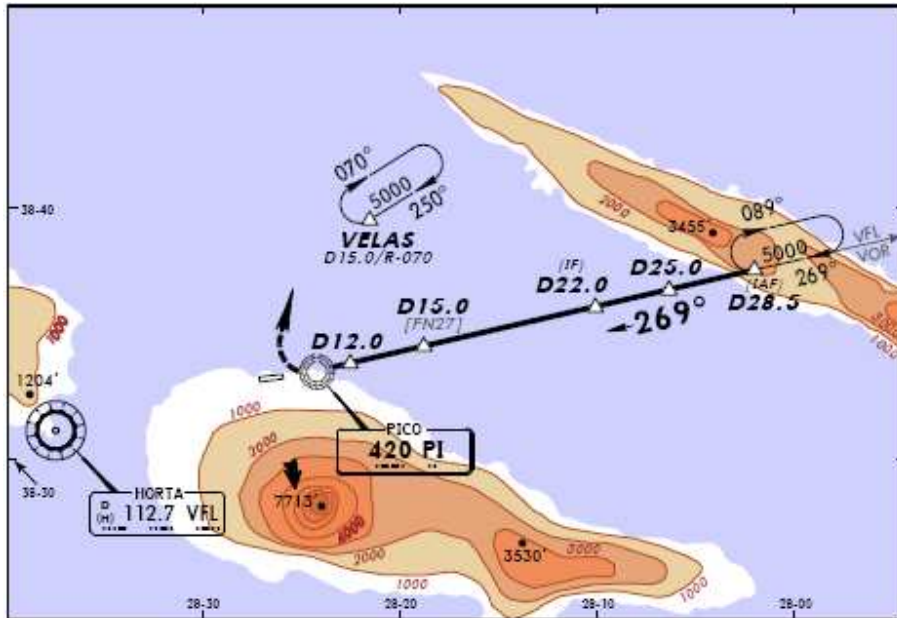


Figura 2 Localização do aeroporto do Pico

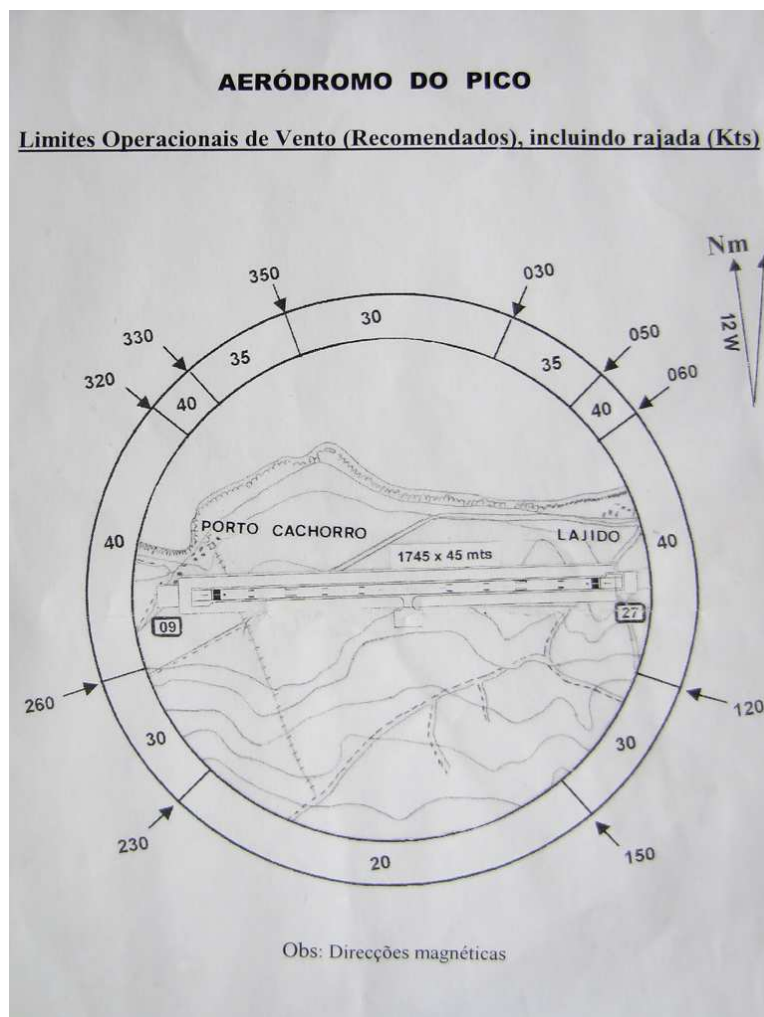
O aeroporto tem ligações regulares com Lisboa através da TAP Portugal e com a Terceira e S. Miguel pela SATA Air Açores e movimentou cerca de 58 mil passageiros em 2008.

### 1.3. Motivação

O aeroporto do Pico está implantado nas imediações de terreno montanhoso e como tal fica sujeito a fenómenos de turbulência, provocados pela influência do terreno no escoamento de ar. Estes fenómenos são particularmente significativos para a operação de aeronaves quando o vento sopra do quadrante Sul, uma vez que esta estrutura se encontra na costa norte da ilha.

Fenómenos de turbulência, devido a orografia, são comuns na maior parte das ilhas Açorianas, uma vez que o relevo montanhoso não deixa muitos locais apropriados para a construção deste tipo de infra-estrutura. Aeroportos como S. Jorge e Flores são exemplos de localizações rodeadas por elevações próximas, que implicam restrições operacionais quando o vento sopra de cima da ilha. No caso do Pico, o terreno não é tão acidentado próximo do aeroporto, mas em compensação, a montanha é maior e os efeitos que se geram no escoamento, devido à sua presença, têm um impacto significativo na operação. Actualmente existem limites operacionais de vento recomendados. No entanto, estes limites carecem de um estudo apropriado, tendo sido introduzidos

pela SATA, com referência à sua experiência nesta ilha. Na prática, têm-se verificado que os limites podem ser demasiado brandos ou demasiado conservativos dependendo da situação de cada dia.



**Figura 3 Limites de vento recomendados no Pico**

Assim, será de interesse estudar o escoamento de ar em torno da montanha, de forma a se conhecer melhor o que se passa na zona do aeroporto e suas aproximações com as mais variadas condições meteorológicas, de modo a ser possível rever limites recomendados à operação ou, pelo menos, aumentar a informação disponível às tripulações sobre as condições que podem encontrar com determinados ventos no sentido de facilitar a decisão de cancelar ou não um voo, uma vez que os limites actuais não têm um carácter obrigatório, possivelmente devido à falta de informação que os suporte. O conhecimento do escoamento nas zonas de aproximação pode possibilitar ainda a criação de procedimentos de chegada e partida que permitam evitar as zonas onde será previsível

encontrar-se as piores condições e desta forma podemos contribuir para um melhoramento na operacionalidade deste aeroporto. Na pior das hipóteses, o conhecimento das áreas a evitar em dias ventosos, será pelo menos uma mais-valia para as tripulações que podem escolher trajetórias menos afectadas, garantido uma aproximação mais estável, benéfica para uma aterragem no ponto certo e para a tranquilidade dos passageiros. Este conhecimento é importante, em especial para operadores que não voem para o Pico regularmente, uma vez que a falta de experiência no Pico pode ser compensada pelo planeamento prévio e a noção do que podem vir a encontrar, melhorando as possibilidades de uma operação sem percalços.

#### **1.4. Escoamentos em torno de terreno montanhoso**

Desde há muito que se sabe que o escoamento de ar sobre terreno montanhoso é mais perturbado que sobre planícies. No passado, as informações sobre este assunto eram escassas e normalmente limitavam-se a dizer que as perturbações no escoamento acima de uma determinada montanha se estendiam a altitudes até três vezes a altura da mesma.

Podia-se pensar que o efeito de uma cadeia montanhosa no escoamento seria a mudança na extensão, escala e intensidade da turbulência experimentada por aeronaves voando por cima, mas a turbulência é essencialmente um tipo de escoamento desorganizado, enquanto o escoamento por cima de terreno montanhoso pode ser deformado de uma forma totalmente organizada, que é bastante significativa, mas não necessariamente turbulenta [Corby, 1954].

O voo na vizinhança de terreno montanhoso pode ser inspirador e muito apreciado por pilotos e passageiros. Por outro lado, o voo nas proximidades de montanhas pode revelar-se uma das situações mais perigosas na operação de aeronaves. A degradação da performance das aeronaves devido às baixas densidades do ar, problemas de navegação associados com obstruções de terreno em rota e padrões de meteorologia que podem mudar de um momento para o outro, podem causar dificuldades a pilotos de aeronaves mais pequenas operando a baixas altitude, bem como às tripulações de aviões de alta performance, que têm de lidar com turbulência a grande altitude, para além da redução de performance.

Todos os pilotos que voam em zonas de terreno montanhoso têm que estar cientes do potencial para fenómenos de vento severos induzidos pelo terreno, particularmente durante a descolagem e aterragem.

A atmosfera é um fluido em movimento. Tal como a água que corre num ribeiro forma ondas e turbilhões enquanto passa por obstáculos, também a atmosfera contém perturbações que se

desenvolvem devido à sua interação com o terreno. Estes turbilhões podem variar em tamanho, desde alguns centímetros a dezenas de quilómetros e tanto podem criar condições de voo relativamente calmas como turbulência de intensidade potencialmente destrutiva. Os escoamentos induzidos por montanhas, frequentemente são acompanhados por indicadores visuais, como nuvens lenticulares, nuvens de rotores ou poeira soprada pelo vento, mas não é sempre assim e eventos extremos podem ocorrer com pouco ou nenhum indicador visual da sua presença.

É evidente, pelas estatísticas de acidentes e incidentes associados com turbulência severa na área de montanhas, que estes fenómenos não estão limitados a uma localização, altitude de operação, uma altura particular do ano ou um tipo específico de aeronave. Em muitos casos, outras aeronaves operando perto de onde se deram acidentes, apenas encontraram turbulência fraca, o que sugere que os fenómenos de vento severo podem ser altamente localizados, extremamente violentos e breves. Tal como já foi demonstrado para o caso dos acidentes causados por *microbursts*, problemas associados aos mais severos ventos orográficos podem bem ser um caso de se estar no local errado à hora errada. Assim, são necessários meios de detecção da presença destes fenómenos, estratégias para que se evitem encontros com eles e, caso o encontro não possa ser evitado, estratégias para que se obtenha a performance máxima das máquinas.

Turbulência e vento orográfico afectam todos os tipos de operações de aeronaves. Este tipo de turbulência pode ser caracterizado por aparecer de forma inesperada e brusca, podendo mesmo causar danos estruturais ou mesmo a falha da estrutura. Por exemplo, durante o Inverno de 1992 perto de Denver no Colorado, turbulência associada a ondas de montanha causaram a separação de um motor de um DC-8, que perdeu também a ponta de uma das suas asas. Danos estruturais não são o único perigo associado a encontros com turbulência a grande altitude. É possível operar aviões de turbina próximo do seu limite de performance, de tal forma que, a velocidade de cruzeiro é apenas alguns nós mais lenta que o limite máximo da aeronave e alguns nós mais rápida que a velocidade de perda. Nesta situação, o encontro com turbulência moderada pode ser o suficiente para colocar em perigo o controlo da aeronave, devido a problemas aerodinâmicos relacionados com exceder o número de Mach máximo da aeronave ou pela entrada em perda. [FAA Circular AC-00-57]

Preocupações na fase de descolagem e aterragem em zonas montanhosas incluem a entrada em massas de ar turbulentas sem uma margem adequada de velocidade em relação à entrada em perda, perda do controle direccional na pista ou nas suas proximidades, encontro de momentos de rolamento que excedam a autoridade de comando nesse eixo e correntes descendentes que excedam a capacidade de subida da aeronave. É importante notar que rajadas localizadas em excesso de 50 nós com correntes descendentes que ultrapassam os 1500 pés por minuto não são eventos raros. Um

exemplo destas condições, é um caso de 1993, em que um Boeing 747 perdeu um motor logo após a descolagem de Anchorage no Alasca. Vórtices criados pela interação de ventos fortes com terreno montanhoso podem levar a forte turbulência e momentos de rolamento que excedem a capacidade de manter o controle por um piloto. Existem evidências de que vórtices em movimento a jusante de montanhas aumentam as probabilidades de perda de controle.

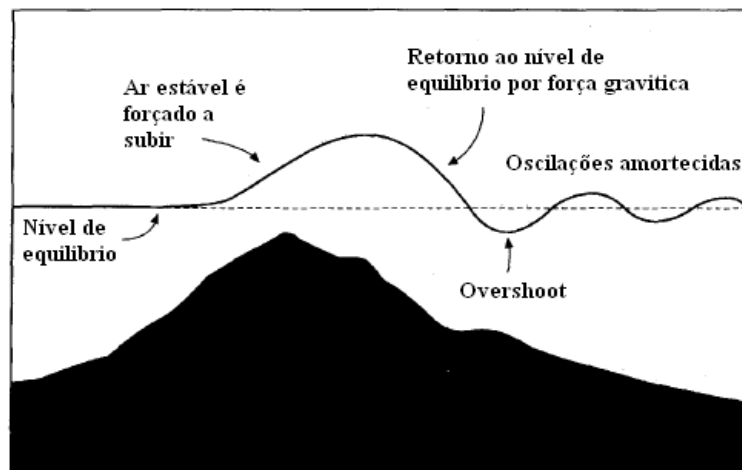
Aeronaves que conduzam voos a baixa altitude sobre terreno montanhoso na presença de ventos fortes, 20 ou mais nós no topo das elevações, podem esperar encontrar turbulência moderada ou mais forte, fortes correntes ascendentes e descendentes, rotores intensos e zonas com contrastes de vento. A literatura sobre voo de montanha refere os 20 nós como critério para classificar o vento como forte. Este critério refere-se à larga escala dos ventos no topo das montanhas, ou seja, aos ventos predominantes na área e não a rajadas locais, a montante da posição das mesmas. Este tipo de escoamento perpendicular a uma cadeia montanhosa leva a um vento à superfície substancialmente mais forte, com grande probabilidade de turbulência. De uma forma similar, pode-se antecipar um aumento na intensidade do vento perto das encostas de picos isolados.

Como já se referiu, o ar é um fluido e, como tal, o seu movimento é aproximado por relações matemáticas conhecidas que descrevem o movimento dos fluidos. Muitas perturbações na atmosfera ocorrem de forma periódica, isto é, são ondas com características que podem ser medidas tais como o seu comprimento de onda ou a sua amplitude. As perturbações nestas ondas são resultado da interação com várias forças como gradientes de pressão, a força de Coriolis, a gravidade e a fricção. Ondas atmosféricas de grande escala, na ordem das 1000 milhas náuticas, exibem principalmente um movimento horizontal. Movimentos verticais neste tipo de ondas têm uma magnitude muito mais pequena que o movimento horizontal. Mas existem outras ondas atmosféricas de menor escala, onde a razão entre o movimento vertical e o horizontal é muito maior. As mais importantes ondas que exibem este comportamento são as ondas de gravidade, que têm este nome uma vez que a força restauradora é a gravidade e ondas induzidas por tensões de corte ou ondas de Kelvin-Helmholtz. Um exemplo familiar de ondas de gravidade são as ondas dos oceanos. As ondas atmosféricas também são muito comuns, mas são geralmente invisíveis a não ser que haja nuvens que as denunciem.

#### **1.4.1. Estabilidade atmosférica**

Estabilidade atmosférica descreve a distribuição vertical da densidade do ar sobre uma determinada localização num determinado instante de tempo. Se ar relativamente denso estiver por cima de uma camada menos densa, existirá uma tendência para que esta situação se inverta e dá-se

uma mistura até que se crie uma situação mais estável. Em geral, quanto mais rápido a atmosfera arrefecer com a altitude, mais instável fica, mas se pelo contrário, aquecer com a altitude, é bastante estável e resistente a movimentos verticais. A estabilidade da atmosfera está relacionada com o deslocamento vertical de parcelas de ar. Parcelas de ar não saturado que se movem verticalmente são arrefecidas por expansão, se estão a subir e aquecidas por compressão, se estão a descer a uma taxa fixa que ronda 1 grau Celsius por cada 100 metros. Para que se desenvolvam ondas de gravidade, a atmosfera tem de ter algum grau de estabilidade estática, uma vez que numa atmosfera instável, uma parcela de ar que sofra um deslocamento vertical, por exemplo uma parcela de ar instável que é forçada a subir na interação com uma montanha, vai continuar a subir ao invés de ser forçada a voltar ao seu nível original. Uma atmosfera estável tem tendência a suprimir os movimentos verticais porque esta estabilidade controla os movimentos resultantes de uma deflexão vertical da atmosfera devido a terreno.

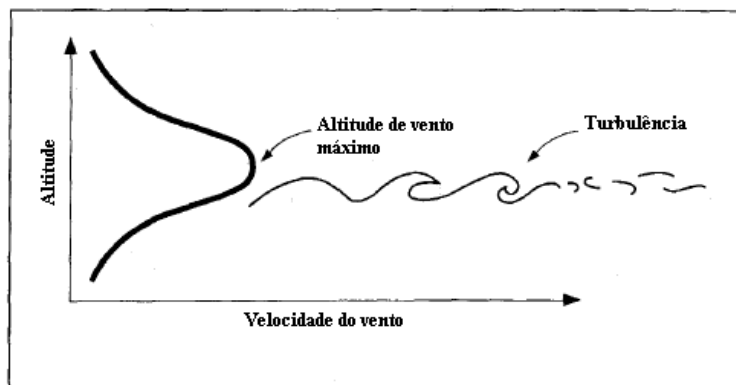


**Figura 4 Ondas de gravidade**

À medida que ar estável é obrigado a movimentar-se verticalmente devido à presença de um obstáculo, este resiste a esse deslocamento porque quando sobe fica mais pesado que o ar em seu redor e a gravidade puxa o ar de volta ao seu nível de equilíbrio. Assim, o ar que é defletido por terreno, começa a voltar para o seu nível original logo que passa o ponto mais alto da obstrução. Depois a sua inércia vai fazer com que acabe por descer abaixo do seu nível original, aquecendo por compressão, ficando desta forma menos denso que o ar em redor e, como resultado, volta a subir para a sua altitude de equilíbrio, voltando a passar por ela de novo e continua a oscilar em torno desse nível até que este movimento ondulatório seja totalmente amortecido, como se pode ver na

figura 4. As propriedades destas ondas são mensuráveis, mas vão depender de vários factores como a temperatura, o tamanho, a forma da montanha e a direcção do vento.

Quando a diferença na velocidade do vento a várias altitudes é muito grande, há a possibilidade de se gerarem outro tipo de ondas, a que se dá o nome de ondas de Kelvin-Helmholtz. Estas podem ocorrer quando a energia cinética inerente às tensões de corte ultrapassam os efeitos de amortecimento de uma atmosfera estável. Se a magnitude das diferenças de vento nas várias camadas da atmosfera exceder um valor crítico, vão ocorrer ondulações espontâneas na zona de interacção destes ventos, resultando em ondas de Kelvin-Helmholtz. A amplitude da onda resultante cresce com a energia cinética do campo de vento adjacente até que quebra, tal como uma onda de mar, criando turbulência. Esta turbulência pode afectar aeronaves de várias formas. Ondas destas são bastante comuns na atmosfera, podem formar-se na vizinhança de nuvens de trovoadas, em camadas de corte perto das *jet stream* e associadas com zonas estáveis com camadas de forte contraste de vento por cima. A instabilidade associada a ondas de Kelvin-Helmholtz, em condições de forte *wind shear* em altitude, é a principal causa da turbulência fora de zonas montanhosas a grande altitude, conhecida por CAT, *clear air turbulence*.



**Figura 5 Ondas de Kelvin-Helmholtz**

Deve-se notar que, os dois tipos de onda de que se falou anteriormente podem ser bastante poderosas em termos de movimento vertical com a onda, mas sem que exista turbulência na mesma. Nestes casos, correntes descendentes e ascendentes podem ser fortes o suficiente para provocar significantes desvios de altitude em aeronaves que as encontrem. Na verdade, pequenas aeronaves podem nem ter potência necessária para conseguir subir dentro de umas destas correntes descendentes, sem que exista qualquer turbulência. De qualquer modo o ar pode ser extremamente turbulento nas zonas de corte e rotação por baixo das ondas, ou quando estas acabam por quebrar.

## **1.4.2. Distúrbios atmosféricos em regiões montanhosas**

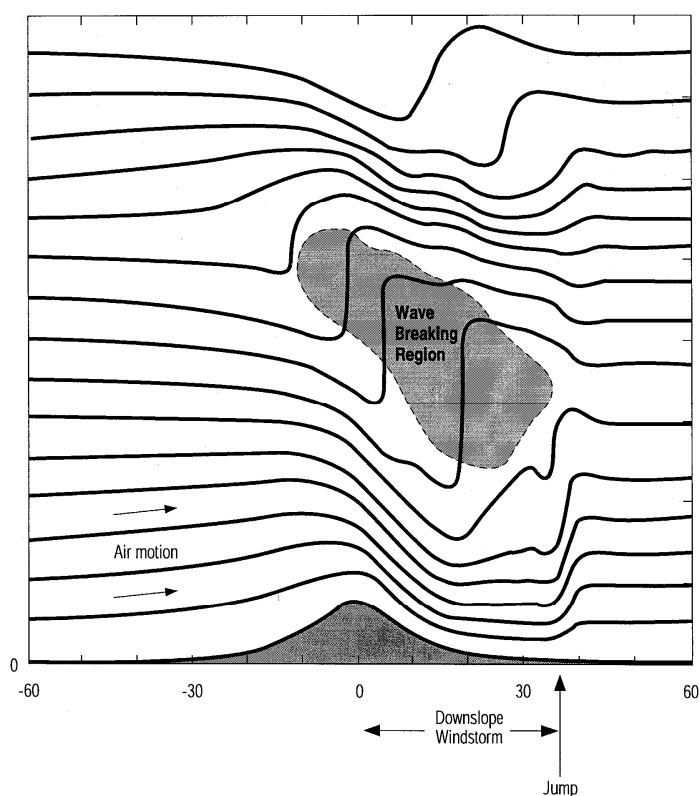
Quando a atmosfera encontra uma barreira montanhosa a resposta pode ser variada. Se o vento é fraco ou a massa de ar excepcionalmente densa, as montanhas podem funcionar como uma barragem, prevenindo o movimento do ar sobre a barreira. Mais frequentemente, ventos fortes fluem à volta e por cima das montanhas. Se a atmosfera está instável, o movimento vertical do ar vai levar à formação de nuvens de tempestade, desde que exista suficiente humidade no ar, ou pelo menos à formação de nuvens convectivas. Se a atmosfera estiver estável e os ventos forem suficientemente fortes, vamos ter a formação de ondas como já foi descrito. A onda que resulta deste deslocamento vertical da massa de ar estável, ao passar sobre uma montanha, geralmente toma uma de duas formas: ondas de montanha de propagação vertical ou ondas de montanha presas a jusante da montanha. Os dois tipos podem envolver perigos para as operações de aeronaves. O tipo particular de onda ou combinação de ondas depende do terreno e das propriedades atmosféricas a montante do mesmo. É possível que os dois tipos de onda existam ao mesmo tempo ou que uma forma híbrida se forme.

### **1.4.2.1. Ondas de montanha de propagação vertical**

As ondas de montanha de propagação vertical são essencialmente uma onda gravítica estacionária cuja energia se propaga verticalmente. Para este tipo de onda, nada previne a propagação vertical, como aconteceria na presença de *wind shear* ou camadas atmosféricas estáveis. O potencial de perigos para aeronaves é função da intensidade da onda e se quebra ou não em turbulência, que em casos extremos, pode provocar danos estruturais. Com este tipo de onda, ar que se move perpendicularmente à barreira é defletido para cima e acelera ao passar pelo topo e pelas encostas a jusante. A propagação vertical desta onda quer dizer que os efeitos do terreno podem ser notados a altitudes significativamente acima dos topos das montanhas que os provocam. Na verdade, a amplitude destas ondas cresce com a altitude na ausência de fenómenos que o impeçam. Esta amplificação é consequência da redução da densidade do ar com a altitude.

De qualquer forma, o principal motivo de preocupação para pilotos é se a onda quebrar. Olhando para as linhas de corrente da figura 6, podemos ver que acima da elevação há uma região de correntes ascendentes. Com uma onda de amplitude modesta, uma aeronave atravessando esta zona encontraria flutuações de altitude e/ou velocidade mas pouca ou nenhuma turbulência. Com suficiente amplitude, como é o caso da imagem, a onda quebra em correntes descendentes e ascendentes localizadas. Isto traz a possibilidade da ocorrência de turbulência severa e brusca. Este tipo de turbulência é comum entre os 6000 e os 12000 metros.

Por vezes, acompanhando estes fenómenos em altitude, ocorrem ventos de superfície muito fortes que resultam da quebra da onda. Neste caso, fortes ventos descem as encostas a jusante do escoamento, chegando a atingir 100 nós. Além disso, estes ventos muitas vezes terminam num “salto” a alguma distância da montanha. Esta zona é frequentemente turbulenta até altitudes de 3000 metros e é por vezes marcada por uma linha de nuvens de rotores, exibindo um movimento altamente turbulento. A jusante do salto, a turbulência vai diminuindo, mas ainda pode ser significativa.



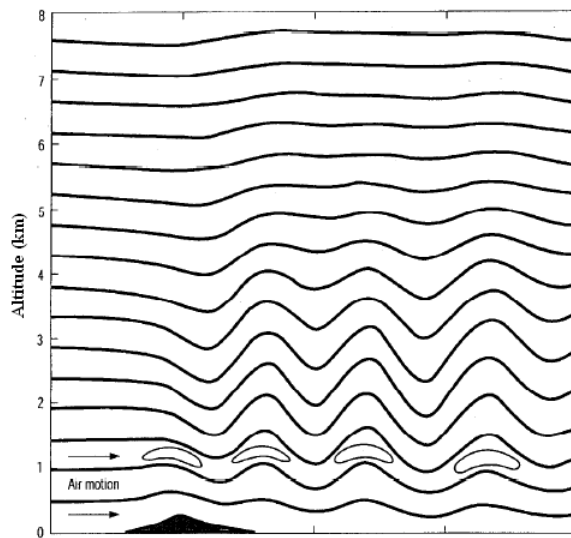
**Figura 6 Ondas de montanha de propagação vertical com quebra**

#### **1.4.2.2. Ondas de montanha presas a jusante**

As ondas de montanha presas a jusante (trapped lee waves) manifestam-se muitas vezes por sucessivas linhas de nuvens lenticulares estacionárias, estendendo-se por grandes distâncias. Estas nuvens podem parecer turbulentas ou suaves e dependendo da humidade do ar e da sua estratificação, podem apresentar várias camadas. Estas ondas podem ser fonte de preocupação durante a descolagem e aterragem, bem como durante o voo abaixo de 7500 metros. O seu nome

deve-se ao facto de a sua energia estar confinada abaixo de uma determinada altitude. O mecanismo que provoca esta restrição é um contraste de vento forte acima do topo da montanha. Estas ondas são mais comuns quando o vento atravessa terreno montanhoso relativamente estreito com a presença de uma camada perto do topo das montanhas que tenha o vento a aumentar com a altitude e seja estável, e outra camada por cima com baixa estabilidade e um intenso escoamento.

Na figura 7 podemos ver uma representação destas ondas. De notar que se estendem para jusante da montanha, mas não se desenvolvem em altitude e não têm uma rotação das linhas de corrente para montante, em contraste com as ondas de propagação vertical.

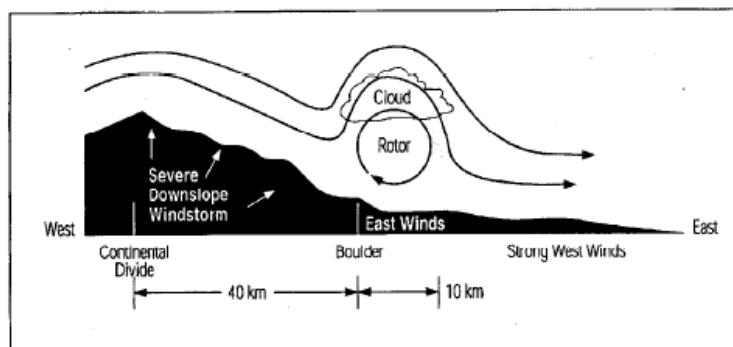


**Figura 7 Ondas de montanha presas a jusante e nuvens associadas**

A turbulência associada a ondas de montanha presas a jusante é normalmente menos perigosa que a que aparece com as ondas de propagação vertical, de qualquer modo, pode existir turbulência forte a baixa altitude criada pelas primeiras. Por baixo de nuvens lenticulares, o vento pode ser bastante variável e apresentar-se com rajadas. Estes fenómenos podem estender-se desde a superfície até à base das nuvens. A base das nuvens associadas a estas ondas estão tipicamente a algumas centenas de metros acima do topo das montanhas e, relatórios de pilotos, indicam a presença de turbulência moderada a severa por baixo das nuvens. Esta turbulência está relacionada com contrastes verticais e horizontais de vento abaixo das nuvens. Com este tipo de ondas é frequente haver uma camada de corte forte, perto da base das nuvens, imediatamente após o topo das montanhas. Isto separa uma zona de esteira turbulenta abaixo do topo das montanhas do ar que se move mais depressa acima e onde se formam as nuvens lenticulares. Na própria camada da nuvem, as condições costumam variar de turbulentas, perto da base da nuvem, a suaves no topo.

Imposto nas movimentações de pequena escala que podem estar presentes está um movimento de maior escala da onda com correntes descendentes e ascendentes. Contrastes no vento horizontal a diferentes altitudes são amplificados localmente nos vales e cristas das ondas, levando ao aparecimento de turbulência.

Quando estão presentes ondas de montanha, é comum desenvolver-se uma zona de rotor, perto ou abaixo do nível do topo da montanha, debaixo da crista de uma dessas ondas e por vezes associado com as nuvens lenticulares. Esta é uma área com potencial de *wind shear* e turbulência severa a extrema. A figura 8 mostra um esquema do escoamento associado a este fenómeno. Como se pode ver, os rotores marcam o fim da tempestade de vento pelas encostas da montanha, com o vento na superfície a mudar de direcção. Quando isto acontece, o rotor é parte de um salto hidráulico. Apesar da forte rotação presente na zona de um rotor, nem sempre é fácil detectar visualmente estes fenómenos, e a nuvem que frequentemente os marca, pode ser facilmente confundida com um *cumulus* inofensivo, embora esta nuvem seja normalmente arredondada na direcção de rotação do rotor com farrapos que se formam e desaparecem rapidamente perto da base, dando uma sensação de rotação da própria nuvem.



**Figura 8 Rotor e tempestade de vento pela encosta**

Devido ao seu potencial para causar turbulência e perda de controlo de aeronaves, estas são zonas a evitar. Medições por radar de rotores demonstraram velocidades de rotação na ordem dos 20 nós.

## **1.5. Previsão de escoamentos em terreno montanhoso**

A previsão de escoamentos locais em terreno montanhoso é interessante por várias razões e diferentes propósitos requerem diferentes tipos de previsão. Nesta dissertação, o interesse foca-se nos problemas relacionados com a previsão operacional de condições de vento perigosas para a aviação, em particular nas áreas de aproximação e descolagem. Alguns sistemas de alerta de ventos a baixa altitude são baseados na hipótese de que a maioria dos escoamentos perigosos está associado a estruturas relativamente grandes e coerentes como recirculações, ondas de montanha, transições hidráulicas, rotores e vórtices. Este tipo de escoamentos são complexos e não podem ser representados eficazmente por alguns graus de liberdade. Normalmente este tipo de estrutura está relacionado com escoamentos convectivos ou gravíticos e são classificados como *wind shear*, frentes de rajada, trovoadas e *microbursts*, todos eles fenómenos que podem ser particularmente perigosos para a operação de aeronaves [Eidsvik, 2003].

Assim, de um ponto de vista de segurança na aviação, há razões para assumir que um sistema de previsão local pode ser muito útil em casos de terreno montanhoso na vizinhança de aeroportos.

### **1.5.1. Modelos numéricos**

Uma previsão precisa de escoamentos de montanha não é uma tarefa simples, embora um escoamento idealizado em torno de um modelo de uma elevação possa ser simulado com alguma precisão através de modelos numéricos comuns [Kaimal e Finnigan, 1994].

O mesmo já não se pode dizer de elevações reais e complexas. A estratificação pode causar dificuldades acrescidas e o uso dos modelos podem introduzir incertezas associadas com as condições de fronteira de uma maior escala, tornando a previsão incerta para escalas mais pequenas.

A ocorrência de meteorologia severa em terreno montanhoso é um desafio difícil e importante para a previsão meteorológica. Ventos fortes que descem a montanha, quebras de ondas gravíticas, saltos hidráulicos e rotores devido a ondas de montanha são exemplos de fenómenos cuja uma previsão precisa resultaria em melhoramentos na segurança da aviação e seria benéfica para as populações de regiões montanhosas. Apesar dos modelos numéricos apresentarem já uma fina resolução, a escala a que ventos perigosos podem ocorrer, continua demasiado pequena para ser resolvida com precisão. Por exemplo, um rotor por debaixo de uma onda de montanha pode ter apenas 1 ou 2 km de extensão, o que requereria uma malha com espaçamentos de algumas centenas de metros. O custo computacional para se simular uma previsão nestas condições é demasiado alto

utilizando técnicas convencionais e também se pode questionar o valor dos resultados quando se resolvem vórtices individuais, no que poderá ser um sistema caótico na prática.

Assim, é natural que se utilizem outro tipo de técnicas para o estudo da previsão deste tipo de fenómenos. Só recentemente foram conduzidos estudos numéricos sobre rotores de ondas de montanha e estes realçaram a importância das ondas de montanha presas na formação de rotores, e demonstraram como, quando a amplitude das ondas é suficientemente grande, o gradiente adverso de pressão pode acelerar a separação do escoamento, criando regiões de recirculação debaixo da crista das ondas. A fricção com o solo parece ter um papel crucial, permitindo que ocorra a separação do escoamento. Também já foi demonstrado que a presença de uma forte e localizada inversão térmica a montante pode ter também um papel determinante na formação de rotores. Possíveis efeitos de uma inversão térmica incluem a existência de ondas de montanha presas na inversão, rotores e saltos hidráulicos [Mobbs, 2005].

A maior parte do conhecimento actual sobre escoamentos estratificados sobre montanhas vem de estudos analíticos e numéricos de situações altamente idealizadas, onde as propriedades do escoamento a montante, como a velocidade e estabilidade, são independentes da altitude. Estes estudos, que consideraram efeitos de estruturas de pequena escala, como são as inversões térmicas, demonstraram diferenças significativas na estrutura das ondas de montanha e no escoamento próximo da superfície em relação aos estudos anteriores, que consideravam velocidades e estratificação constantes com a altitude. A influência de fortes inversões térmicas foi também já demonstrada em estudos de observação, sendo mesmo sugerido que é necessária a sua presença na formação de tempestades de vento descendente no Alasca. Assim, podemos dizer que a aplicação de resultados obtidos através de condições altamente idealizadas a situações reais, apenas pode ter uma utilização limitada. Deste modo, é claramente desejável um melhor conhecimento do comportamento de escoamentos na atmosfera real.

A detecção e previsão de fenómenos meteorológicos perigosos, que ocorrem a uma escala sub-quilométrica na camada limite atmosférica, são de grande importância para a segurança e controlo do tráfego aéreo, quando ocorrem na vizinhança de grandes aeroportos. Actualmente, a rede de observação meteorológica e os modelos de previsão numérica operacionais, não têm resolução temporal e espacial suficiente para observar e prever este tipo de fenómenos com precisão. Deste modo, sistemas de medição dedicados, como os radares *doppler*, têm sido instalados nos aeroportos para detectar fenómenos de *wind shear*. Se não existir a possibilidade de se instalar um grande número de instrumentos de medição num dado local, a detecção de fenómenos perigosos não pode ser efectuada sem a combinação de informação proveniente de diferentes fontes, como são

exemplo os casos do aeroporto de Juneau e Hong Kong, onde os sistemas de alerta de fenómenos meteorológicos de risco para a aviação foram desenhados com base num estudo estatístico climatológico, envolvendo as condições meteorológicas na vizinhança destes aeroportos, bem como medições efectuadas por vários sensores locais espalhados pela zona [Boilley, 2008].

Modelos numéricos de grande resolução também demonstram capacidade para descrever escoamentos complexos de mesoescala na camada limite atmosférica e com a influência de orografia e contrastes entre o mar e a terra. De modo a se conseguirem estes modelos, estão em desenvolvimento sistemas de assimilação de dados de alta resolução que conseguem uma combinação optimizada de informação de observações meteorológicas e previsões numéricas.

### **1.5.2. Camada limite atmosférica e simulações em túneis de vento**

A camada limite atmosférica é uma região de ar que é fortemente afectada pela influência da superfície da terra, que pode estender-se desde algumas centenas de metros a poucos quilómetros de altura, dependendo das condições de estabilidade atmosférica e do tipo de terreno sobre o qual se dá o escoamento. Para propósitos de design estrutural é importante perceber a camada limite atmosférica e as características do escoamento turbulento a ela associado. Embora os modelos computadorizados tenham evoluído na tentativa de modelar a camada limite atmosférica, ainda existem complexidades não explicadas. Deste modo, as simulações em túnel de vento, continuam a ser uma importante ferramenta de investigação nesta área. Baseado em dados meteorológicos reunidos a partir de estudos de campo e outros métodos, é geralmente aceite pela comunidade científica que algumas características devem ser respeitadas nas simulações da camada limite atmosférica em túnel de vento. Estas são, entre outras, a variação da velocidade média do vento com a altura e a variação da intensidade da turbulência e da sua escala de comprimento com a altura. A maioria dos túneis de vento, tipicamente desenhados para estudos aeronáuticos em escoamento suave e laminar, não tem intensidade de turbulência e altura da camada limite suficiente para simular a camada limite atmosférica. No passado têm sido implementados mecanismos passivos para melhorar artificialmente as características dos escoamentos em túneis de vento, tais como geradores de vórtices e elementos de rugosidade no chão do túnel [Burton, 2001].

A maior parte das modelações de quintas de vento para a avaliação do potencial eólico são feitas utilizando simulações numéricas computadorizadas do escoamento sobre o terreno na sua vizinhança. Existem várias dificuldades na implementação destes modelos, sendo o mais significativo, a dificuldade em representar com exactidão o terreno complexo com uma malha discreta. Se forem seguidas normas de similaridade com cuidado na construção de um modelo, a simulação do escoamento em seu torno num túnel de vento de camada limite atmosférica é de alta

resolução, uma vez que a atmosfera está a ser simulada utilizando ar e a turbulência utilizada na simulação física é gerada de um modo similar ao que acontece na atmosfera. Deste modo, túneis de vento de camada limite atmosférica são utilizados para uma grande variedade de investigações, incluindo a determinação de carregamentos em edifícios gerados pelo vento, ventos ao nível do solo em ambientes urbanos e em dispersão de poluentes. Podem ser utilizados modelos de grande resolução que incluam edifícios, elevações ou vales e curvas de nível em degrau. Estes túneis de vento são desenhados para produzir um escoamento completamente turbulento, cujas características podem ser escaladas em concordância com o terreno e as condições de vento a ser modeladas. As limitações dos túneis de vento de camada limite atmosférica incluem a possibilidade de apenas simular condições de estabilidade neutra, o efeito de Coriolis não pode ser simulado, limitando as medições úteis a algumas centenas de metros acima da superfície, e o tamanho da área a estudar é limitado pelo tamanho da secção de testes do túnel [Lubitz, 2004].

Simulações numéricas da mesma topografia normalmente incluem o efeito de Coriolis e podem acomodar regiões mais extensas, mas, por outro lado, perto da superfície, a simulação requer uma malha de grande resolução, que se torna muito pesada de processar e a correcta simulação da turbulência é difícil de conseguir. Deste modo, as principais limitações do túnel de vento são diferentes das limitações das simulações computacionais e assim pode ser desejável a utilização combinada dos dois para se obter os melhores resultados possíveis.

A camada limite dentro do túnel de vento simula as mesmas características de turbulência que se podem encontrar na camada limite atmosférica. É importante que a camada limite que aproxima o modelo tenha as mesmas características que podemos encontrar à escala real. De outra forma as mudanças na velocidade local sobre o modelo não serão simuladas com precisão. A relação entre a velocidade média  $U$  e a altura acima da superfície  $z$  para uma camada limite com altura  $\delta$  e uma velocidade média  $U_\infty$  a uma altura  $\delta$  é descrita pela seguinte lei:

$$\frac{U}{U_\infty} = \left( \frac{z}{\delta} \right)^\alpha \quad (1.1)$$

O expoente  $\alpha$  define a forma do perfil de velocidades da camada limite. O seu valor no túnel de vento deve ser muito próximo do seu valor no escoamento real. Normalmente o valor de  $\alpha$  depende da rugosidade do terreno. Sobre uma cidade  $\alpha$  toma valores na ordem de 0,35 enquanto sobre o mar aberto ronda 0,1.

Além disso, o perfil de velocidades médias de aproximação deve respeitar com o perfil de vento dado pela lei da parede na vizinhança do fundo do túnel de vento dada por:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.2)$$

Onde  $k$  é a constante de Von Kármán, aproximadamente 0.42. A camada de superfície, ou seja os primeiros 10 a 15% da camada limite atmosférica, são governados por esta equação. Assim, para que se obtenham bons resultados, o modelo deve ser construído a uma escala que permita respeitar esses limites.

Outro parâmetro a respeitar é o número de Reynolds de rugosidade de superfície,  $Re_z = U_* z_0 / \nu$  (1.3), onde  $U_*$  é a velocidade de fricção,  $z_0$  a rugosidade de superfície e  $\nu$  a viscosidade cinemática do ar. Uma simulação apropriada de uma camada limite turbulenta requer  $Re_z > 2.5$  e para tal devem-se manter as superfícies lisas a um mínimo.

## 1.6. Casos de estudo

Segue-se um resumo de alguns casos de estudo de problemas relacionados com ventos associados a terreno montanhoso, na vizinhança de aeroportos. Estes resumos relatam o estado da arte em termos de conhecimento e técnicas de investigação ao serviço da aviação com o intuito de melhorar a segurança e a operacionalidade de aeroportos situados na proximidade de montanhas.

### 1.6.1. Værnes

O primeiro caso de estudo revisto, refere-se à implementação de um modelo numérico ao terreno envolvente ao aeroporto de Værnes na Noruega. Turbulência induzida pelo terreno é comum neste aeroporto, especialmente com ventos do quadrante Sudeste, e foi essa a direcção escolhida para as simulações.

Infelizmente não existem boas observações locais para este tipo ventos e foi por isso utilizada uma metodologia pouco usual. Utilizou-se uma pequena aeronave para observar a intensidade da turbulência ao longo de trajectórias especificadas. Estas observações são subjectivas, mas são vistas como um contributo valioso, de forma a classificar a distribuição espacial da turbulência relativa. Embora as observações tenham sido restritas a algumas horas, é de notar que o momento não foi escolhido ao acaso. O dia foi escolhido com base na direcção e intensidade do vento, que era sabido causar problemas de turbulência numa área sensível perto do aeroporto baseado na experiência dos pilotos locais. As trajectórias foram escolhidas para cobrir a área de aproximação que se sabia estar exposta a estes fenómenos. Além disso, foram registadas algumas observações feitas a partir do aeroporto e de um mastro numa elevação vizinha.

Devido à escassa e subjectiva informação reunida desta forma, pode-se questionar o valor desta aproximação, deve-se assim notar que não se trata de uma validação mas de um estudo de caso, e deste modo pode considerar-se que se obtiveram resultados coerentes a partir das simulações [Eidsvik, 2003].

### **1.6.2. Juneau**

A proximidade de terreno montanhoso ao aeroporto de Juneau, no Alasca, eleva o risco das operações de aeronaves na vizinhança do mesmo, em condições de baixa visibilidade. Mas mesmo em dias limpos podem encontrar-se perigos para a aviação. O escoamento sobre este tipo de terreno gera ondas gravíticas, fortes correntes verticais, turbulência localizada e *wind shear*. Deste modo, já se sentiu necessidade de estudar os fenómenos meteorológicos nesta zona, tendo-se identificado algumas características locais. O problema a ser resolvido passa pela criação de alertas aos aviadores que lhes dêem indicações da possibilidade de encontrarem turbulência ou *wind shear* na vizinhança do aeroporto. Este alerta deve ser baseado em observações meteorológicas de uma rede de anemómetros e através de radares capazes de medir o perfil de vento. Este tipo de alerta deve conseguir detectar o maior número possível de ocorrências, sem gerar muitos falsos alarmes.

Estudos de campo e a discussão com pilotos locais, revelaram que a turbulência é encontrada em zonas previsíveis para determinadas condições meteorológicas. Estes fenómenos encontram-se principalmente a jusante do terreno mais elevado e à saída de vales.

Foram instalados anemómetros no topo de algumas montanhas e em várias outras localizações ao nível do mar, bem como três radares colocados em localizações estratégicas. Foram recolhidos dados destes sensores durante quatro anos para desenvolver um algoritmo e os dados em tempo real são utilizados para alimentar um algoritmo que indica a possibilidade da presença de turbulência ou *wind shear* e produz um alerta.

Apesar de ser possível prever a localização de turbulência, dado uma determinada condição meteorológica, há condições locais de medição que tornam uma simples relação determinista imperfeita, uma vez que os anemómetros acabam por fazer medições influenciadas por pequenas perturbações locais que distorcem o que está a acontecer na sua vizinhança, onde essas perturbações já não têm efeito. A solução para este problema é utilizar relações estatísticas entre as medições dos anemómetros e os dados recolhidos pelos radares de perfis de vento, comparando-as com a turbulência e *wind shear* medido pelos aviões da pesquisa durante os estudos de campo. Desta forma criam-se coeficientes que relacionam as medições com a previsão da intensidade da turbulência para um dado local, o que traz benefícios como a redundância do sistema, uma vez que

a falha de um sensor não causa uma degradação significativa da performance do sistema de previsão, e podem também ser tomadas em conta efeitos dos locais dos sensores que não seriam óbvios numa análise puramente meteorológica [Cohn, 2003].

### **1.6.3. Nice**

O aeroporto de Nice Côte d'Azur fica situado no sul dos Alpes à beira do mar Mediterrâneo. A montanha mais alta na vizinhança do aeroporto tem 1600 metros de altura e outras elevações com até 800 metros rodeiam o mesmo. Esta configuração geográfica é propícia à formação de brisas marítimas e terrestres, e deste modo a direcção do vento tende a prevalecer no eixo Norte-Sul, enquanto no cabo a Este do aeroporto, a direcção prevalente é no eixo Este-Oeste. Isto representa uma situação de *wind shear* sobre o aeroporto, isto é, o contraste entre os ventos a baixa altitude canalizados pelo vale e o escoamento sinóptico de Oeste. Estes fenómenos acontecem normalmente abaixo dos 500 metros de altitude. Situações de *wind shear* horizontal, ou reversão do escoamento, que acontecem por causa dos padrões de escoamento atrás descritos são mais difíceis de detectar e prever, mas notam-se dois padrões mais usuais.

Foi feito um estudo de caso em que se detectou este fenómeno através de medições no aeroporto e no cabo a Este do mesmo, tendo-se medido ventos de Este com 30 nós no aeroporto e de Oeste com 10 nós no cabo. Estas situações nem sempre conseguiram ser simuladas com o modelo numérico [Boilley, 2008].

### **1.6.4. Innsbruck**

O aeroporto de Innsbruck fica situado num profundo vale alpino, com o terreno envolvente a atingir até 2900 metros de altitude. Em condições de vento Sul, as áreas de aproximação e partida do aeroporto são afectadas por turbulência e *wind shear*, causados por efeitos criados pelas elevações, jactos de baixa altitude e fenómenos de saltos hidráulicos. Foi efectuado um estudo de campo com uma aeronave baseada neste aeroporto que efectuou vários voos em diversas trajectórias e a diferentes altitudes com o propósito de identificar objectivamente áreas de forte turbulência em contraste com zonas mais calmas, de modo a melhorar o conhecimento de meteorologistas e tripulações de aeronaves [Malcher, 2000].

### **1.6.5. Malvinas**

Realizou-se uma campanha de estudo no terreno nas ilhas Malvinas, no Atlântico Sul. Recolheram-se dados durante quase um ano de forma praticamente ininterrupta, a maioria deles na vizinhança do aeroporto Mount Pleasant, conhecido pela ocorrência frequente de *wind shear* severo a baixa altitude, o que representa um grande perigo para a aviação. Durante períodos de escoamento estável de Norte, quando o aeroporto fica a jusante das montanhas, é frequente a emissão de alertas de turbulência severa a baixa altitude, turbulência esta, que se pensa estar associada com a actividade de ondas de montanha. Os meteorologistas locais referem-se ao fenómeno como “correntes de rotores”, o que descreve recirculações instáveis que envolvem rápidas mudanças na direcção e intensidade do vento, no espaço e no tempo. Estas condições são sinónimas de turbulência severa na zona do aeroporto e não é raro observar as mangas de vento do campo apontando em direcções opostas. A operação de aeronaves no aeroporto durante estes eventos pode ser perigosa e não existem métodos fiáveis para prever este tipo de condições [Mobbs, 2004].

### **1.7. O caso Colorado Springs**

Este subcapítulo dedica-se a um estudo realizado em Colorado Springs que, devido à sua envergadura, utilizou um grande quantidade de meios e identificou quase todos os tipos de fenómenos associados aos escoamentos em terreno montanhoso.

Devido às estatísticas de acidentes e incidentes na vizinhança de montanhas, foi recomendado pelas entidades responsáveis Norte Americanas que se tomassem medidas tendo em vista a redução dos riscos dos voos perto de montanhas. Foram então combinados os recursos do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e do National Center for Atmospheric Research para realizar uma experiência de campo sobre perigos para a aviação induzidos por terreno. O programa de estudo dos perigos para a aeronáutica induzidos por montanhas apareceu após um acidente com um Boeing 737 em Colorado Springs em 1991. Assim, a experiência de campo foi realizada na área de Colorado Springs com foco nas rotas de aproximação e descolagem do seu aeroporto, e os resultados foram depois utilizados para desenvolver um programa de âmbito mais abrangente.

A primeira fase do programa envolveu o desenvolvimento e implementação de uma experiência piloto para estudar perigos a baixa altitude induzidos pelas montanhas na área, e envolveram uma grande variedade de sensores terrestres e a bordo de aeronaves.

O objectivo da experiência foi detectar quatro possíveis fenómenos induzidos pelas montanhas que podem ter impacto na operação de aeronaves a baixa altitude na área do aeroporto. São eles:

1. A aceleração do vento ao passar por cima de uma montanha que pode gerar vórtices de deslocamento no eixo horizontal.
2. Zonas de contraste e de turbilhões de mesoescala a jusante da maior montanha da área que podem gerar turbulência e vórtices de eixo vertical de pequena escala.
3. Ondas de montanha com turbulência associada com rotores e intensos contrastes verticais.
4. Turbulência mecânica aumentada pelas condições térmicas e gerada por fortes escoamentos sobre as montanhas a Oeste do aeroporto.

O fenómeno 1, já foi ilustrado em laboratório com simulações em tanques de água que demonstram que a aceleração do vento ao passar por cima de um obstáculo vai criar uma camada de contraste entre escoamentos com velocidades diferentes e essa camada vai ter tendência a enrolar criando um vórtice no plano horizontal que se deslocará para jusante com o escoamento. O fenómeno 2 pode ser o responsável por observações de ventos que parecem surgir do nada e que já causaram alguns danos materiais no solo. O fenómeno 3 é uma fonte conhecida de turbulência a várias altitudes e espera-se que o fenómeno 4 esteja presente sempre que se antecipa escoamento a baixa altitude do quadrante Oeste e é considerado o perigo mais comum na área do aeroporto de Colorado Springs. Todos estes perigos ocorrem dentro de um contexto meteorológico de maior escala que está significativamente bem definido, em que a situação geral leva a fortes ventos em altitude do quadrante Oeste.

### **1.7.1. Descrição do equipamento e técnicas de obtenção de dados**

*Doppler wind profilers* são equipamentos de radar que fazem medições de três componentes do vento numa coluna vertical acima do solo, e se estiverem equipados com sistema de sondagem rádio acústico, podem também medir a temperatura nessa coluna. A resolução e alcance destas medidas dependem da frequência utilizada e também se pode variar o espaçamento temporal das amostras.

A principal vantagem deste equipamento é permitir medições contínuas de relativo baixo custo da estrutura vertical do vector do vento acima do solo. Uma desvantagem é só ser possível obter uma visão unidimensional do campo de vento em função do tempo. Assim é desejável a

comparação dos dados com outras fontes de informação para se obterem visualizações tridimensionais completas do campo de vento. Além disso, as medições efectuadas por estes equipamentos podem ser contaminadas por variadas fontes de ruído, o que requer atenção à qualidade dos dados recolhidos durante a sua análise.

Os *Doppler lidar* são um tipo de radar meteorológico que medem remotamente a componente radial do vento num volume tridimensional à volta do mesmo. As medições fazem-se enviando um impulso de radiação e medindo a mudança na frequência do sinal de retorno. O grau de mudança está directamente relacionado com a componente de velocidade do vento de ou para a estação. O tempo de retorno do sinal indica a distância da estação a uma particular medição. Fazendo a emissão do feixe de radiação em varias direcções e com diferentes inclinações, consegue-se uma imagem tridimensional da componente radial do vento. Um *lidar* transmite um feixe de energia laser bastante estreito, o que lhe permite boa resolução e pouca influência de interferências.

A maior vantagem deste sistema é que os reflectores primários da sua energia são partículas de poeira, ao invés de partículas de precipitação, o que possibilita a sua utilização em dias de céu limpo comuns nas condições meteorológicas que se pretende estudar.

O avião de pesquisa, um turboprop King Air, possui equipamento para medir o vento, a temperatura, pressão, vapor de água, microfísica das nuvens e outros parâmetros meteorológicos a uma razão de 16 Hz o que equivale a espaçamentos de 5 metros às velocidades de voo. A principal motivação para a utilização de uma aeronave de pesquisa é que este é o único instrumento que pode obter medições objectivas no local do escoamento e os perigos associados nos corredores de aproximação e descolagem. Deste modo, as medições do avião podem ser consideradas a verdade do que está a acontecer, com a qual se comparam e calibram os restantes equipamentos. A principal desvantagem da utilização de uma aeronave é o seu custo de operação, e além disso as suas medições são apenas unidimensionais segundo a trajectória de voo, o que dificulta a visualização tridimensional e temporal de estruturas de pequena escala encontradas.

A aeronave tem ainda a vantagem de conseguir medir a turbulência de forma indirecta. Os instrumentos de bordo incluem acelerómetros que medem a aceleração vertical de modo que é possível registar a resposta da aeronave à turbulência encontrada.

Estações meteorológicas de superfície fornecem dados contínuos baratos e precisos de medições de vento, temperatura, humidade, pressão, precipitação e radiação.

A largada de balões com sondas que medem o vento horizontal, a temperatura e humidade em função da pressão, são lançados com o intuito de fazer medições a montante do terreno até altitudes troposféricas, onde o escoamento é relativamente menos perturbado, uma vez que já se mostrou que as características dos escoamentos induzidos pela presença de montanhas, são dependentes da distribuição vertical das condições de vento e temperatura a montante, e esses dados são essenciais para qualquer tentativa de modelação numérica do escoamento.

Relatos de ocorrências de pilotos, ou PIREPS, são também uma boa contribuição para este tipo de estudos.

Finalmente, um novo instrumento de pesquisa, a que se chamou observatório infra sónico, está a demonstrar potencial na detecção de turbulência significativa para a aviação e outros fenómenos meteorológicos, pela escuta de barulhos de baixa frequência inaudíveis que são gerados por este tipo de fenómenos.

## **1.7.2. Fenómenos identificados**

### **1.7.2.1. Rotores e inversões no escoamento**

Apesar de existirem evidências consideráveis da presença de vórtices nas proximidades de montanhas, não existem muitas medições directas documentando a intensidade e tamanho de rotores, bem como das condições em que estes se formam. Existem muitos processos físicos com potencial para a geração de vórtices, desde a interacção directa com o terreno, a rotações de maior escala associadas às ondas de montanha.

Durante o estudo de campo levado a cabo em Colorado Springs, foi possível medir e visualizar características atmosféricas de pequena escala com o *Doppler lidar*, características que parecem ser potencialmente perigosas para a aviação, tendo sido identificadas várias situações envolvendo rotores e inversões na direcção do escoamento. Se uma aeronave voasse através de um destes fenómenos, são possíveis variações na velocidade relativa maiores que 40 m/s. A resposta da aeronave dependerá do modo como os fenómenos são interceptados, especialmente em relação à altitude, direcção e velocidade do vento, mas podem gerar-se situações muito perigosas nestas condições.

Também se encontraram indicações da existência de rotores com movimento de translação, mas o fenómeno não está bem documentado. De qualquer modo ficou claro que ventos acelerados perto do topo das montanhas chegaram até à zona do aeroporto. A sua chegada ao aeroporto faz-se sentir pelo aumento da intensidade dos ventos na superfície que por vezes estava associada a

períodos de ventos calmos, o que tendo em conta a velocidade média do escoamento é um potencial sinal de rotação.

### **1.7.2.2. Turbulência estocástica (aleatória) de baixa altitude**

Turbulência estocástica refere-se a um movimento aparentemente aleatório da atmosfera. A turbulência está sempre presente na atmosfera, mas durante a maior parte do tempo é fraca o suficiente para não afectar aeronaves significativamente. Distingue-se de perigos com estrutura coerente gerados pelo terreno, por exemplo, ondas e rotores, por não existirem equações que descrevam a sua evolução a quatro dimensões. Diferencia-se ainda mais dos fenómenos coerentes por não ser caracterizada por uma escala de tamanho, uma vez que ocorre numa vasta gama de escalas desde metros a quilómetros. Deste modo, este tipo de turbulência tem diferentes impactos em aeronaves, desde mudanças na performance até à redução da controlabilidade. Se estes impactos se tornarem fortes o suficiente, a turbulência pode tornar-se um perigo significativo para aeronaves.

Encontros com turbulência a alguma altitude geralmente não ameaçam a integridade estrutural de uma aeronave. O risco de acidente devido a turbulência a altitudes de cruzeiro é menor, uma vez que as alterações na altitude causadas por forte turbulência são quase sempre relativamente pequenas. De qualquer forma, encontros com turbulência são uma das principais causas de ferimentos a passageiros e tripulação de cabine. Por outro lado, a baixas altitudes, turbulência forte pode ser um factor determinante na capacidade de se executar uma aproximação ou descolagem segura. Isto é particularmente notado por aviões mais pequenos que são mais afectados pela turbulência. É comum que falhas no trem de aterragem e saídas de pista tenham, como factor na sua ocorrência, a presença de turbulência.

Existem muitos mecanismos através dos quais, níveis normais de turbulência na atmosfera, podem evoluir e tornar-se num perigo para a aviação. Na maior parte dos casos, a mecânica de como a turbulência se intensifica, não está relacionada com os subsequentes impactos para a aviação, mas é importante perceber estes mecanismos e os ambientes que os levam a acontecer, uma vez que estes mecanismos estão directa ou indirectamente relacionados com escoamentos induzidos por terreno. Deste modo, ganha-se conhecimentos e melhora-se a detecção e previsão de perigos associados aos escoamentos gerados por terreno. Os mais comuns destes mecanismos são a turbulência mecânica e a turbulência induzida por ondas de montanha.

O aparecimento de turbulência mecânica é o resultado do escoamento ser forçado a seguir trajectórias complexas à medida que segue sobre e à volta do terreno. Os esforços aplicados ao escoamento nestas circunstâncias são frequentemente instáveis e rapidamente degeneram em turbulência, que é levada para jusante com o escoamento médio. A intensidade da turbulência

gerada desta forma é fortemente dependente da intensidade do escoamento sobre o terreno e das características deste. A intensidade deste tipo de turbulência vai diminuindo à medida que o escoamento se afasta da montanha que o perturbou, uma vez que a energia cinética é dissipada sobre a forma de calor. A turbulência mecânica é normalmente encontrada dos topos das montanhas para baixo.

As ondas de montanha podem gerar turbulência forte na vizinhança de montanhas através de, pelo menos, três processos diferentes. Primeiro, à medida que as ondas de montanha se amplificam, os ventos à superfície tendem a aumentar, por vezes de forma dramática, o que leva a que a criação de turbulência mecânica junto da superfície se intensifique. Em segundo lugar, a próprias ondas podem crescer até ao ponto de quebrarem. Este é um processo que gera forte turbulência de uma forma análoga às ondas do mar a quebrar numa praia. O terceiro mecanismo está associado com o contraste de vento vertical ao longo da onda, que pode levar à amplificação e subsequente quebra a escalas menores através de um processo conhecido por instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Estes últimos dois mecanismos são a causa mais comum de turbulência induzida por terreno a grandes altitudes sobre terreno montanhoso. Turbulência forte a baixas altitudes, associada a tempestades de vento induzidas por ondas de montanha, pode ser consequência de turbulência mecânica intensificada, mas mais estudos são necessários para confirmar esta hipótese.

Turbulência estocástica forte suficientemente para ter um impacto na aviação está muitas vezes presente quando outros escoamentos induzidos por montanhas estão presentes. Não é comum aparecerem rotores induzidos pelo terreno sem a presença de turbulência estocástica significativa. No entanto a presença de turbulência não implica que existam no local outro tipo de estruturas. A presença de vários fenómenos num determinado local geralmente aumenta a possibilidade de que um particular escoamento induzido pelo terreno vai trazer perigos para a aviação. Por exemplo, estudos em simuladores demonstraram que a capacidade de um piloto recuperar com sucesso de um evento de *wind shear* a baixa altitude é reduzida quando turbulência estocástica é adicionada ao *wind shear*, mesmo que os fenómenos presentes não representem um grande perigo individualmente. Resultados deste tipo implicam que o aparecimento de condições perigosas para a aviação pode não ser determinado por um fenómeno individual, sendo necessário considerar o ambiente geral em que estão integrados.

### **1.7.2.3. Turbilhões de mesoescala**

Os turbilhões de mesoescala podem ser uma importante fonte de perigos associados a fenómenos no escoamento a baixa altitude. No caso de estudo em Colorado Springs, foi possível confirmar a existência de pelo menos um destes turbilhões. Este fenómeno ocorre com ventos de

noroeste, e pode ser definido com a ocorrência de ventos de superfície com direcções praticamente opostas em zonas relativamente próximas a jusante da montanha mais alta da zona. Também se detectaram muitos vórtices intensos, mas de uma menor escala, nas zonas de contraste lateral associados com os turbilhões de mesoescala, em várias ocasiões. Outros vórtices que parecem estar ancorados ao terreno também foram detectados, mas não existem dados suficientes para os caracterizar.

## **1.8. Sumário**

Esta dissertação divide-se em 4 capítulos. O primeiro, onde nos situamos, dá a conhecer a ilha do Pico e o seu aeroporto, bem como as motivações para a realização deste trabalho. Em seguida apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre escoamentos em torno de terreno montanhoso, incluindo técnicas de previsão e casos de estudo concretos. No segundo descreve-se a metodologia utilizada durante o trabalho de pesquisa estatística e experimental. O terceiro capítulo descreve os resultados obtidos e, finalmente, são apresentadas as conclusões no quarto capítulo.

## 2. Metodologia

Para se estudar o escoamento de ar em torno da ilha do Pico foram consideradas três hipóteses, um estudo numérico, um estudo de campo e um estudo experimental.

A realização de um estudo numérico à escala necessária para abranger toda a ilha e com a resolução suficiente para se identificarem alguns dos fenómenos esperados implicaria entrar num campo de meteorologia, uma vez que os programas utilizados para a simulação numérica na universidade teriam dificuldades em comportar uma malha com tamanho suficiente para abranger toda a ilha. Além disso, o poder computacional disponível é limitado e um cálculo desta natureza seria muito demorado ou mesmo impraticável. Existem modelos meteorológicos que poderiam ser capazes de simular o escoamento em torno da montanha a uma escala suficientemente pequena para que os resultados pudessem revelar zonas de potencial perigo para a aviação, mas estes modelos requerem alguma formação em meteorologia que não possuímos. Desta forma a hipótese de realizar este estudo utilizando técnicas de simulação numérica foi posta de parte.

Um estudo de campo nesta matéria pode ter muitas vertentes, mas como estes estudos podem ser muito dispendiosos, não é fácil encontrar meios de os financiar. Como o aeroporto do Pico não é muito movimentado não seria fácil atrair investidores com interesse na possibilidade de se melhorar a operacionalidade desta infra-estrutura, uma vez que os custos associados aos cancelamentos derivados de problemas com ventos não serão significativos, dado o número de passageiros afectados, e não existem garantias de que se possa efectivamente melhorar a operacionalidade.

Assim, desde logo foram postos de parte voos de teste, monitorização do escoamento por radares, instalação de estações terrestres de recolha de dados ou lançamento de sondas atmosféricas na ilha.

No entanto não se descurou este aspecto por completo. Foram feitas algumas observações no local com recolha de algumas imagens onde se pode perceber o escoamento de uma forma geral através das formações de nuvens e dos efeitos de turbilhões no mar. Fizeram-se entrevistas aos técnicos de meteorologia do aeroporto que relataram comportamentos habituais do vento na zona e os seus efeitos relatados por pilotos. Finalmente, foi solicitado ao Instituto de Meteorologia os dados de vento recolhidos pelas suas estações no aeroporto do Pico e no aeroporto da Horta durante um ano, com o intuito de os comparar, à procura de padrões que possam revelar alguma coisa sobre os efeitos da ilha no escoamento, uma vez que quando o vento se encontra do quadrante Sul, o que nos interessa em termos de perturbações no aeroporto do Pico, o escoamento chega ao aeroporto da

Horta praticamente imperturbado uma vez que este se situa na costa sul da ilha do Faial. O oposto acontece quando o vento está do quadrante Norte, embora o escoamento possa já estar algo perturbado pela ilha de S. Jorge quando chega ao aeroporto do Pico.

Um estudo experimental ficou assim como principal ferramenta para estudar o comportamento do vento no aeroporto do Pico. Mas, também neste aspecto, estamos limitados pelo túnel de vento disponível no Departamento de Ciências Aeroespaciais da Universidade da Beira Interior. Não obstante, considerou-se que os potenciais resultados de um estudo desta natureza seriam suficientemente interessantes para não deixarmos de o fazer, mesmo que só se consiga obter uma primeira ideia dos problemas com os ventos no aeroporto do Pico. Assim, decidiu-se construir um modelo à escala da ilha do Pico, pequeno o suficiente para ser colocado no túnel de vento, com o intuito de se visualizar o escoamento em torno deste, de modo a se tentar identificar zonas mais propícias a fenómenos potencialmente perigosos para a operação de aeronaves.

## **2.1. Análise dos relatórios METAR**

Foram pedidos ao Instituto de Meteorologia os dados relativamente ao vento, medidos no aeroporto do Pico e no aeroporto da Horta. O I.M. enviou o registo dos ventos dos relatórios METAR emitidos em 2007, nestes dois aeroportos. Estes registos incluem a direcção e velocidade média do vento nos 10 minutos que antecedem a sua publicação. Se durante esse período ocorrerem rajadas que excedam a velocidade média do vento em mais de 10 nós estas devem também ser reportadas. Num relatório METAR são também reportadas variações de direcção do vento que ultrapassem os 60 graus em relação à média, mas essa informação não foi incluída nos dados que recebemos do I.M.

Os relatórios METAR são normalmente emitidos a cada meia hora, mas, no caso do aeroporto da Horta, deixam de ser emitidos durante a noite devido ao fecho dos serviços de meteorologia e, no caso do Pico, existe ainda um intervalo para almoço, além de que os relatórios são normalmente emitidos apenas de hora em hora. Assim ficamos com mais relatórios METAR da Horta do que do Pico e foi necessário tratar os dados de forma que a cada METAR disponível para o Pico se fizesse corresponder os dados recolhidos na Horta para o mesmo dia e hora. Deste modo obteve-se 2743 pares de dados recolhidos no Pico e no Faial ao mesmo tempo.

Para possibilitar o tratamento estatístico desta informação foram isolados em folhas de excel as direcções e intensidade do vento, tendo sido considerado os valores das rajadas, no caso de existirem, em detrimento da média dos 10 minutos, uma vez que as rajadas também são consideradas como limite à operação.

A partir destas folhas retiraram-se informações relativas à predominância dos ventos, comparou-se a direcção do vento nas duas ilhas e registaram-se as diferenças na intensidade do vento.

Durante o ano lectivo 2008/09 foram registados alguns relatórios METAR do Pico e Faial, obtidos através do site do Instituto de Meteorologia, em dias em que as condições meteorológicas se apresentavam favoráveis à ocorrência de fenómenos ligados à perturbação da montanha do Pico no escoamento. Embora não seja um registo muito exaustivo traz-nos a possibilidade de comparar o vento nas duas pistas do Pico, uma vez que estamos perante relatórios completos. Os dados fornecidos pelo I.M. apenas contemplaram a parte do vento, deixando de fora o restante METAR, onde na parte das notas se inclui o reporte do vento medido pelos sensores instalados próximo da cabeceira das duas pistas. Os dados que recebemos do I.M., presentes no corpo normal de um relatório METAR, relatam o vento medido por um terceiro sensor, situado a meio do aeroporto. Assim, com os relatórios METAR completos, é possível detectar algumas situações interessantes com variações significativas de vento, quer na direcção, das quais não temos informação nos dados fornecidos pelo I.M., quer de intensidade e ainda de diferenças significativas nas duas pistas.

## **2.2. Construção de um modelo da Ilha do Pico**

O primeiro passo para a construção de um modelo da ilha do Pico foi obter informação geográfica da ilha em formato digital. Essa informação foi tratada com o software ArcView, de modo a obtermos uma impressão de determinadas curvas de nível da ilha, à escala escolhida. A construção de um modelo da ilha do Pico foi limitada à partida pela secção de teste do túnel de vento disponível. Inicialmente ponderou-se uma escala que permitisse que toda a ilha coubesse dentro da secção de teste, mas dado o comprimento da mesma, isto implicava uma elevação máxima muito reduzida. Assim optou-se pela construção a uma escala de 1 para 30000. Desta forma, a ilha tem de ser cortada e apenas a secção da montanha cabe na secção de teste.

Optou-se por construir o modelo com camadas de placa de fibra de madeira de média densidade (MDF), que estavam disponíveis no mercado local, com a espessura de 4 milímetros. Deste modo, imprimiram-se curvas de nível a cada 120 metros, para se manter uma escala vertical igual à horizontal e cortaram-se as placas de acordo com as mesmas. As placas foram cuidadosamente coladas em sequência, de modo a se conseguir uma réplica fiel do relevo da ilha. Como na camada limite atmosférica estamos perante um escoamento turbulento e na ilha existem muita rugosidade no terreno, árvores, casas, pequenas elevações, optou-se por deixar o modelo com

degraus a cada curva de nível representada de modo a adicionar alguma rugosidade ao modelo favorável à simulação do escoamento turbulento junto da superfície.

Obteve-se um modelo com 7,6 cm de altura e cerca de 140 cm de comprimento. Como o comprimento máximo da ilha se dá num eixo aproximadamente Oés-noroeste – És-sudeste e se pretende visualizar o escoamento do quadrante Sul, o comprimento da ilha tem de ficar sobre a largura do túnel de vento, que é de apenas 80 cm. Sendo assim, cortou-se o modelo em 5 peças de modo a que caiba na secção de teste em 3 posições diferentes, simulando ventos de Sudoeste, Sul e Sudeste, ficando a ponta leste da ilha sempre fora da secção de testes. Embora este facto possa ter algum efeito nos resultados obtidos, considerou-se ser a melhor opção, uma vez que com ventos do quadrante que se pretende estudar, o escoamento nessa parte da ilha não terá grande influência na operação de aeronaves no aeroporto do Pico.

Inicialmente, pensou-se em tentar obter algumas medições de pressão estática no eixo da pista, e como esta se encontra ao nível do mar, foi necessário criar uma base onde se pudessem fazer os furos para estes sensores, uma vez que a primeira placa do modelo começa nos 120 metros e não deve haver uma placa com a curva de nível equivalente à costa porque não queremos que exista um degrau ao nível do mar. Assim, cortou-se uma base em madeira MDF de 16 mm de espessura, com o tamanho da base da secção de teste, de modo a se instalem tubos para as tomadas de pressão no eixo da pista para as três posições a testar embutidos na mesma. O modelo assenta nesta base sobre referências nela desenhadas que incluem a posição da pista do Pico. As beiras da base foram cortadas num ângulo de 7 graus, de forma a não causarem o deslocamento do escoamento. Durante os primeiros testes, devido à presença de alguma turbulência significativa junto do chão do túnel de vento, decidiu-se disfarçar ainda mais este declive de forma a reduzir possíveis perturbações.

A base é segura ao túnel de vento por meio de parafusos no centro e as suas extremidades foram coladas ao fundo do túnel de vento, ajudando a evitar a passagem de ar por baixo da mesma. O modelo da ilha fixa-se a esta base por meio de parafusos embutidos na sua superfície.

### **2.3. Simulação em túnel de vento**

O túnel de vento utilizado, fabricado pela EReME, é aspirado e aberto sendo capaz de produzir escoamentos com velocidades até 30 m/s. A secção de teste tem 150 cm de comprimento e 80 cm de altura e largura.

Para se proceder à visualização do escoamento, tentou-se a utilização de fumos e uma folha de laser para identificar fenómenos de turbulência. Infelizmente, dada a configuração do túnel de vento, não foi possível alinhar a folha de laser com o escoamento e a informação proveniente da visualização numa direcção transversal ao escoamento não foi de grande valor. Assim, optou-se por tentar a visualização através da introdução de fumo em bandas individuais. Inicialmente experimentou-se utilizar pentes de fumo na horizontal e vertical, mas devido às pequenas aberturas na secção de teste, o diâmetro dos tubos utilizados revelou-se muito pequeno, fomentando a condensação do fumo no seu interior, limitando a sua intensidade e dificultando bastante a visualização. Para resolver este problema furou-se um tubo de diâmetro considerável que se colocou à entrada do túnel de vento, sendo possível mudar a sua posição ao longo da largura e altura do túnel de vento, criando na secção de teste uma cortina de fumos com estrias visíveis, facilitando a identificação de influências do modelo no escoamento.

Para facilitar a visualização forrou-se um dos lados da secção de teste com cartolina preta e testou-se vários tipos de iluminação artificial ao longo de várias alturas do dia para se otimizar a visibilidade dos fenómenos. Para se obter as melhores imagens de vídeo, utilizamos um foco de luz branca, posicionado de forma a minimizar os reflexos no *plexiglass*, de que são feitas as tampas amovíveis da secção de teste, e as filmagens foram efectuadas após o pôr-do-sol. No caso das fotos, o flash da máquina revelou ser o meio de iluminação artificial que menos reflexos apresentou, permitindo a obtenção de imagens nítidas dos turbilhões gerados pelo modelo. No entanto, foi necessário encostar a lente ao *plexiglass*, o que diminui um pouco o campo de visão em relação às imagens obtidas com a câmara de vídeo.

Fizeram-se visualizações a diferentes velocidades e com a cortina de fumos em diferentes posições, de forma a ser possível observar a distribuição de fenómenos de turbulência por toda a largura secção de teste.

Após as primeiras visualizações, sentiu-se necessidade de controlar a camada limite, por estarem a aparecer turbilhões significativos junto ao solo. Assim, decidiu-se utilizar um arame de transição à entrada da secção de teste, de modo a garantir uma camada limite turbulenta, aproximando a camada limite atmosférica, que é por natureza turbulenta, mas principalmente possibilitando um perfil de velocidades mais cheio, o que melhorou as condições para a visualização do escoamento devido à mudança de escala da turbulência.

### 3. Resultados

#### 3.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos através da análise dos dados meteorológicos, fornecidos pelo Instituto de Meteorologia, identificando-se tendências de alteração no comportamento dos ventos que se poderão atribuir à presença da montanha do Pico. Vemos também exemplos de visualização do escoamento em torno da ilha através da observação dos seus efeitos no meio envolvente. Finalmente, dá-se conta dos fenómenos que se conseguiram identificar na simulação em túnel de vento.

#### 3.2. Análise dos METAR de 2007 do Pico e Horta

As primeiras informações obtidas através dos METAR de 2007 do Pico e Horta foram a distribuição do vento pelas 8 principais direcções da rosa-dos-ventos, ilustrada no gráfico 1.

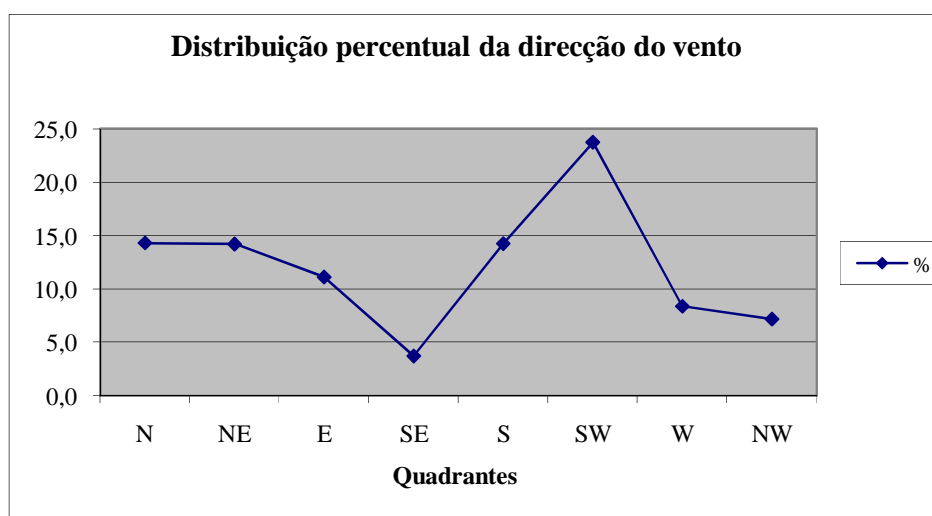


Gráfico 1 Predominância dos ventos no Pico

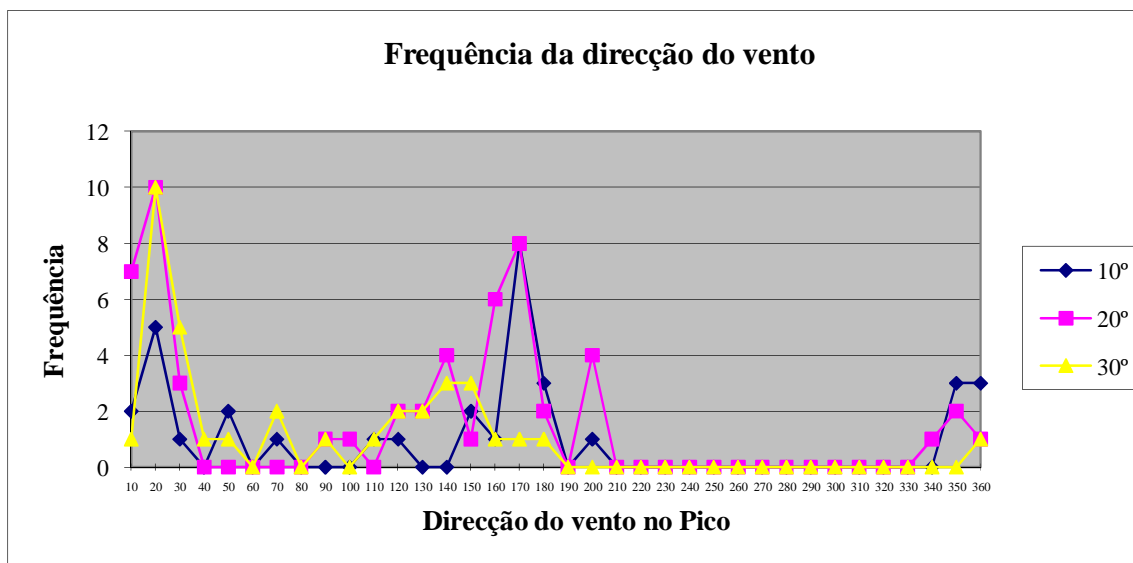
Como já foi referido o vento predominante é o do quadrante Sudoeste, que conta com 23,7% das ocorrências registadas nos METAR analisados. Esta situação demonstra que, embora os dados recolhidos não sejam muito extensivos, limitando-se aos relatórios emitidos em 2007, já estamos perante uma amostra significativa o suficiente para as estatísticas se aproximarem bastante das obtidas pelos registos de observações recolhidas durante 10 anos, apresentadas na introdução. Vemos também que 41,6% dos registos relatam vento das direcções mais limitativas à operação no

Pico, reforçando o interesse em que se perceba quando é que estes ventos se tornam perigosos na zona do aeroporto.

### **3.2.1. Variações na direcção do vento**

Os dados fornecidos pelo Instituto de Meteorologia foram tratados estatisticamente e organizados de forma a se perceber que direcção de vento prevalece no aeroporto do Pico para cada direcção de vento registada no aeroporto da Horta. Escolheu-se esta relação porque o Pico tem problemas com vento do quadrante Sul e, com o vento dessa direcção, o escoamento chega ao aeroporto da Horta praticamente sem sofrer perturbações, uma vez que este se situa na costa Sul da Ilha do Faial. Deste modo, pode ser possível notar a influência da montanha no vento registado no Pico porque grandes diferenças na direcção nos dois aeroportos podem ser atribuídas aos fenómenos criados por influência da ilha, sem se estar a fazer uma correlação muito arrojada.

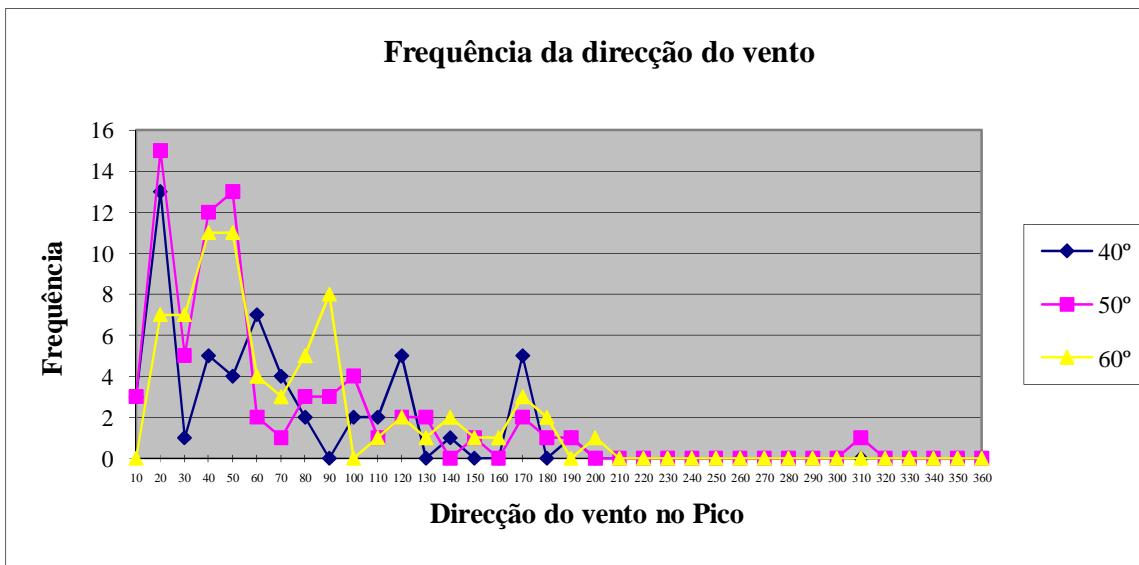
Assim, construíram-se gráficos onde no eixo horizontal estão representadas as direcções de vento presentes no aeroporto do Pico para cada direcção de vento na Horta. Isto é, para cada uma das 36 direcções de vento registadas nos relatórios METAR da Horta temos um gráfico onde aparecem as direcções de vento presentes no relatório METAR do Pico. Tomando de exemplo o primeiro gráfico, temos 34 registos de vento na Horta da direcção Norte, 10 graus. Foram analisados os 34 registos do Pico feitos no mesmo dia e à mesma hora que os da Horta, onde a direcção do vento era 10 graus e verificou-se qual a direcção de onde o vento soprava no Pico. Assim obtém-se uma distribuição da frequência da ocorrência de ventos de diferentes direcções no Pico, quando o vento se apresenta de 10 graus na Horta. Para não saturar muitas páginas com gráficos, são apresentados alguns dos dados para mais do que uma direcção de vento na Horta sobrepostos no mesmo gráfico. Agruparam-se apenas ventos com efeitos similares no Pico de modo a não tornar as representações muito confusas.



**Gráfico 2 Distribuição do vento no Pico com vento de 10, 20 e 30 graus na Horta**

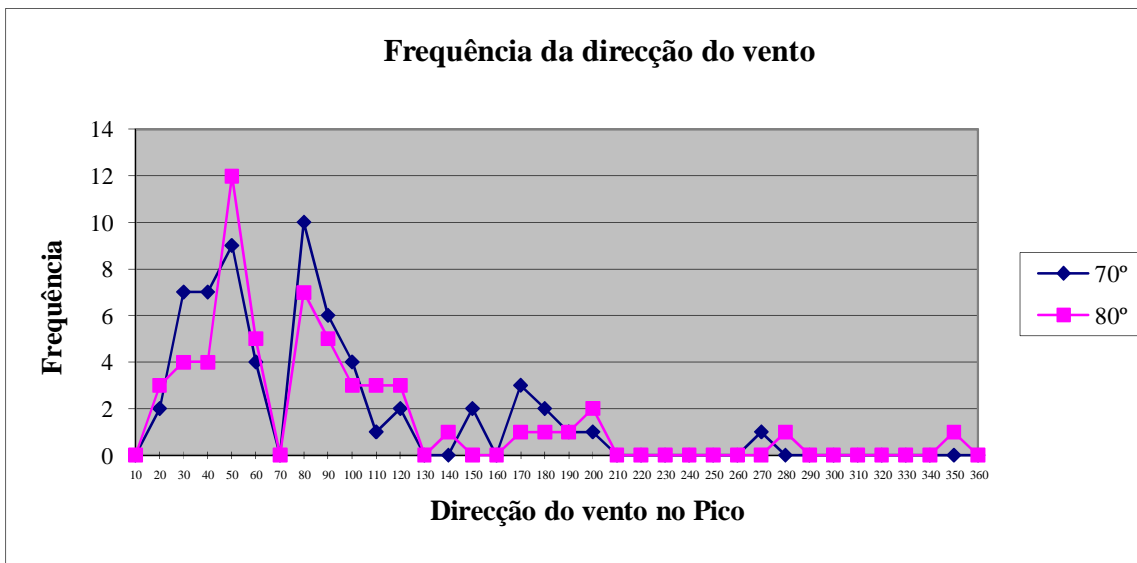
Quando o vento se apresenta de entre 10 graus a 30 graus na Horta podemos ver que há uma frequência relativamente elevada de vento do quadrante Sul no Pico. Estas condições só acontecem com ventos de intensidade inferior a 10 nós e não são por isso indicadores de fenómenos perigosos para a aviação, mas denotam que embora as duas ilhas estejam bastante próximas, podem desenvolver-se fenómenos locais que tornam as condições atmosféricas distintas.

Com vento mais forte prevalecem direcções aproximadamente iguais às registadas no Faial. Pelo menos algumas das grandes diferenças na direcção do vento entre o Pico e o Faial neste quadrante podem ser devidas a perturbações no escoamento por influência da ilha do Faial, alterando as condições no seu aeroporto. Não tem grande interesse aprofundar a análise do que possa estar a acontecer com estas direcções de vento porque não são problemáticas à operação no Pico.



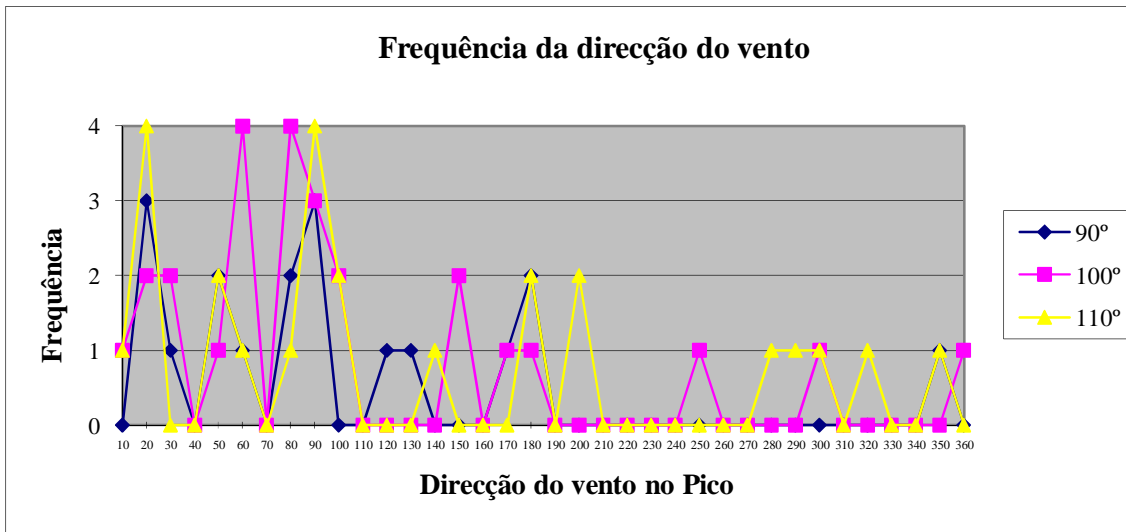
**Gráfico 3 Distribuição do vento no Pico com vento de 40, 50 e 60 graus na Horta**

À medida que os ventos se tornam de Nordeste na Horta, de 40 a 60 graus, diminui a ocorrência de ventos do quadrante sul no Pico, mesmo com vento fraco, e passam a dominar ventos de direcção próxima à que se verifica no Faial, embora se note um pequeno desvio de direcção para Norte, ou seja dominam direcções de vento no Pico ligeiramente inferiores às medidas no aeroporto da Horta, o que se traduz por um desvio para a esquerda dos pontos mais elevados do gráfico em relação à direcção de referência. Isto pode ter a ver com uma rotação na direcção do escoamento à medida que contorna a montanha do Pico, mas também pode ser relacionado com uma mudança da direcção do escoamento no aeroporto da Horta, influenciado pela ilha do Faial.



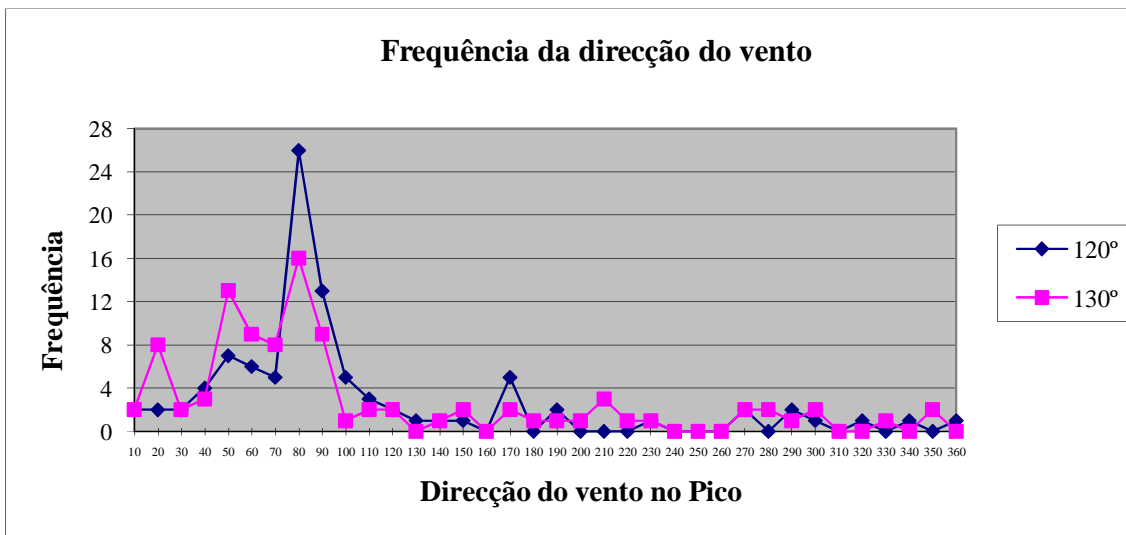
**Gráfico 4 Distribuição do vento no Pico com vento de 70 e 80 graus na Horta**

De 070 e 080 graus a distribuição da direcção do vento no pico anda em torno das direcções no Faial, embora se verifique um número significativo de ocorrências espalhadas por uma gama de direcções relativamente grande. No entanto essa variação mantém-se no quadrante Nordeste que não implicam grandes limitações à operação no Pico. Será interessante notar a ausência de registos da direcção 70 graus no Pico para estas condições no Faial, embora não seja possível determinar a sua causa a partir dos dados disponíveis. De qualquer forma estamos ainda num quadrante onde a ilha do Faial pode influenciar o escoamento no seu aeroporto.



**Gráfico 5 Distribuição do vento no Pico com vento de 90, 100 e 110 graus na Horta**

O vento de Este é o mais raro no Pico e na Horta, como tal as frequências diminuem bastante e é mais difícil encontrar uma tendência geral com apenas um ano de medições. No entanto o vento parece manter-se no mesmo quadrante que na Horta e mais uma vez deve notar-se que as grandes discrepâncias são fenómenos isolados que muitas vezes tem a ver com vento fraco e variável.



**Gráfico 6 Distribuição do vento no Pico com vento de 120 e 130 graus na Horta**

À medida que vamos chegando ao vento de Sudeste é notável um desvio nas direcções mais frequentes no Pico, para a esquerda do gráfico. Estamos a entrar num quadrante onde o vento na Horta chega ao aeroporto praticamente imperturbado, porque vem do mar e, deste modo, podemos

facilmente atribuir esta mudança na direcção do vento no Pico à influência que a montanha tem no escoamento.

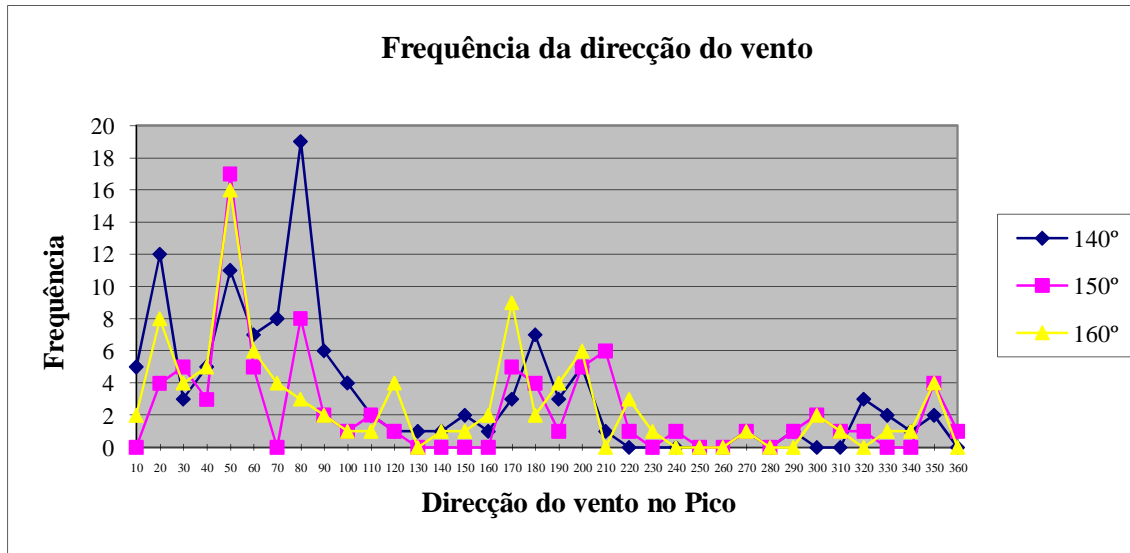
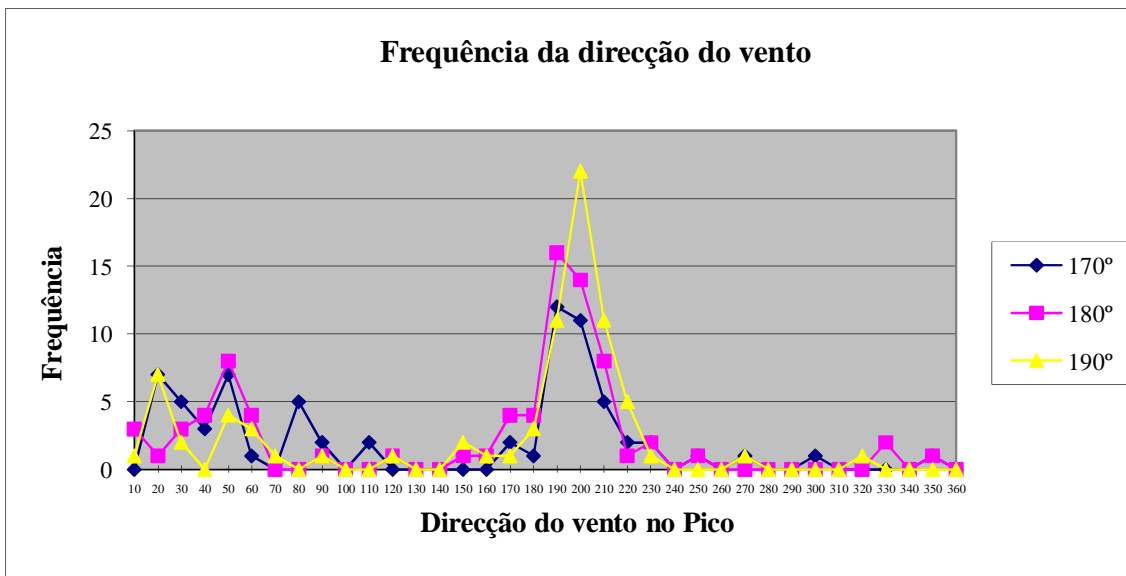


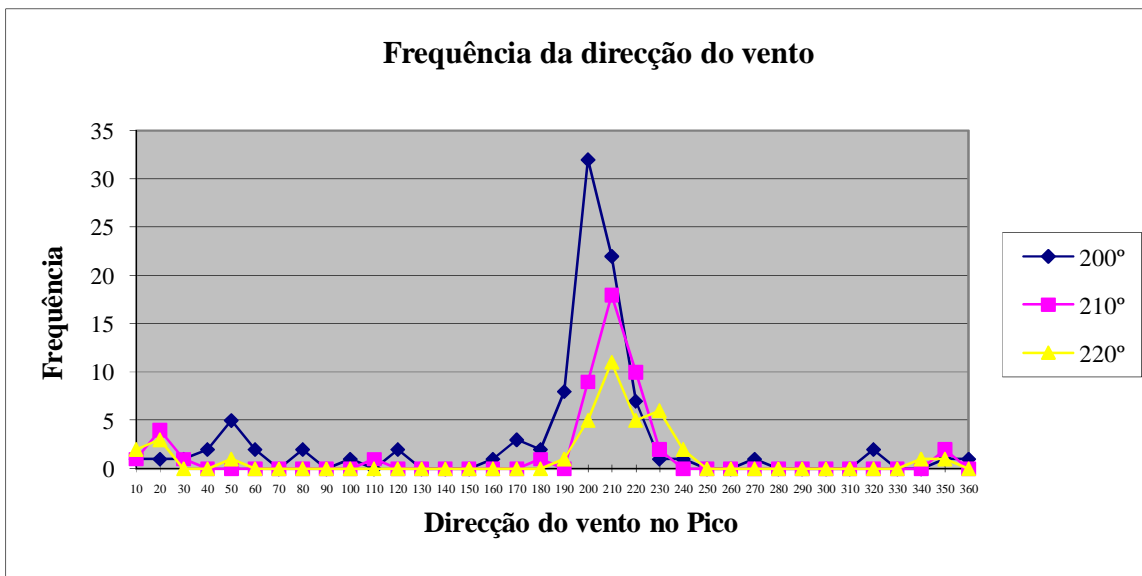
Gráfico 7 Distribuição do vento no Pico com vento de 140, 150 e 160 graus na Horta

De 140 a 160 graus, o desvio das direcções predominantes no Pico em relação à registada no Faial torna-se ainda mais significativa, chegando mesmo a se tornarem ventos de quase direcções opostas. Como esta direcção coloca o Pico mesmo a montante do aeroporto, podemos estar perante a evidência de um fenómeno de reversão do escoamento, tal como rotores ou vórtices de esteira. No entanto já começam a aparecer algumas frequências com direcção próxima da registada na Horta, o que leva a querer que estes fenómenos não dependem só da direcção do vento. Ao contrário do que se passa com o vento Norte, os registos de direcções no Pico bem afastadas da direcção do vento no Faial, não se limitam a ventos de fraca intensidade, aliás é mais frequente o vento estar fraco quando se registam as direcções similares nas duas ilhas para ventos deste quadrante.



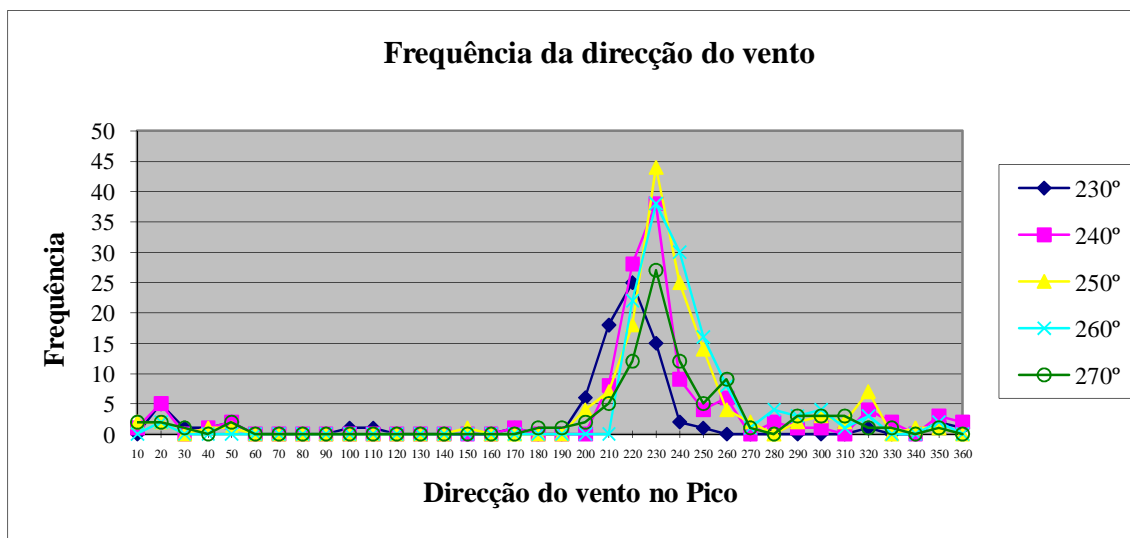
**Gráfico 8 Distribuição do vento no Pico com vento de 170, 180 e 190 graus na Horta**

Com o vento a chegar a Sul nota-se que a tendência para haver ventos de direcção oposta no Pico começa a desaparecer e passam a dominar direcções idênticas às medidas na Horta, se bem que é possível notar um desvio das direcções predominantes no Pico para a direita do gráfico. Este desvio não é muito significativo mas aparenta ser consistente.



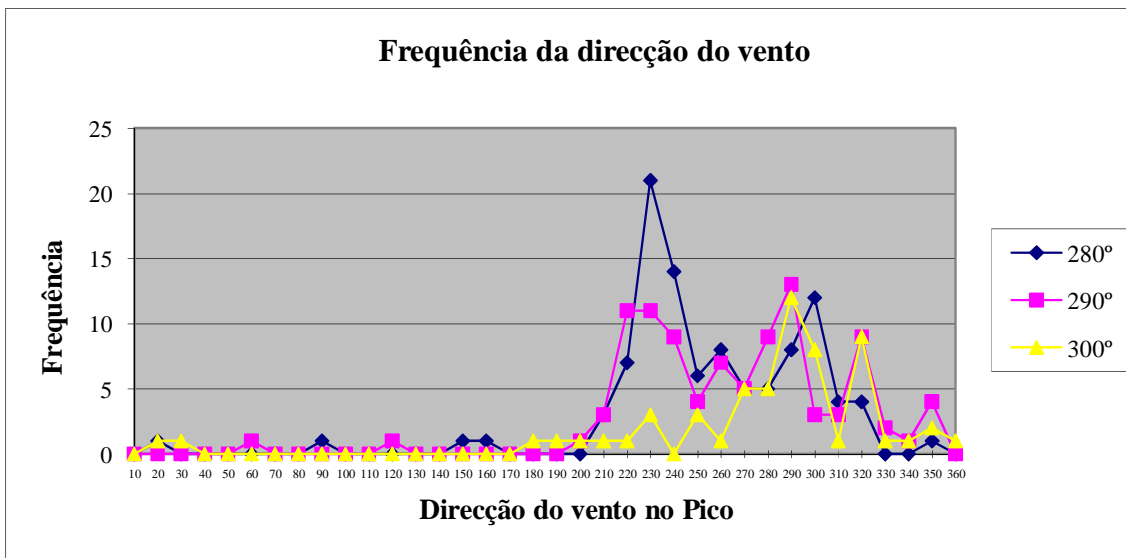
**Gráfico 9 Distribuição do vento no Pico com vento de 200, 210 e 220 graus na Horta**

De 200 a 220 graus, praticamente não há discrepâncias entre as direcções de vento no Pico e as que se verificam no Faial, estando as frequências no Pico centradas na direcção que ocorre na Horta e apresentando uma distribuição restrita a algumas dezenas de graus.



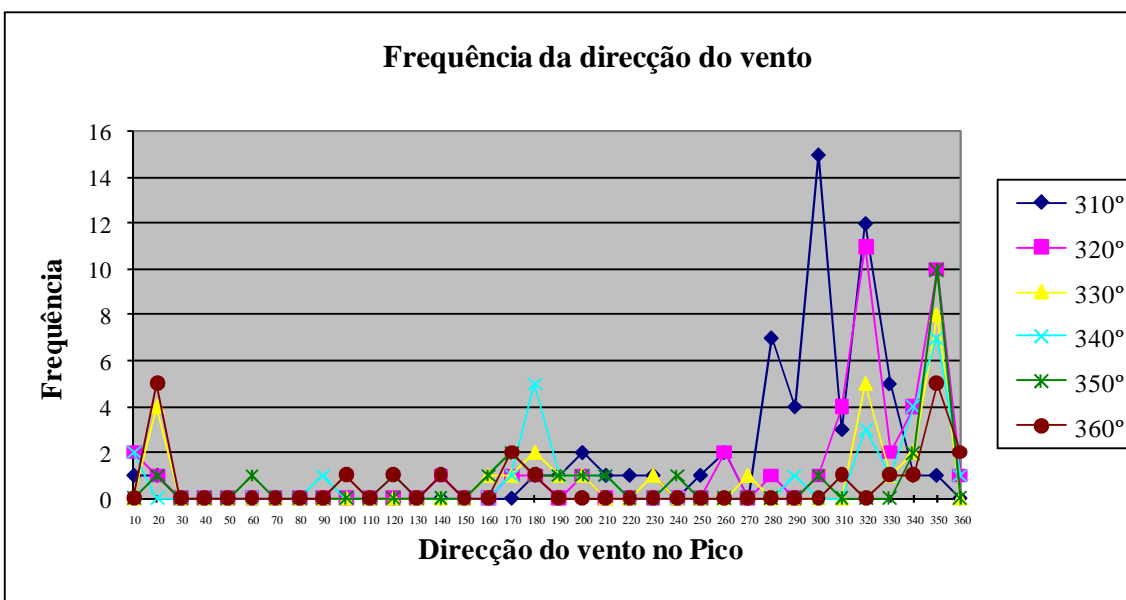
**Gráfico 10 Distribuição do vento no Pico com vento de 230, 240, 250, 260 e 270 graus na Horta**

Com vento de sudoeste a oeste, a distribuição das direcções do vento no Pico continuam a concentrar-se, mas essa distribuição passa a fazer-se em torno de uma direcção à esquerda do que a que se verifica na Horta. À medida que o vento roda para oeste no Faial, a direcção com maior frequência no pico mantém-se nos 230 graus. Este é o vento dominante no Pico e como tal há um maior número de medições deste quadrante, demarcando claramente a tendência da mudança de direcção do vento do Faial para o Pico. Considerando um escoamento idealizado à volta de um obstáculo, podemos imaginar linhas de corrente em torno do Pico, que teriam um desvio similar ao que se pode observar pelos gráficos. Este desvio é um fenómeno de grande relevância para a operação no aeroporto do Pico, uma vez que torna a direcção do vento que se faz sentir no aeroporto mais limitativa, isto é, se o vento se apresentar de Sudoeste em geral, é de esperar que o efeito do Pico rode a direcção do mesmo na zona do aeroporto passando a apresentar-se mais próximo de Sul que é o vento mais restritivo à operação no Pico. Por outro lado, a concentração das direcções no Pico, pode indicar uma certa estabilidade neste tipo de ventos em contraste com os de Sudeste.



**Gráfico 11 Distribuição do vento no Pico com vento de 280, 290 e 300 graus na Horta**

Com ventos de 280 a 300 graus começa-se a entrar num quadrante onde se tem de ter de novo em conta a influência da ilha do Faial nas medições desta ilha, o que provavelmente explica a uma maior dispersão das direcções no Pico. Ainda assim continuam-se a registar um considerável número de frequências de direcções em torno dos 230 graus no Pico, bem à direita do que se faz sentir na Horta.



**Gráfico 12 Distribuição do vento no Pico com vento de 310, 320, 330, 340, 350 e 360 graus na Horta**

Finalmente, com vento de noroeste a norte as direcções de vento no Pico voltam a estar distribuídas em torno da direcção medida na Horta e mais uma vez o vento é menos frequente e

como tal, poucos dias atípicos ou com vento fraco com muita influência na direcção do vento acabam por parecer mais significativas em alguns gráficos, mas não podem ser vistas como indicadores da ocorrência de algum fenómeno de perturbação do escoamento no Pico, sendo mais provável que estas variações neste quadrante sejam devidas a perturbações no Faial do que no Pico.

Com estes gráficos facilmente se observa algumas das alterações que o vento sofre ao escoar em torno da ilha do Pico. Com vento Sudoeste está bem marcada uma mudança de direcção e com vento de Sudeste é notória a instabilidade que vai aparecer na zona do aeroporto. Porque se consegue identificar a presença destes fenómenos podemos dizer que outros efeitos relacionados com escoamentos em terreno montanhoso têm uma grande probabilidade de também estarem presentes.

### **3.2.2. Variações na intensidade do vento**

Com os dados dos METAR de 2007 comparou-se ainda a intensidade do vento registada nas duas ilhas. Como já foi referido, em caso de registo de rajada, foi esse o valor utilizado para calcular a média da intensidade do vento para cada direcção. Mais uma vez, como o que nos interessa é o efeito do Pico no escoamento, construiu-se um gráfico onde no eixo horizontal temos a direcção do vento no Pico e na vertical temos a variação da intensidade média do vento no Pico, em relação à intensidade média do vento no Faial. Assim, ao contrário dos gráficos anteriores em que se fixava a direcção do vento na Horta para observar o comportamento no Pico, fixamos a direcção do vento no Pico e analisa-se apenas a intensidade do vento nas duas ilhas, sem tomar em consideração a direcção do vento no Faial. A intensidade relativa do vento é obtida fazendo a média das intensidades para cada uma das direcções no Pico e a média de cada registo correspondente da Horta. Subtrai-se a intensidade média da Horta à do Pico e obtém-se um valor indicativo da influência da ilha do Pico na intensidade do vento na zona do aeroporto.

Assim, podemos facilmente concluir através da observação do gráfico 13, que o escoamento é afectado pelo Pico, não só na sua direcção, mas também na sua intensidade. Quando o vento se encontra de Sul a Sudoeste nota-se bastante uma aceleração no escoamento no Pico em relação ao vento que se faz sentir na Horta. Dez nós de intensidade a mais em média é um valor muito significativo, ainda para mais quando esta aceleração manifesta-se, na zona do aeroporto, com ventos do quadrante mais limitativo. É de se esperar que esta aceleração esteja sempre presente algures a jusante da montanha, o que quer dizer que, com outras direcções de vento, ela estará muito provavelmente presente noutras zonas da ilha. Um caso potencialmente mais perigoso, será com vento do quadrante Sudeste, em que embora não se note uma maior intensidade do vento no aeroporto, temos uma possível reversão no escoamento, como se pode ver nos gráficos da direcção

do vento, e é de esperar que ventos com maior intensidade estejam também presentes nas zonas de aproximação com vento desta direcção, criando um potencial acrescido para situações de *wind shear*. Não temos mais dados que suportem esta ideia porque todos os anemómetros se situam no aeroporto. Esta aceleração é facilmente atribuída a tempestades de vento a jusante e outros efeitos de aceleração em escoamentos em torno de picos isolados, discutidos na introdução.

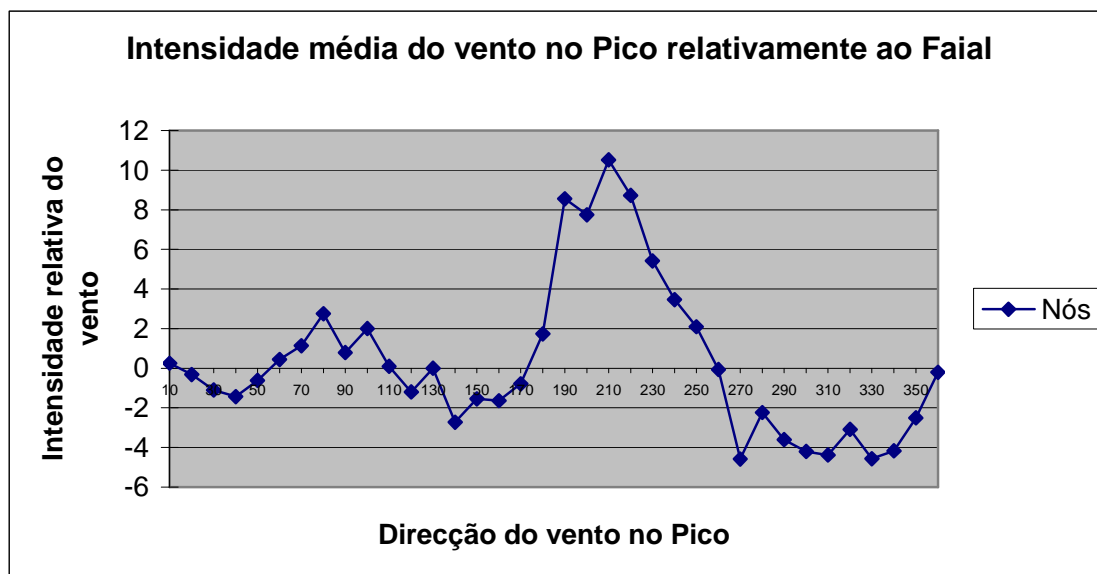


Gráfico 13 Relação entre a intensidade dos ventos no Pico e Faial

Com vento do quadrante Noroeste, nota-se uma redução já significativa da velocidade do vento no Pico em relação ao Faial. Este fenómeno pode aparecer devido à aceleração do vento na Horta, uma vez que deste quadrante é influenciado pela ilha do Faial, podendo também existir lá um aumento da intensidade local, ou pode ser ainda provocado por um efeito tipo aproximação de um ponto de estagnação à medida que o escoamento se aproxima do obstáculo, que é a montanha do Pico.

### 3.3. Análise de METAR's específicos

Depois da análise feita atrás, ficam aqui mais alguns relatórios METAR em particular, recolhidos em dias de vento com características problemáticas à operação no Pico em 2008 e 2009, para realçar alguns efeitos comuns que são assim mais visíveis.

Para isso convém esclarecer resumidamente o formato destes relatórios. Estes relatórios estão divididos em grupos. O primeiro grupo identifica o aeroporto onde foram recolhidos os dados,

o segundo dá o dia e a hora, o terceiro indica o vento, marcado pelas letras KT, que indicam a unidade de medida, o nó. Neste grupo, que mais nos interessa, os três primeiros dígitos correspondem à direcção do vento, os outros 2 à sua velocidade e em caso de rajadas segue-se a letra G e mais dois dígitos, correspondentes à intensidade da rajada. Se o vento estiver a variar mais de 60 graus os extremos da variação aparecem de seguida separados por um V. O resto de relatório dá indicações sobre a visibilidade, nuvens, temperatura e pressão. No final, marcado pelas letras RMK, aparecem notas, que no caso do Pico, incluem os dados de vento recolhidos nas duas pistas no mesmo formato anteriormente explicado.

Assim vejamos os seguintes METAR:

```
LPPI 121400Z /////KT 9999 FEW012 BKN025 21/16 Q1027 RMK RWY09 11020KT  
080V140 RWY27 09022G30KT 050V120  
LPHR 121400Z 12016KT 9999 SCT012 21/18 Q1028
```

Podemos ver que os dados foram recolhidos no Pico, LPPI é o seu código ICAO, no dia 12 às 14 horas, de seguida onde deveríamos ter o vento estão barras uma vez que o anemómetro central esteve fora de serviço durante bastante tempo, em seguida vem a visibilidade, mais de 10km uma vez que só se reportam visibilidades inferiores a 9000 metros, depois vem o grupo das nuvens com poucas a 1200 pés e muitas 2500 pés, temperatura 21 graus e ponto de orvalho 16, pressão ao nível do mar 1027 milibares e finalmente a nota com o vento na pista 09 de 110 graus com 20 nós variando de 80 graus a 140 graus, e na pista 27 vento de 90 graus com 22 nós, rajada de 30 nós com variação de 50 a 120 graus. Logo abaixo está o METAR da Horta da mesma hora onde se pode ver que o vento estava de 120 graus com 16 nós.

Comparando os dois salta, à vista uma aceleração do escoamento com o vento significativamente mais forte no aeroporto do Pico, apresentando também alguma variação.

```
LPPI 161700Z /////KT 9999 SCT015 SCT020 BKN200 20/14 Q1014 RMK RWY09  
08020G30KT 050V110 RWY27 07016G27KT  
LPHR 161700Z 13021KT 9999 FEW020 SCT050 BKN200 21/18 Q1014
```

Nos METAR acima, com o vento na Horta de 130 graus, continuamos a ver uma aceleração do vento no Pico e é bem visível um desvio na direcção do mesmo.

No próximo grupo de relatórios a direcção na Horta roda para sul mais 10 graus e começa-se a notar efeitos mais marcantes.

LPPI 161000Z /////KT 9999 SCT015 FEW018CB BKN100 18/15 Q1013 RMK RWY09  
16018KT RWY27 16017G32KT 130V190  
LPHR 161000Z 14010KT 8000 VCSH BKN012 BKN030 19/19 Q1014

LPPI 101700Z /////KT 9999 FEW012 SCT025 18/10 Q1016 RMK RWY09 02012KT  
350V050 RWY27 03007KT 300V360  
LPHR 101700Z 14013KT 9999 SCT012 SCT030 17/14 Q1016

LPPI 111400Z /////KT 9999 -SHRA SCT012 SCT020 BKN200 19/13 Q1010 RMK  
RWY09 33012KT 230V070 RWY27 06016G29KT 340V140  
LPHR 111400Z 14016KT 9999 SCT008 SCT012 17/16 Q1011

LPPI 111430Z /////KT 9999 -SHRA SCT012 SCT020 BKN200 19/13 Q1009 RMK  
RWY09 09012KT 360V180 RWY27 06016G40KT 340V140  
LPHR 111430Z 14017KT 9000 SCT008 BKN012 17/15 Q1011

Com esta direcção na Horta notam-se variações significativas das direcções do vento no Pico, que tanto se mantém de sudeste com um aumento significativo da sua intensidade, como está de norte com intensidade parecida, que é o que se pode ver no primeiro e segundo grupo. Mais interessante ainda é o terceiro grupo, onde na pista 09 o vento médio está de 330 graus com uma variação de 200 graus, ou seja está extremamente variável, tanto dá vento de cauda como de frente nessa pista e com uma intensidade já significativa de 12 nós, no entanto na pista 27 o vento já está de 060 graus, variando 160 graus entre os 340 e os 140 graus com rajadas de 29 nós! Isto é indicação de turbulência severa e estamos provavelmente na presença de um rotor sobre o aeroporto ou outro tipo de fenómeno que provoque a inversão local do escoamento. De notar que dadas as direcções em que o vento está a soprar, estas condições são consideradas dentro dos limites, segundo os limites recomendados actualmente estabelecidos, e no entanto estamos perante uma situação potencialmente perigosa para a operação de aeronaves. No último METAR deste grupo, estamos perante uma situação de grande variação com rajadas muito fortes e de diferença considerável em relação ao vento médio, desta vez as duas pistas tem medidas mais próximas na direcção, mas há uma diferença significativa na intensidade, continua a ser uma situação que faz adivinhar grandes dificuldades à operação. Os dois últimos METAR tem a particularidade de terem sido recolhidos com um intervalo de meia hora entre eles, uma indicação de que os fenómenos que provocam estas variações não serão estacionários e nada garante que não existam condições deste tipo nas zonas das aproximações onde não há registos de vento.

Quando a direcção do vento na Horta cresce mais 10 graus a situação mantém-se semelhante ao que vimos no grupo anterior, mudanças muito significativas na direcção e intensidade o vento. De realçar mais uma vez os valores praticamente opostos nas suas pistas claramente visíveis nos próximos METAR.

LPPI 161100Z /////KT 9999 SCT015 FEW020TCU 20/14 Q1013 RMK RWY09  
35016G26KT 320V020 RWY27 35012G22KT 320V020  
LPHR 161100Z 15018KT 8000 VCSH BKN013 BKN040 20/18 Q1015 RERA

Aqui realça-se a direcção do vento que passa de sul no Faial para Norte no Pico com intensidade moderada.

LPPI 301700Z /////KT 9999 FEW012 SCT025 BKN200 20/13 Q1012 RMK RWY09  
18018G30KT 080V280 RWY27 06015G22KT 320V160  
LPHR 301700Z 15016KT 2000 -RA SCT007 SCT011 BKN030 16/15 Q1013

LPPI 111100Z /////KT 9999 FEW014 SCT033 BKN200 17/09 Q1016 RMK RWY09  
18017KT 120V240 RWY27 02020G30KT 320V080  
LPHR 111100Z 15022KT 9999 -DZ FEW010 SCT022 BKN100 16/12 Q1018

Estes dois grupos de METAR mostram um marcado contraste na direcção do vento nas duas pistas, no primeiro deles variando na pista 09 por toda a metade sul da rosa-dos-ventos enquanto na 27 roda por toda a metade este. Será de interesse notar que embora neste caso o vento se apresente fora dos limites recomendados registou-se a aterragem de um ATP, o que pode ser outra indicação da natureza fugaz e localizada destes fenómenos.

Estas variações extremas só costumam aparecer com ventos na Horta entre os 130 e os 160 graus, pelo que será aconselhável ter especial atenção quando os ventos sopram destas direcções com intensidade superior a 10 nós na Horta, pois há uma forte possibilidade de encontro com turbulência forte na aproximação ao Pico. Será assim uma mais-valia ter a bordo informações meteorológicas do aeroporto da Horta para complementar as do Pico nestas situações.

À medida que o vento chega a Sul na Horta o vento tem tendência a estabilizar no Pico com uma pequena variação na ordem dos 60 graus e com um desvio em relação à direcção na Horta. Sempre presente está a aceleração do vento no Pico. Isto mesmo se pode verificar nos METAR seguintes.

LPPI 141500Z /////KT 6000 SHRA SCT010 SCT015 BKN200 19/17 Q1017 RMK RWY09  
20020G30KT 170V230 RWY27 20020G30KT 170V230  
LPHR 141500Z 18020KT 9999 SCT012 SCT100 BKN200 21/19 Q1018

LPPI 141700Z /////KT 9000 SHRA SCT012 BKN018 BKN200 19/16 Q1016 RMK  
RWY09 20018KT 170V230 RWY27 20017G27KT 170V230  
LPHR 141700Z 18020KT 9999 BKN012 BKN200 21/19 Q1017

LPPI 141200Z /////KT 9999 SCT012 SCT020TCU BKN200 20/17 Q1018 RMK RWY09  
20020KT 170V230 RWY27 20018G30KT 170V230  
LPHR 141200Z 19018KT 9999 SCT012 FEW014TCU SCT030 BKN200 21/19 Q1020

LPPI 151030Z /////KT 4000 RA SCT005 OVC010 17/16 Q1013 RMK RWY09 21016KT  
180V240 RWY27 22016G26KT 190V250  
LPHR 151030Z 20017KT 8000 -SHRA BKN011 BKN100 19/18 Q1014

LPPI 151200Z /////KT 4000W SHRA FEW004 SCT008 BKN015 17/16 Q1014 RMK  
RWY09 25014KT 220V280 RWY27 26014KT 230V290  
LPHR 151200Z 20008KT 160V220 4000 -RA BR SCT005 SCT011 BKN030 18/17 Q1014

Assim pode ver-se que, embora se diga que o vento Sudoeste é o mais prejudicial para as operações no aeroporto do Pico, nota-se que alguns dos fenómenos por cima do aeroporto tendem a desaparecer, uma vez que deixam de se notar grandes discrepâncias na direcção dos ventos nas duas pistas e a variação da direcção não se compara às enormes excursões que se verificam com vento de Sudeste. No entanto será de prever que os fenómenos que antes se localizavam em cima do aeroporto fazendo-se reflectir nos relatórios METAR não tenham desaparecido, estando possivelmente algures na final para a pista 27, pelo que será de antever que seja muito provável que se encontre turbulência forte na final. Embora seja sempre necessário tomar precauções no sentido de evitar estas zonas, não será tão perigoso para a operação encontrar turbulência a alguma altitude, em relação a encontrá-la mesmo por cima da pista, onde a margem de manobra para recuperação de atitudes anormais que se possam desenvolver é muito mais reduzida. De qualquer modo, os METAR do Pico continuam a apresentar uma aceleração do vento em relação ao que se registou na Horta, tal como se esperava pelos resultados obtidos com os dados de 2007.

Observemos finalmente um grupo de METAR com vento já quase de oeste:

LPPI 181700Z /////KT 9999 FEW012 BKN070 BKN100 24/20 Q1019 RMK RWY09  
22014KT RWY27 23016G26KT  
LPHR 181700Z 25012KT 9999 SCT012 BKN018 BKN100 23/20 Q1020

LPPI 111600Z /////KT 9999 FEW007 SCT012 BKN200 18/16 Q1018 RMK RWY09  
22018KT RWY27 23020KT  
LPHR 111600Z 25015KT 9999 SCT011 SCT030 BKN070 18/16 Q1019

LPPI 181500Z /////KT 9999 SCT012 BKN025 19/14 Q1023 RMK RWY27 24026G32KT  
LPHR 181500Z 26018KT 9999 FEW012 BKN200 20/16 Q1023

LPPI 221630Z /////KT 9999 SCT012 SCT020 BKN040 19/16 Q1019 RMK RWY27  
24032G42KT  
LPHR 221630Z 26019KT 9999 FEW010 BKN040 18/16 Q1021

LPPI 051700Z /////KT 9999 FEW005 SCT013 FEW015TCU BKN060 20/18 Q1014 RMK  
RWY09 24015KT RWY27 24017KT  
LPHR 051700Z 27011KT 9999 SCT006 SCT012 BKN200 19/17 Q1015

Mais uma vez podemos ver o desvio na direcção do Faial para o Pico, agora no pior sentido tornando o vento no Pico mais limitativo, e está presente o aumento de intensidade do vento, mas agora as variações na direcção do vento praticamente não existem. Isto pode indicar que, embora em alguns casos se excedam os limites recomendados não sejam de esperar grandes dificuldades nas manobras de aterragem e descolagem, dada a estabilidade do escoamento na zona do aeroporto.

De notar que, embora estes METAR sejam pouco representativos do que se passa por serem poucos e se resumirem as condições nos 10 minutos que antecedem as suas publicações, não deixam de ter o seu valor. É certo que as condições podem variar muito com ventos de uma determinada direcção na Horta, mas os METAR apresentados não são casos isolados. São antes pequenas amostras de fenómenos frequentes e representativos na área do aeroporto do Pico. No entanto, há que reconhecer as limitações de uma análise baseada apenas nestes dados.

### **3.4. Indicações visuais de fenómenos turbulentos no Pico**

Outra forma de visualizar o escoamento em torno da montanha do Pico é através da observação dos efeitos que esse escoamento tem no meio envolvente. A presença ou formação de nuvens na montanha pode ilustrar a forma como o vento a está a contornar e identificar zonas de alguma turbulência. Outra indicação visível de turbulência gerada pela montanha nas imediações do aeroporto é a espuma que se pode criar no mar, que por vezes até pode dar indicação de diferenças na direcção do vento. Assim, apresenta-se em seguida algumas fotos que ilustram alguns destes fenómenos e que podem ser uma boa ajuda às tripulações na identificação de condições que dificultem a operação.



**Figura 9 Aeroporto do Pico, foto virada a Su-sudeste com vento Sudoeste**

A figura 9 foi tirada na zona central do aeroporto, num dia de vento de Sudoeste. É possível visualizar um pouco do comportamento do escoamento, à medida que contorna a montanha. Vê-se o princípio de uma lenticular no topo da mesma, indicando escoamento praticamente laminar por cima e em torno as nuvens parecem tomar um sentido ligeiramente descendente dissipando-se à medida que entram na zona de esteira e apresentando sinais de turbulência, como se estivessem a desfazer-se em farrapos. Estas nuvens dão ainda uma ideia de aceleração à medida que passam pela montanha, sendo este efeito mais visível observando-se o movimento das mesmas enquanto se vão dissipando. Este tipo de condições faz pensar que a pior turbulência se encontrará do lado esquerdo da imagem, na zona mesmo a jusante da direcção geral do escoamento, no entanto pode ainda não ser severa, possibilitando a operação segura como dá a entender a presença da aeronave que se encontrava a operar neste dia.



**Figura 10 Chapéu com esteira, foto virada a Su-sudeste com vento Sudoeste**

A foto da figura 10 foi tirada na zona da cabeceira da pista 27 e as condições são similares às da figura 9, embora o vento possa ter rodado um pouco mais para oeste. Nesta imagem a cobertura de nuvens é maior e é gerada pela subida do ar em torno da montanha que condensa ao arrefecer. O maior interesse desta foto é a visualização de uma esteira que se forma a jusante. O escoamento em torno e por cima da montanha aparenta ser praticamente laminar, excepto quando se aproxima da esteira, onde se começa a perceber alguma turbulência que finalmente acaba por fazer dissipar por completo a nuvem.



**Figura 11 Lenticulares, foto virada a Este tirada na cabeceira da pista 27**

A figura 11 foi tirada com vento Sudoeste e são bem visíveis os altocumulos lenticulares que marcam os topos de ondas de montanha presas a jusante. Por baixo das mesmas notam-se ainda algumas nuvens esfarrapadas que podem estar a indicar a presença de um rotor e no mínimo indicam a presença de alguma turbulência. De referir que neste dia os ventos encontravam-se acima dos limites recomendados e não houve qualquer voo para a ilha. Como vimos, estas nuvens podem não estar sempre presentes marcando ondas de montanha pois requerem humidade no ar para se formarem. Nos dias em que isso acontece podem estender-se por grandes distâncias dando origem a imagens como a da figura 12, retirada do site da estação receptora de imagens de satélite da Universidade de Dundee, tirada a 2 de Janeiro de 2007, onde se podem ver os contornos da ilha do Pico e Faial a gerar um rasto de lenticulares marcando os topos de ondas de montanha numa extensão de aproximadamente 200 km. A noção da distância é dada pela ilha de S. Miguel também visível na foto. Pode ser interessante ainda notar que as ondas geradas pela ilha Terceira tem menor extensão que as que começam no Pico. Como se pode perceber pela propagação das ondas o vento estava de Su-sudoeste e através dos METAR sabe-se ainda que se registou no Pico uma intensidade média na ordem dos 27 nós, e rajada média de 39 nós atingindo os 45 nós, ou seja bem fora dos limites operacionais recomendados. No entanto, no Faial, registou-se no mesmo dia uma intensidade média de 18 nós sem registo de rajadas, uma possível indicação da presença de tempestades de vento descendente no Pico ou ainda alguma desaceleração no escoamento à medida que se aproxima da ilha do Faial.



**Figura 12 Imagem de satélite com lenticulares a marcar ondas de montanha**



**Figura 13 Vista aérea do aeroporto, foto virada a Sudeste com vento Sudeste**

Na figura 13, o fenómeno que se pode observar é a dissipação das nuvens à medida que passam por cima da ilha. Isto deve-se em parte à descida do ar depois de passar por cima da ilha, o que faz com que aqueça provocando a dissipação da nuvem. Estas correntes de ar descendente tem a tendência a acelerar, o que pode ser prejudicial à operação no Pico, mas por outro lado ajudam a dissipar

nevoeiros na zona do aeroporto com ventos do quadrante sul o que é uma vantagem se os ventos não excederem os limites recomendados, como alias é norma em dias propícios á formação de nevoeiros. Nesta foto podem ainda observar-se algumas zonas mais escuras na superfície do mar, especialmente no canto inferior esquerdo e perto da cabeceira da pista 27, que podem indicar zonas com rajadas. Estas zonas podem ser bem visíveis em certos dias e dão uma boa indicação de áreas a evitar para não se encontrar a pior turbulência. Assim, em dias com condições para uma aproximação visual, é uma boa prática das tripulações estarem atentos a indicações deste tipo.

Este efeito é mais visível na figura 14, tirada na cabeceira da pista 09, onde estão bem marcadas zonas de rajadas com alguma espuma a ser mesmo levantada pelo vento. A segunda zona de espuma mais pequena e mais longínqua apresentava mesmo sinais de rotação. No entanto, estes fenómenos têm a tendência a ser localizados, como se pode ter a noção com o resto do mar, visivelmente mais calmo. Embora o vento se apresentasse variável, por vezes com rajadas fortes, como é característico do vento Sudeste no aeroporto do Pico, aterrou um ATP minutos antes de se ter tirado esta foto.



**Figura 14 Espuma levantada pelo vento, foto virada a Noroeste com vento Sudeste**

### 3.5. Simulação em túnel de vento

Os primeiros resultados obtidos no túnel de vento são fruto da calibração do mesmo com a secção de teste vazia, apenas já com a base onde assenta o modelo. Assim tirou-se a relação entre as rotações da hélice e as diferenças de alturas de coluna de água entre os sensores de pressão de estagnação e estática do tubo de Pitot. A partir destes dados obtêm-se o gráfico da velocidade do escoamento relacionada com as rotações da hélice.

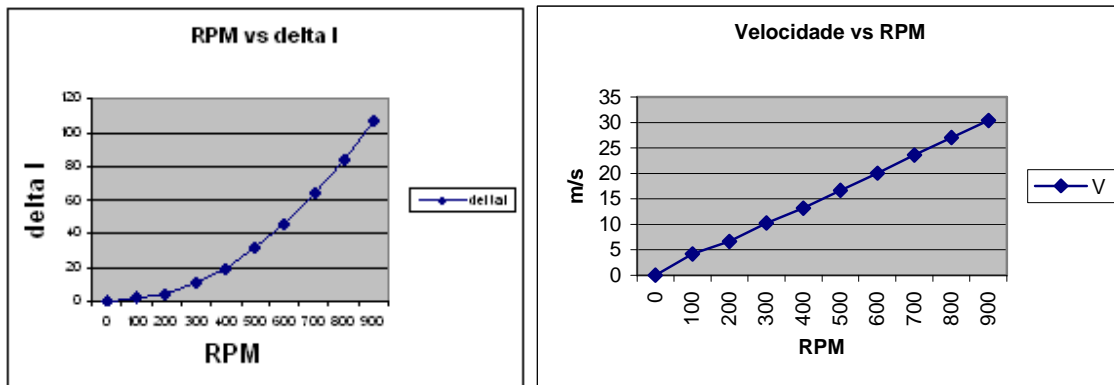
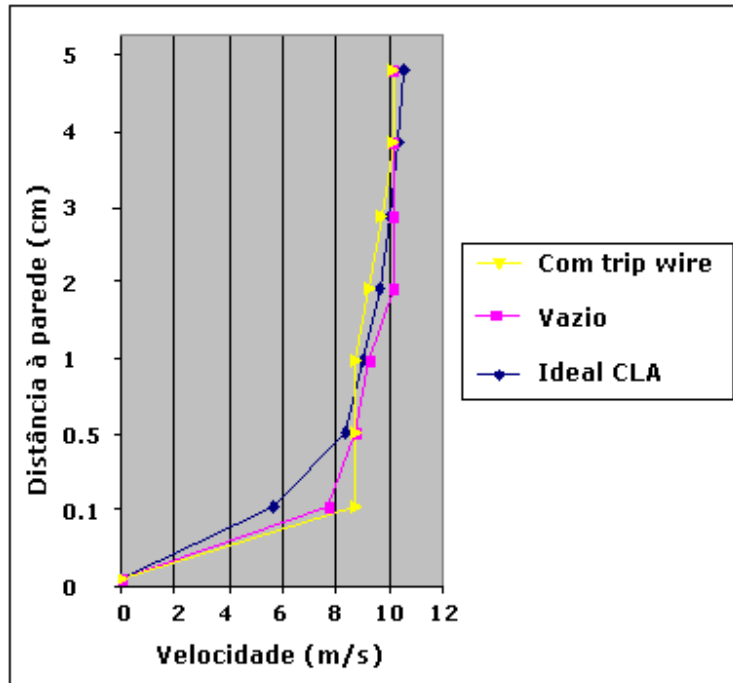


Gráfico 14 Dados de calibração do túnel de vento

Em seguida procedeu-se à medição do perfil da camada limite para diferentes gamas de velocidades, com o túnel em vazio e com o arame de transição colocado na entrada da secção de teste. No gráfico 15 da página seguinte, estão representados os resultados para uma velocidade de 10 m/s, que foi um dos valores utilizados durante a visualização, sendo comparados com o perfil teórico de uma camada limite atmosférica obtido através da equação 1.1 para uma altura de cerca de 1 km, que é um valor típico da espessura desta camada que pode variar muito dependendo do meio envolvente.

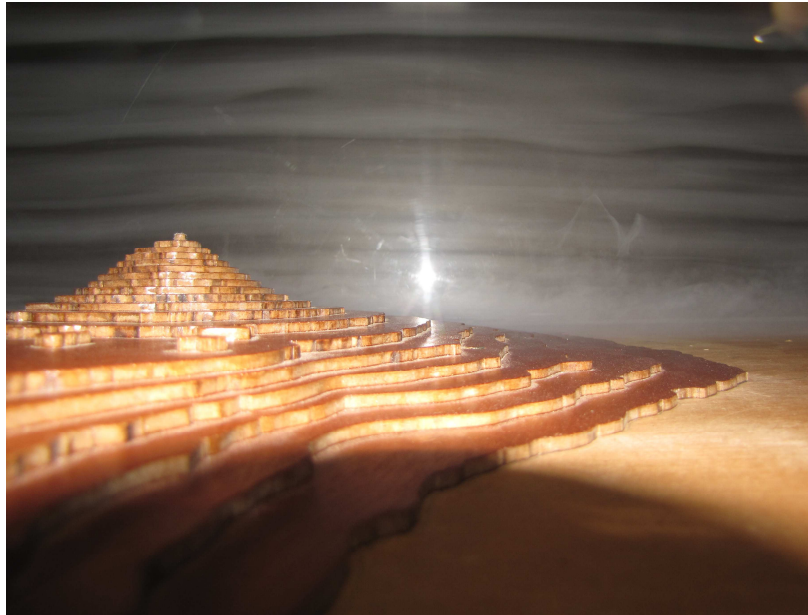
Podemos ver que a camada limite que se consegue obter neste túnel de vento tem sempre um perfil mais cheio que a camada limite atmosférica idealizada para a escala do modelo, de qualquer modo, já se esperava dificuldade em conseguir uma simulação fiel das suas propriedades num túnel de vento sem espaço para o desenvolvimento de características de turbulência que se aproximem daquilo que se passa na atmosfera real. Também se consegue ver o efeito do arame de transição, que embora afaste o perfil da camada limite no túnel da camada limite atmosférica teórica, acaba por ter um efeito benéfico facilitando a visualização do escoamento devido às novas características de turbulência perto do fundo do túnel.



**Gráfico 15 Perfis da camada limite**

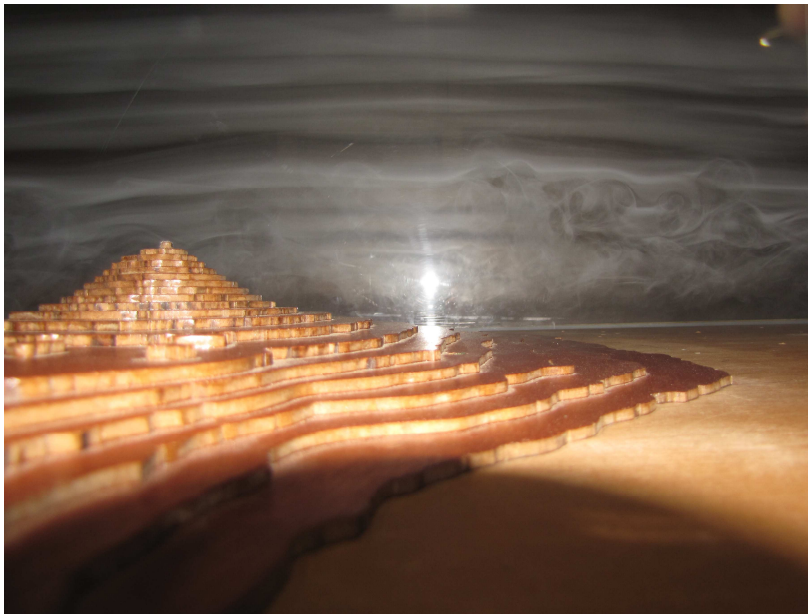
Em relação às tomadas de pressão estática que foram instaladas na base, acabou-se por não se conseguir dados relevantes e devido à dificuldade em se garantir a similaridade dinâmica não se tentou melhorar este método de obtenção de dados, já que a sua utilidade seria no mínimo limitada.

Passou-se então à visualização do escoamento no túnel de vento. As primeiras imagens apresentadas foram obtidas com a ilha na posição que simula vento Sul, obtidas com uma velocidade de 5 m/s. Optou-se por apresentar estas imagens uma vez que as obtidas a 10m/s apresentam resultados similares, mas a visualização é mais difícil por causa das limitações em se obter imagens nítidas com pouca luz e com uma maior velocidade do escoamento. O escoamento evolui da esquerda para a direita em todas as imagens apresentadas. Começamos com o fumo a ser introduzido num plano mais afastado da câmara sendo as imagens subsequentes obtidas com o plano do fumo a aproximar-se da câmara. Assim, na figura 15 observamos o escoamento sobre a parte Oeste da ilha, onde não existe relevo significativo. Pode-se observar uma difusão turbulenta do fumo numa camada muito próxima da superfície com alguns turbilhões ocasionais mais acima, mas no geral o escoamento não parece muito afectado pela presença da ilha e esta turbulência pode mesmo ser associada à turbulência da camada limite.



**Figura 15 Vento Sul, plano do fumo a cerca de 2,5 km Oeste do aeroporto**

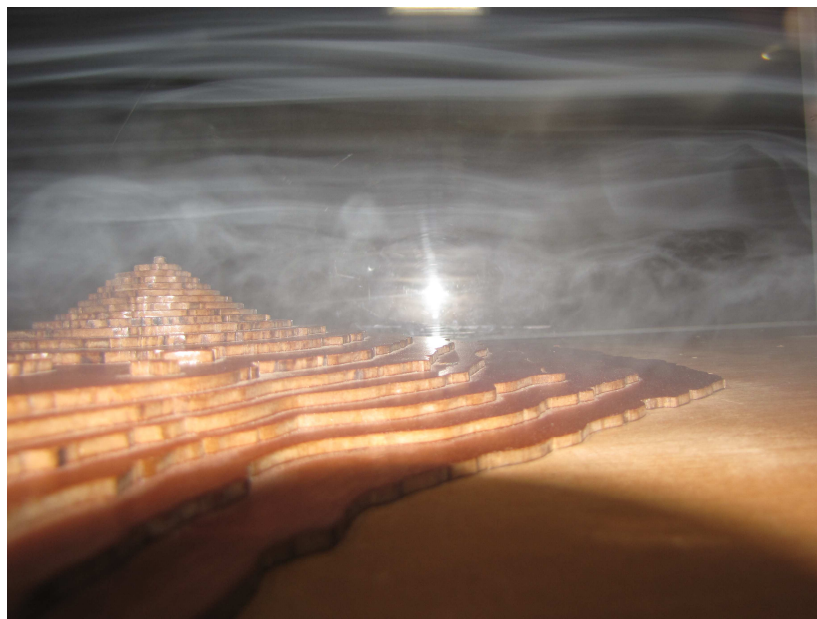
À medida que o plano de fumo se aproxima da montanha a zona turbulenta aumenta de altura e os turbilhões aparentam aumentar de escala, como se vê na figura 16. Aqui estamos a visualizar o escoamento na zona do aeroporto e pode-se assim dizer que será de esperar que se encontre mais turbulência aqui do que na aproximação à pista 09.



**Figura 16 Vento Sul, plano de fumo sobre o aeroporto**



**Figura 17 Vento sul, plano de fumo a cerca de 2,5 km Este do aeroporto**



**Figura 18 Vento Sul, plano de fumo a cerca de 5 km Este do aeroporto**

À medida que mudamos o plano de fumo mais para Este interceptamos a montanha do Pico, figura 17, e aqui parecem aparecer turbilhões de grande escala que se propagam verticalmente até uma altura significativa e ao mesmo tempo parece existir turbulência intensa, mas de menor escala pela encosta da montanha, indicada pela maior difusão do fumo com um aspecto completamente turbulento.

Na figura 18, o plano de fumos já passa de novo ao lado da montanha, mas aqui ainda tem que ultrapassar relevo significativo e o escoamento continua a demonstrar características de turbulência superiores às que se podem ver mais a Oeste. Isto pode indicar que com vento Sul, que é totalmente cruzado à orientação da pista do Pico, pode ser benéfico aproximar pela pista 09 que aparenta estar sujeita a menores perturbações no escoamento, embora na zona do aeroporto estas já pareçam significativas. Do mesmo modo, com este vento, pode ser vantajoso descolar da pista 27 para evitar-se as zonas mais turbulentas. De notar ainda que, à medida que o plano de fumos se aproxima da câmara a escala vertical muda, ou seja, as imagens mais a Este têm um campo de visão vertical mais pequeno e embora a extensão vertical da turbulência pareça maior na figura 18, apenas está a uma escala diferente, sendo mesmo ligeiramente menor que na imagem anterior.

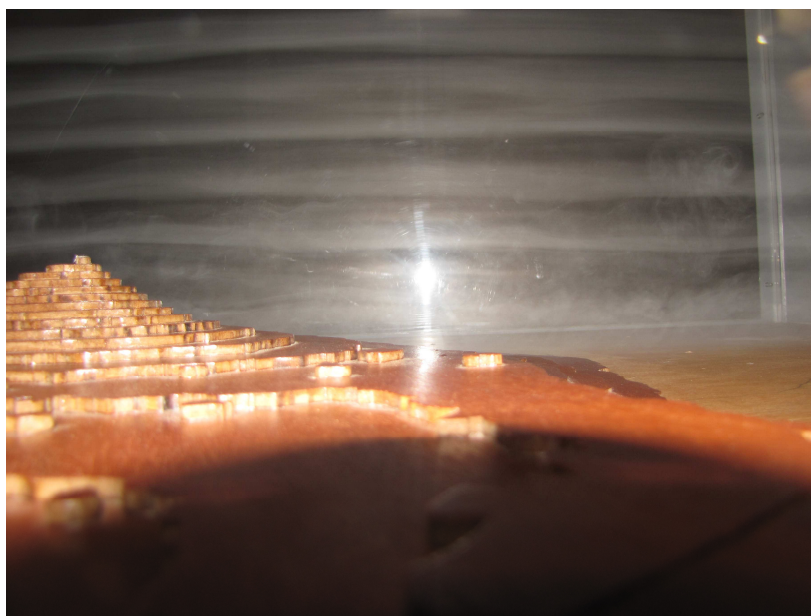
Em seguida, visualizou-se o escoamento simulando o vento de Sudoeste. Tal como foi possível observar para o vento Sul, também agora se obtêm escoamentos pouco perturbados para planos de fumo a Oeste do aeroporto, mas desta feita, estas condições estendem-se até à zona do aeroporto como se pode observar nas figuras 19 e 20. Mesmo na figura 21, a 2,5 km para Este do aeroporto, a turbulência visível não é muito significativa, embora já se notem estruturas maiores. Infelizmente, ventos de Sudoeste são favoráveis à utilização da pista 27, pois estas indicações levam a querer que é possível que se encontre muito menos turbulência na aproximação e aterragem na pista 09.



**Figura 19** Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 2,5 km a Oeste do aeroporto



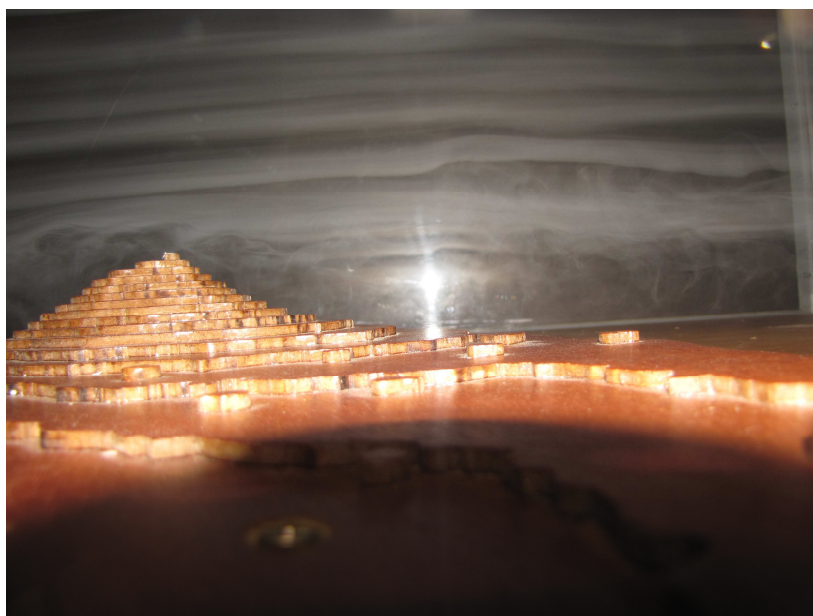
**Figura 20 Vento Sudoeste, plano de fumo sobre o aeroporto**



**Figura 21 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 2,5 km a Este do aeroporto**

Na figura 22 finalmente entramos num plano próximo o suficiente da montanha para se começar a notar o seu efeito no escoamento. Estamos já a 5 km do aeroporto, mas em termos de aproximações de aeronaves esta é uma distância relativamente curta. Com isto quer-se dizer que, se estas indicações de zonas de turbulência se verificarem no escoamento real, poder-se-ia supor que uma aeronave que optasse por uma aproximação curta à pista 27, podia manter-se longe das piores

condições de turbulência, mas não é fácil manter uma aproximação estabilizada se a final não pode ter mais de 5 km, sobre pena de se encontrar turbulência. Ainda assim, com aviões mais pequenos em condições de boa visibilidade, uma aproximação curta que evite uma final longa com vento de Sudoeste, pode revelar-se vantajosa. Fundamenta-se esta opinião, com observação de algumas aproximações realizadas por pilotos da SATA Air Açores com ventos de Sudoeste, em que a final foi mantida tão curta quanto possível. Estas aproximações visam evitar turbulência e resultam de anos de experiência neste aeroporto. O facto de estes pilotos fazerem este tipo de aproximação dá-nos alguma confiança nestes resultados porque sugerem um fenómeno similar presente no escoamento real.



**Figura 22 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 5 km a Este do aeroporto**

Continuando a deslocar o plano de fumos para Este, volta-se a chegar à zona da montanha e voltam a aparecer grandes vórtices a jusante que se distribuem desde o nível do solo até a uma altura de cerca de 1 km, acima do topo da montanha, figuras 23 e 24. Também é possível observar a deflexão do ar para cima a montante da mesma, movimento que com as condições ideais de estabilidade atmosférica, dariam origem a ondas de montanha. O tamanho dos vórtices maiores sugere que é possível que localmente apareçam zonas onde a direcção do escoamento seja mesmo invertida.

Esta zona turbulenta lembra que, embora no aeroporto as condições possam não apresentar problema para a operação de aeronaves, é necessário ter em conta que os distúrbios mais

significativos devem ainda encontrar-se algures a jusante do escoamento, o que pode ser sinónimo de uma aproximação sujeita a condições de turbulência bastante significativas. Aparenta ser este o caso com vento Sudoeste, em que apenas a 5 km da pista começam a ser visíveis fenómenos de perturbação do escoamento que se intensificam a 7,5 e 10 km de distância, ou seja, numa zona onde será normal passar numa aproximação standard.

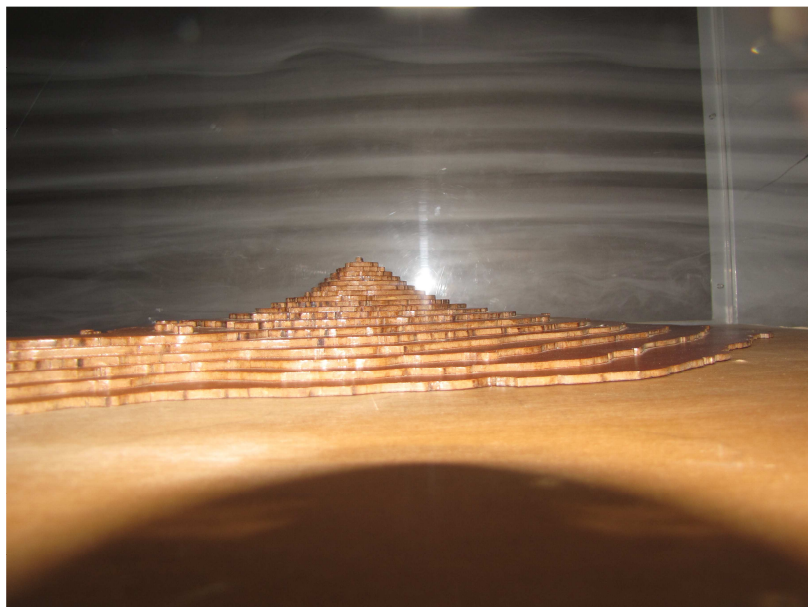


**Figura 23 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 7,5 km a Este do aeroporto**

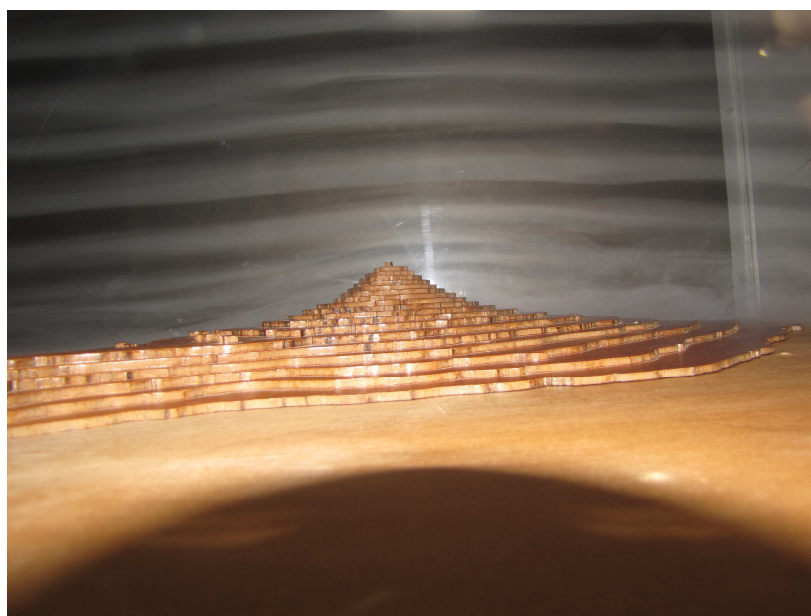


**Figura 24 Vento Sudoeste, plano de fumo a cerca de 10 km a Este do aeroporto**

Passando ao vento de Sudeste, os planos de fumo mais a Oeste continuam a ser os que apresentam menores perturbações no escoamento, mas estas já parecem ser maiores que nos casos anteriores. Possivelmente porque, nesta posição, o vento encontra a ilha mais cedo, e ainda a 5 km a Oeste do aeroporto, figura 26, já se nota uma deflexão significativa do escoamento e embora não se notem muitos turbilhões, já é possível visualizar alguma turbulência até quase à altura do topo da montanha.

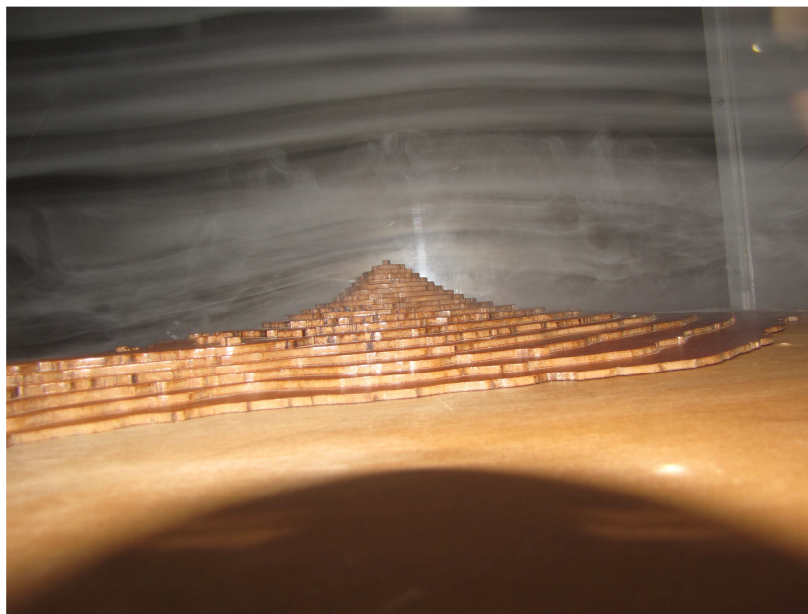


**Figura 25 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 7,5km a Oeste do aeroporto**

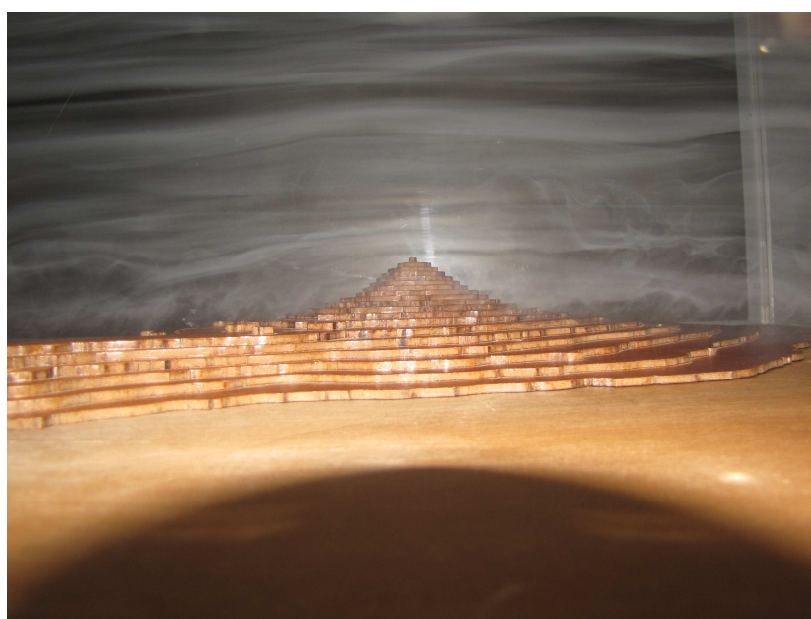


**Figura 26 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 5km a Oeste do aeroporto**

Quando nos aproximamos mais da posição do aeroporto o plano de fumos aproxima-se da montanha, mas desta direcção começa a ser perturbado pela ilha antes de chegar lá. Isto parece fazer com que a turbulência se alastre até maiores alturas em relação ao que foi possível ver nas simulações das outras duas direcções. Note-se também que esta turbulência aparece na zona da final da pista 09, que será a pista em uso com ventos desta direcção, e mantêm-se em cima do aeroporto bem como para Este do mesmo devido às outras elevações da ilha.

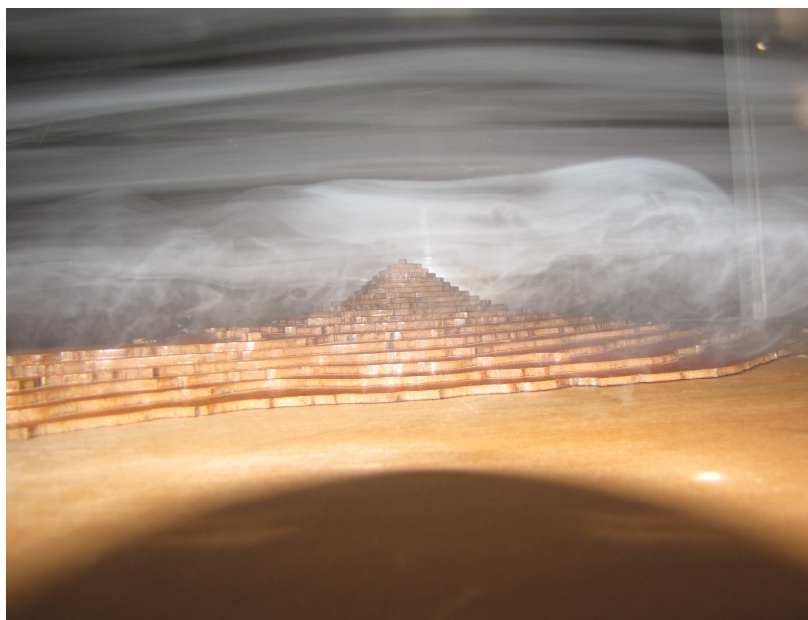


**Figura 27 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 2,5km a Oeste do aeroporto**



**Figura 28 Vento Sudeste, plano de fumo sobre o aeroporto**

A principal razão que deve estar na origem desta turbulência difundida por uma maior largura da secção de testes parece ter a ver com a intercepção dos planos de fumo de uma maior extensão da ilha, em corte. Das outras direcções também se têm mais turbulência a Este do aeroporto, o que facilmente se explica pela orografia da ilha, que continua acidentada para esse lado, enquanto para Oeste acaba por ser mais suave. Assim, a turbulência extra que parece estar presente com vento Sudeste poderá ser explicada por uma maior influência do terreno no escoamento simplesmente porque há mais terreno para contornar. Deste modo o escoamento começa a ser perturbado mais cedo e vai continuando a ser perturbado por uma maior distância, aumentando a turbulência visível.

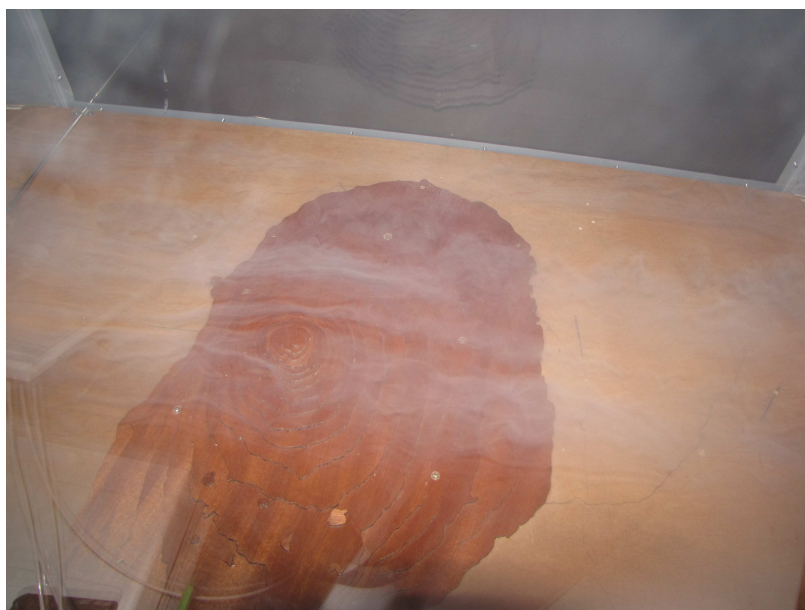


**Figura 29 Vento Sudeste, plano de fumo a cerca de 2,5km a Este do aeroporto**

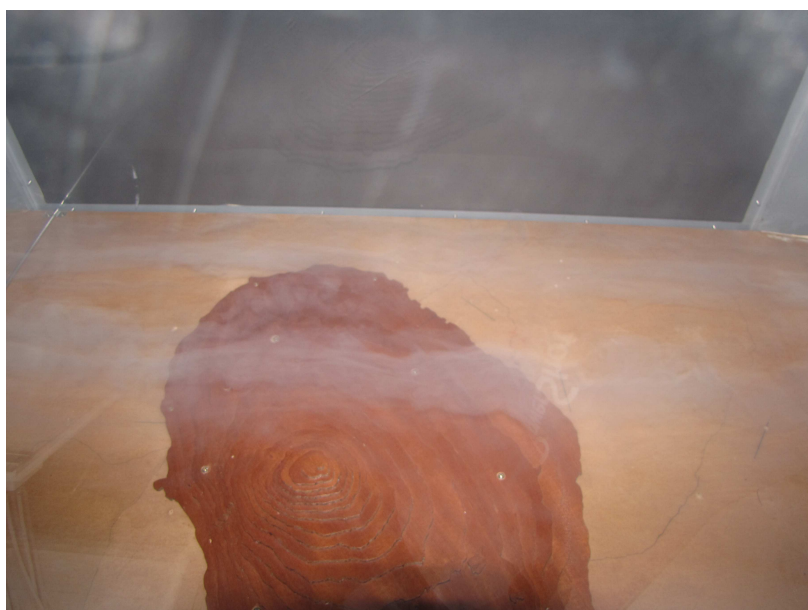
A ideia de que o pior vento para as operações no aeroporto do Pico é o Sudeste, já antes apresentada, fica assim reforçada, uma vez que todas as aproximações e o próprio aeroporto parecem ficar afectados pelas perturbações que a ilha e a montanha induzem no escoamento.

Em seguida apresentam-se mais 3 imagens da visualização do escoamento, mas desta feita com o plano de fumo na horizontal, perto do solo onde nos interessa tentar perceber o efeito da montanha. Esta visualização não é a ideal uma vez que a câmara teve de ser colocada num ângulo não perpendicular ao escoamento, devido às características do túnel, mas mesmo assim algumas das imagens obtidas conseguem dar uma ideia de alguns fenómenos relacionados com o contornar da montanha.

Assim, a figura 30 parece dar sinais de uma esteira a jusante da parte mais alta da ilha e consegue-se perceber uma ligeira deflexão na direcção do escoamento, à medida que contorna a montanha. Além disso vêm-se alguns turbilhões de desenvolvimento horizontal, reforçando a ideia de um escoamento caótico em 4 dimensões na zona que fica mesmo a jusante da montanha.



**Figura 30 Vento Sul, plano de fumo horizontal**



**Figura 31 Vento Sudoeste, plano de fumo horizontal**

Na figura 31 a situação é idêntica, e embora se possa vislumbrar uma deflexão do escoamento, a verdade é que esta não tem uma expressão significativa como era de prever pela análise dos METAR feita anteriormente.

Finalmente, com vento Sudeste temos uma esteira relativamente bem visível, e a sua posição próxima do aeroporto pode explicar as grandes variações na direcção do vento, inclusive as grandes diferenças nas duas pistas.



**Figura 32 Vento Sudeste, plano de fumo horizontal**

Podemos também perceber que a esteira devido à montanha isolada está sempre presente, apenas mudando de posição consoante a direcção do vento, como seria de esperar. Isto realça a necessidade de atenção, mesmo quando as condições medidas no aeroporto não dão sinal de preocupação. Como seria de esperar, não é só a montanha que perturba o escoamento. Embora esta pareça ter um papel muito mais significativo na geração de vórtices de maior escala do que a restante ilha também foi possível ver fenómenos que podem estar ligados a toda a ilha.

### **3.6. Sumário**

Neste capítulo foram apresentados os resultados da análise estatística dos dados meteorológicos recolhidos nas ilhas do Pico e Faial, foi feita uma descrição de indicações visuais que podem dar indicações da presença de perigos para a aviação no Pico e finalmente apresentou-se os resultados obtidos com a visualização do escoamento em túnel de vento.

## 4. Conclusões

Não é novidade que a lha do Pico tem influência no escoamento de ar que por ela passa, aliás, mesmo ilhas mais baixas perturbam o escoamento que flui na sua proximidade, como se pode comprovar pelo aparecimento de lenticulares, sinais de ondas de montanha, em quase todas as ilhas dos Açores, dadas condições ideais para a sua formação. A presença deste fenómeno faz com que a probabilidade de surgirem outros ligados às perturbações induzidas por terreno montanhoso seja bastante elevada. Pelo menos turbulência estocástica, intensificada pela presença de terreno, é comum em todos os aeroportos da região. Estes fenómenos têm maior relevância quando o terreno é muito acidentado próximo da localização dos aeroportos ou quando o terreno tem uma dimensão significativa. Estes factos não são de todo desconhecidos, levando a SATA a criar limites operacionais em muitas das pistas onde opera, por exemplo, nas Flores e em S. Jorge, onde o terreno se eleva próximo do aeroporto, e no Pico, onde a montanha tem um impacto significativo na operação. Ainda assim, estes limites carecem de um estudo aprofundado, e enquanto em aeroportos como as Flores e S. Jorge parece predominar a turbulência aleatória, que será muito difícil de prever, no Pico estamos perante um maior obstáculo mas a maior distância do aeroporto, sendo que, embora continue a existir turbulência estocástica, esta tem mais tempo para se dissipar e é mais fácil fenómenos de maior escala um pouco mais previsíveis estarem presentes.

Tentou-se assim identificar fenómenos característicos do escoamento em torno do Pico e foi possível observar variações na direcção do vento significativas e consistentes, aumento da intensidade do vento e inversões no escoamento. Estes efeitos são característicos dos escoamentos em zonas montanhosas e não há qualquer dúvida que o escoamento em torno do Pico se enquadra neste tipo de perturbações, existindo assim o potencial para os perigos associados aos fenómenos típicos de escoamentos sobre terreno montanhoso.

Muitos destes fenómenos acabam por ser localizados, de curta duração e ao mesmo tempo bastante extremos. Não é fácil prever com exactidão onde e quando vão acontecer, mas conseguem-se definir padrões usuais.

A análise dos METAR permitiu identificar um aumento na intensidade do vento na zona do aeroporto quando este sopra de cima da montanha, um efeito que é comum quando o escoamento contorna picos isolados, e que é prejudicial à operação uma vez que em dias com vento moderado este pode passar a forte no aeroporto, impossibilitando a operação. Viu-se também que a direcção do vento no Pico é fortemente afectada pela presença da montanha. Quando o vento se apresenta de Sudoeste consegue-se identificar uma rotação nociva para uma direcção mais próxima de Sul. Esta

mudança de direcção ainda é notável com ventos de Oeste. Por outro lado, com ventos de É-sudeste, nota-se uma rotação no sentido inverso, ou seja, para o lado Norte. Neste caso a rotação desvia o vento do quadrante mais limitativo e pode assim ser benéfica. Estas mudanças da direcção do vento são coerentes com o que seria de esperar de um escoamento teórico a contornar um obstáculo com as características da montanha do Pico. De qualquer modo não foi possível identificar estas rotações, sem margens para dúvidas, na visualização em túnel de vento.

Em relação a essa visualização, tem-se que admitir as limitações do estudo efectuado. Em primeiro lugar nenhum túnel de vento é capaz de simular uma atmosfera estável com estratificação que seria necessária ao aparecimento das ondas de montanha, assim, perde-se logo a simulação de um importantes fenómenos associado ao escoamento em terreno montanhoso. Além disso, a reduzida dimensão do túnel utilizado limitou a similaridade dinâmica do escoamento, deste modo, não se pode garantir que alguns fenómenos observados aconteçam na realidade e a ausência de outros efeitos esperados pode ser resultado disto mesmo. Também vale a pena referir que só parte da ilha se encontrava dentro da secção de teste a cada momento e a influência da restante parte pode ser significativa no escoamento real. Da mesma forma, a presença da vizinha ilha do Faial e o canal entre o Pico podem ter influência no escoamento nas proximidades do aeroporto do Pico, especialmente em condições de atmosfera muito estável, quando o ar mostra dificuldade em subir e ao passar pelo canal pode sofrer de um efeito tipo *venturi* enquanto é obrigado a passar por uma área mais pequena.

Não obstante, as grandes variações na direcção de vento no aeroporto do Pico, quando este sopra de Sudeste no geral, notadas na análise aos METAR, podem ser explicadas pela visualização que se fez no túnel de vento, onde para esta direcção se nota que a esteira, ou zona com maior turbulência visível, se encontra mesmo por cima do aeroporto. Dadas estas condições é possível que estejam presentes rotores que acabem por inverter a direcção do vento localmente ou ainda que os vórtices de esteira sejam suficientemente intensos para causar esse efeito.

Pode concluir-se que o vento de Sudeste será o que maiores problemas causará à operação no aeroporto do Pico, uma vez que, com vento Sul, mesmo tendo em conta a aceleração que o vento normalmente sofre, parece ser correcto afirmar que aproximações à pista 09 e descolagens da pista 27, permitirão evitar as piores zonas em nível de turbulência e *wind shear*, no entanto é necessário ter em atenção a possíveis componentes de vento de cauda que podem inviabilizar esta operação, especialmente para aviões de maior porte dada a reduzida dimensão da pista. De qualquer modo, a maior parte dos aviões comerciais estão certificados para operarem com 10 nós de vento de cauda e assim, desde que a performance o permita, estas são hipóteses a ter em conta. Com vento Sudoeste

acontece um efeito similar, e a zona do aeroporto parece estar livre de qualquer fenómeno turbulento, sendo afectada apenas por vento mais intenso e com uma direcção alterada em relação a escoamento geral, mas é de notar a inexistência de grandes variações, em grande contraste como que acontece com o vento Sudeste, onde não é raro o vento nas duas pistas ter direcções quase opostas, sinal da presença de fenómenos altamente localizados, possivelmente associados à esteira da montanha. Mesmo assim, com o vento sudoeste, a turbulência está na final da pista 27, e a direcção do vento inviabiliza a utilização da pista 09, excepto em condições de vento fraco, quando já não há preocupações deste tipo. Assim, a única recomendação a retirar daqui será dizer que uma aproximação curta vindo de Norte, antes de alinhar com a pista 27, poderá manter a aeronave fora de zonas de turbulência mais significativa. Porém esta manobra só poderá ser executada em condições de boa visibilidade e não é aconselhado encurtar demasiado a final sob pena de uma aproximação instável e conseqüente dificuldade em aterrar no ponto certo.

Dado a morfologia da ilha do Pico e os ventos dominantes de Sudoeste, pode ainda questionar-se a razão da construção do aeroporto no local actual, uma vez que, segundo o que se pode visualizar no túnel de vento, a parte Oeste da Ilha está menos sujeita a perturbações devido à montanha e o desenho da costa poucos quilómetros a Oeste do local actual permitiria a construção de uma pista com uma orientação sensivelmente Sudoeste – Nordeste. Assim, além de se alinhar a pista com os ventos dominantes, fugia-se das piores perturbações da montanha. O vento de Sudeste continuaria a impor limitações à operação, mas isso já acontece actualmente e este é um vento pouco frequente. Infelizmente na posição actual, além do vento Sudeste, a pista é também muito afectada pelo vento Sul e, até certo ponto, pelo vento Sudoeste.

Concluí-se também que, em dias de boa visibilidade, há muitos sinais que podem ajudar as tripulações a perceber onde se encontram fenómenos a evitar. Se as tripulações tiverem conhecimento do tipo de efeitos que podem aparecer e que fenómenos associados ao terreno montanhoso os podem criar, é possível que possam evitar zonas que sejam mais problemáticas, evitando encontros desnecessários com turbulência, podendo por vezes garantir uma operação que poderia ser posta em causa se encontrassem um desses fenómenos na sua aproximação. A proximidade do mar é uma mais-valia neste sentido, uma vez que turbilhões facilmente causam o levantamento de espuma e mudanças na direcção do vento ou zonas de esteira da montanha podem ser visíveis pelos seus efeitos na água.

Quanto mais informação estiver disponível às tripulações, melhor podem ser as suas decisões. Assim, será útil que sempre que o vento esteja do quadrante Sul, se inclua nos dados a bordo os relatórios meteorológicos do aeroporto do Faial, que podem ajudar a identificar a presença

de fenómenos relacionados com a montanha no Pico. Isto pode ser especialmente relevante em casos de ventos de Sudeste, em que o vento se apresenta do quadrante Norte no Pico, o que pode levar à insuspeita de problemas até se entrar na esteira da montanha ou num rotor que esteja a causar esta inversão, situação que pode ser facilmente detectada observando-se o vento no Faial em comparação com o que se faz sentir no Pico.

Resumindo, pode-se dizer que com ventos do quadrante Sul o aeroporto do Pico vai sempre sofrer de limitações operacionais, no entanto, podem ainda ser optimizadas. Não obstante, os limites recomendados utilizados pela SATA parecem razoáveis. Embora metam no mesmo saco ventos de Sudeste a Sudoeste com um limite de 20 nós, continuam a ser vistos como um guia à operação e não uma obrigatoriedade. Isto faz sentido, uma vez que como se pode ver, com vento Sudoeste será possível operar no Pico sem encontrar turbulência significativa utilizando a técnica de uma aproximação curta e, com vento Sul, desde que não implique grandes componentes de vento de cauda, a utilização da pista 09 pode permitir a operação sem problemas. Por outro lado, com ventos de Sudeste no geral, mas que se apresentam de Norte no aeroporto do Pico, os limites acabam por não ajudar à decisão de não operar, existindo casos de condições perigosas para a operação com os ventos dentro desses limites. Assim, será de interesse alertar tripulações para os fenómenos conhecidos com vento de Sudeste, para que não sejam apanhados desprevenidos por uma indicação de vento Norte no Pico sobre condições de vento geral de Sudeste. Para ajudar à operação com ventos de Sudoeste, seria interessante instalar sensores de vento na zona de aproximação à pista que podiam dar uma indicação da localização da esteira e, conseqüentemente, das zonas a evitar.

Ficamos assim com uma ideia inicial do que se passa com o escoamento em torno da Ilha do Pico e como afecta as operações no seu aeroporto. No futuro pode-se aprofundar este conhecimento com estudos de campo que identificassem situações reais comuns do escoamento, diferenciando fenómenos particulares e mapeando as suas localizações com as diferentes direcções do vento. A aplicação de um modelo meteorológico numérico de pequena escala pode também ser útil para se perceber as mudanças de direcção e intensidade do vento no aeroporto do Pico, introduzindo a possibilidade de ajustar as previsões aos fenómenos locais. Se for possível validar a localização de zonas mais turbulentas ou sujeitas a fenómenos potencialmente perigosos para a operação de aeronaves, por exemplo através de um estudo num túnel de vento de camada limite atmosférica ou verificando as condições com voos de teste, pode ser muito interessante criar procedimentos de partida e chegada por instrumentos específicas para determinadas condições de vento que contornem as zonas mais problemáticas, melhorando significativamente a operacionalidade do aeroporto.

## 5. Bibliografia

Eidsvik, K.J. et al, 2004. A prediction system for local wind variations in mountainous terrain. *Boundary-Layer Meteorology* 112: 557–586, Kluwer Academic Publishers

Lubitz, W. D. and White, B. R., 2004. *Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Applications in Wind Turbine Siting*. Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of California, Davis.

Cohn, S.A. and Goodrich, R.K., 2003. Development of a turbulence and wind shear alert system for aviation in Juneau, Alaska. National Center for Atmospheric Research, Colorado.

Cohn, S.A., 2003. *Flow in Complex Terrain: Observations by Radar Wind Profilers and Anemometers near Juneau, Alaska*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.

Boilley, A., Mahfouf, J. and Lac, C., 2008. High resolution numerical modeling of low level wind-shear over the Nice-Côte d'Azur airport. *Meteo-France/CNRS (CNRM/GAME)*, Toulouse, France.

Malcher, P., Pümpel, H. and Vergeiner, I., 2000. Case studies of turbulence and vertical motion experienced by research aircraft during map-sop south foehn cases. Institute for Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria.

Mobbs, S. D., et al, 2005. Observations of downslope winds and rotors in the Falkland Islands. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, pp. 329–351.

Lubitz, W.D. and White, B.R., 2004. Prediction of Wind Power Production Using Wind-Tunnel Data A Component of A Wind Power Forecasting System. Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, University of California, Davis.

Bedard Jr, A. J. Neilley, P., 1997. Project MCAT (Mountain induced Clear Air Turbulence). National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Technology Laboratory, Boulder, Colorado.

Corby, G.A., 1954. The airflow over mountains: a review of the state of current knowledge. *Q. J. R. Meteorological society*, Vol. 80 No.346.

Kaimal, J.C. and J.J. Finnigan, 1994. *Atmospheric Boundary Layer Flows*. Oxford Univ. Press, New York.

Doyle, J.D., and Durran, D.R., 2002. The dynamics of mountain wave induced rotors. *J. Atmospheric Sci.*, 59, 186-201.

Darby, L.S., Poulos, G.S., 2005. The Evolution of Lee-Wave–Rotor Activity in the Lee of Pike's Peak under the Influence of a Cold Frontal Passage: Implications for Aircraft Safety. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Boulder, Colorado

Davenport, A.G., 2007. Wind tunnel testing: a general outline. The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science London, Ontario, Canada.

Burton, W.V., 2001. Wind tunnel simulation of an atmospheric boundary layer. Texas Tech University.

Takahashi, T., 2002. Turbulence characteristics of wind over a hill with a rough surface. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1697–1706.

FAA Circular AC 00-57, 1997. Hazardous Mountain Winds and Their Visual Indicators US department of transportation, FAA, Washington D.C.

Clark, T. L., et al, 1997. Terrain-Induced Turbulence over Lantau Island: 7 June 1994 Tropical Storm Russ Case Study. *J. Atmos. Sci.* 54, 1795–1814.

Oliver, L.D., and G.S. Poulos, 1998. Frontal passage, mountain waves, and flow reversals in the vicinity of the Colorado Springs, CO airport. *Proc. Eighth Conf. on Mountain Meteorology*, 3-7 August 1998, Flagstaff, AZ

Poulos, G.S., and L.D. Oliver, 1998. Mountain wave/frontal dynamics in the lee of Pike's Peak. *Proc. Eighth Conf. on Mountain Meteorology*, 3-7 August 1998, Flagstaff, AZ

Nunes, J.C., 1999. *A actividade vulcânica na ilha do Pico do Plistocénico Superior ao Holocénico: mecanismo eruptivo e hazard vulcânico*. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. Ponta Delgada.

Brederode, V., 1997. *Fundamentos de aerodinâmica incompressível*. Edição do Autor, Lisboa.