



TÉCNICO
LISBOA

Ensaios em túnel aerodinâmico com vista a aplicar o controlo aerodinâmico activo a um comboio de alta-velocidade

Pedro Miguel dos Santos Fernandes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. José Maria Campos da Silva André

Júri

Presidente: Prof. Carlos Frederico Neves Bettencourt da Silva

Orientador: Prof. José Maria Campos da Silva André

Vogal: Prof. Luís Rego da Cunha de Eça

Novembro 2017

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Professor José Maria Campos da Silva André todo o apoio que me deu ao longo do tempo, as suas inúmeras propostas e dicas, elevada disponibilidade para acompanhar todo o trabalho, bem como todo o conhecimento que me transmitiu.

Queria também agradecer à Doutora Lara pelo incansável apoio e pelos conhecimentos que me foi transmitindo ao longo do trabalho. Um agradecimento também à FCT por me ter facultado a utilização do túnel de vento, bem como ao PSEM pela ajuda dada na construção do modelo à escala do comboio.

Um agradecimento ainda ao Centro de Química-Física Molecular pela disponibilidade de utilização de um dos seus microscópios, bem como pelos pigmentos cedidos. Um agradecimento ainda às empresas que cederam alguns dos materiais usados, tal como a Zeus Química e a Iberfibran.

Por fim, quero agradecer aos meus amigos e colegas pelo apoio e motivação, bem como agradecer a toda a minha família pelo enorme apoio dado.

Abstract

This study focuses on the aerodynamic performance of a particular compact lightweight high-speed train, having a very streamlined surface. The three-dimensional geometry of the train, as well as the asymmetry of the impinging relative flow due to lateral wind, twist the boundary layer and may lead to separation and the appearance of longitudinal vortices. These vortices change the pressure distribution, resulting in aerodynamic forces (e.g. with lateral, vertical and drag components), instability and noise.

In order to minimize or inhibit boundary layer twisting, it is of interest to use the suction boundary layer technique in which, through small holes or grooves in the surface, air is drawn from the boundary layer.

As a first step to apply this technique, the boundary layer was experimentally studied. To do so, a 1:10 scale model was built. Oil film visualization was applied. That technique was developed to understand the physical mechanism of formation of streaklines over the solid surface, that render the direction of the limiting lines.

The model was tested in wind tunnel to identify the boundary layer twist and the convergence of surface streamlines, related with flow separation. The streaklines pattern, was helpful to suggest areas where it would be useful to extract the low velocity fluid from the boundary layer.

The ultimate goal will be to eliminate the inception of longitudinal vortices to improve the symmetry of the pressure distribution, contributing to greater stability and safety, as well as a reduction in aerodynamic drag.

Keywords: Suction control, boundary layer, flow control, compact lightweight high-speed train, longitudinal vortices, oil-film visualizations

Resumo

As características geométricas tridimensionais do comboio, bem como a assimetria do escoamento de aproximação quando há vento lateral, podem originar a torção da camada limite e eventualmente a sua separação conduzindo ao aparecimento de vórtices longitudinais. Estes induzem alterações na distribuição de pressão, originando esforços aerodinâmicos que provocam (por exemplo, resistência aerodinâmica), instabilidade e ruído.

Para minimizar ou inibir a torção de camada limite interessa estudar a utilização da técnica de controlo de camada limite por sucção, na qual através de pequenos furos ou ranhuras na superfície, é extraído o ar junto à superfície.

Para o estudo desta técnica, procurou-se estudar experimentalmente a camada limite. Para isso, foi construído um modelo à escala 1:10 de um comboio ligeiro de alta velocidade. Desenvolveu-se a técnica de visualização de filme de óleo, na qual se procurou compreender o mecanismo físico de formação das estrias na superfície, que indicam a direcção das linhas de corrente limite do escoamento, ao mesmo tempo que se afinou esta técnica.

O modelo foi testado em túnel de vento, onde por via da observação das estrias na superfície, foram identificadas zonas de convergência das linhas de corrente superficiais, possivelmente identificadoras de separação. Com o padrão final de estrias, identificam-se as zonas onde seria útil extrair o de fluido de baixa quantidade de movimento na camada interior da camada limite.

O objectivo final é eliminar a formação de vórtices longitudinais, a fim de assegurar um maior controlo da distribuição da pressão, contribuindo para uma maior estabilidade e segurança, além de uma redução da resistência aerodinâmica.

Palavras-chave: Controlo por sucção, camada limite, controlo escoamento, comboio ligeiro de alta velocidade, vórtices longitudinais

Conteúdo

Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	xi
Nomenclatura	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 Comboio de alta velocidade ligeiro	3
2.1 O comboio de alta velocidade ligeiro	3
2.2 Controlo de camada limite	4
2.2.1 Generalidades e métodos	4
2.2.2 Camada limite tridimensional	5
2.2.3 Controlo por sucção	7
3 Preparação do modelo e ensaio aerodinâmico	9
3.1 Construção do modelo	9
3.1.1 Materiais e metodologia	9
3.2 Preparação do ensaio	10
3.2.1 Técnica de filme de óleo	10
3.2.2 Modelação das tensões exercidas sobre a película de óleo	10
3.2.3 Estimação da velocidade na interface óleo-ar	12
3.3 Pigmento	14
3.3.1 Problemática	14
3.3.2 Tentativas de solução	14
3.3.3 O dióxido de titânio	14
3.3.4 O pigmento fosforescente	14
4 Ensaios	17
4.1 Aspectos gerais	17
4.1.1 Túnel de vento da FCT	17
4.1.2 Semelhança do modelo e do protótipo	18
4.1.3 Efeito de bloqueamento no túnel	19
4.2 Mecanismo de formação das estrias	19
4.2.1 Motivação e desafios	19
4.2.2 Desvio angular de uma partícula em relação à horizontal	20

4.2.3	Medição do desvio angular	20
4.2.4	Mecanismo da formação de estrias de pigmento sobre a superfície sólida	23
4.3	Ensaio com diferentes pigmentos	23
4.3.1	Ensaio com pigmento fosforescente	23
4.3.2	Ensaio complementares	27
5	Resultados	29
5.1	Ângulo de guinada nulo	29
5.1.1	Estiramento do óleo na secção dianteira	30
5.2	Ensaio com ângulos de guinada não nulos	34
5.2.1	Ângulo de guinada de 12 graus	35
5.2.2	Ângulo de 20 graus	37
5.3	Identificação de local útil para aplicação da técnica de sucção de camada limite	39
6	Conclusões	41
	Bibliografia	42

Lista de Tabelas

3.1	Propriedades gerais dos elementos da mistura	13
3.2	Velocidade na interface fluido-ar	13
4.1	Dados, velocidade de ensaios e desvio β de uma estria em relação à horizontal. O ângulo α corresponde à inclinação do manômetro.	21
4.2	Quantidade de volume utilizado de cada componente na mistura, em ml.	24
5.1	Dados das campanhas de ensaios.	29
5.2	Volume utilizado de cada componente na mistura, em ml.	30
5.3	Dados dos ensaios com $\theta=12^\circ$	35
5.4	Dados dos ensaios com $\theta=20^\circ$	37

Lista de Figuras

2.1	Dimensões, em mm, do modelo à escala 1:10.	4
2.2	Representação esquemática das linhas de corrente do escoamento exterior [1].	5
2.3	Linhas de corrente exteriores e linhas de corrente limites.	5
2.4	Camada limite tridimensional.	6
2.5	Camada limite tridimensional.	6
2.6	Representação simplificada do controlo por sucção no modelo	7
3.1	Maquinação das placas para a elaboração do modelo	9
3.2	Colocação do betume	10
3.3	Forças aplicadas no elemento de volume	11
3.4	Perfil de velocidades da porção de fluído	12
3.5	Espectro de excitação - a azul, e espectro de emissão - a vermelho, do pigmento fosforescente [<i>fonte: Ficha Técnica DSKH Portugal</i>]	14
4.1	Modelo no túnel de vento	17
4.2	Representação esquemática do túnel de vento, de circuito fechado (<i>A imagem não está à escala</i>)	18
4.3	Perfis de velocidades, na zona inferior do comboio, para três situações. A - Perfil de velocidade real com referencial na linha; B - Perfil de velocidade no túnel com chão parado; C - Perfil de velocidade com correcção da espessura de deslocamento.	19
4.4	Sobreposição dos perfis de velocidade na parte inferior do comboio.	19
4.5	Grão arrastado no filme de óleo sujeito à acção gravidade.	20
4.6	Erro angular.	22
4.7	Desvio em relação à horizontal de uma estria - ângulo $\beta = 3,8^\circ$ - numa placa vertical, onde a linha a tracejado representa o trajecto seguido pela partícula.	22
4.8	Mancha demasiado homogénea do pigmento fosforescente.	24
4.9	Escoamento em placa plana do pigmento fosforescente.	24
4.10	Visualização ao microscópio do pigmento fosforescente com uma ampliação de 10x.	25
4.11	Visualização ao microscópio do pigmento fosforescente com uma ampliação de 50x.	26
4.12	Representação da observação feita no microscópio do dióxido de titânio.	26
4.13	Escoamento do corante fluorescente sem óleo de linhaça.	27
4.14	Escoamento com partículas de sílica tingidas com corante fluorescente. Sentido do escoamento da direita para a esquerda.	28
5.1	Escorregamento do filme de óleo ao fim de 12 minutos na secção dianteira.	30
5.2	Escorregamento do filme de óleo ao fim de 20 minutos na secção dianteira.	31
5.3	Escoamento na retaguarda do modelo	31
5.4	Convergência das linhas de tensão de corte na retaguarda do modelo.	32

5.5	Curvatura, na zona posterior do comboio, das linhas de corrente superficiais.	33
5.6	Simulação numérica [2] da torção do escoamento, com formação de vórtices longitudinais.	33
5.7	Representação esquemática da montagem para os ensaios com ângulo de guinada não nulo	34
5.8	Formação de vórtice longitudinal na secção dianteira e inferior do modelo.	35
5.9	Zona indicadora de separação na região da traseira com indicação da direcção local das linhas de corrente limites.	36
5.10	Extensão da linha de convergência indicadora de separação na região da traseira do modelo.	36
5.11	Separações desencadeadas por imperfeições geométricas do modelo, a 20° de ângulo de guinada.	37
5.12	Regiões onde aparenta existir convergência das linhas de tensão de corte superficiais. Essas linhas não são claras na fotografia mas são mais visíveis a olho nú.	38
5.13	Desvio das linhas de corrente limite.	39

Nomenclatura

δ^*	Espessura de deslocamento [<i>mm</i>]
λ	Comprimento de onda [m]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]
ρ	Densidade [kg/m ³]
θ	Défice de quantidade de movimento [<i>mm</i>]
ε	Espessura [m]
\vec{D}	Força de arrasto [<i>N</i>]
\vec{P}	Peso [<i>N</i>]
\vec{V}_r	Velocidade relativa da partícula [<i>m/s</i>]
C_d	Coeficiente de resistência [-]
C_l	Coeficiente de sustentação [-]
g	Aceleração gravítica [<i>m/s</i> ²]
M	Massa [<i>kg</i>]
Ma	Número de Mach [-]
r	Raio da partícula elementar [<i>m</i>]

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O estudo dos fluidos, o seu controlo e a sua optimização constituem um objectivo ancestral do homem, principalmente no caso de condutas e canais de água [3]. No caso dos veículos, a importância de conhecer as características do escoamento em torno dos mesmos para o correcto desenho da fuselagem é inquestionável, quer do ponto de vista da estabilidade, quer do ponto de vista da eficiência energética [4] [5]. Quando não é viável alterar a geometria, pode melhorar-se o escoamento por meio das técnicas de controlo aerodinâmico activo. Também no caso de geometrias fuseladas, este controlo pode interessar, como forma de reduzir a resistência, a turbulência, as componentes laterais da força aerodinâmica, etc. As tentativas de reduzir a resistência aerodinâmica têm sido, ao longo dos anos, alvo de extensas investigações na indústria automóvel, embora só mais recentemente tenha sido tema de discussão no *design* de veículos de maiores dimensões, tais como os comboios [6].

As crescentes preocupações com a eficiência energética, o conforto e a segurança dos veículos ferroviários motivam este interesse pelo controlo da camada limite, nomeadamente da sua torção, responsável pela formação de vórtices longitudinais. O atraso ou mesmo a inibição da separação tridimensional de camada limite permite controlar melhor a formação destes vórtices longitudinais, e com isso também controlar a distribuição de pressão na superfície do veículo.

O controlo pode ser feito por sucção, através de pequenos furos ou ranhuras, estrategicamente colocados, por onde se extrai fluido de baixa quantidade de movimento, evitando a convergência das linhas de corrente superficiais e a separação tridimensional.

O caudal de fluido que é preciso retirar da superfície é pequena face ao caudal de fluido que escoar em torno do veículo, o que torna possível o controlo de sucção. Adicionalmente, há a possibilidade de aproveitar o ar extraído para injectá-lo posteriormente noutra zona passível de separação — controlo por sopro —, por exemplo na retaguarda, como sugerido em [1]. Desta forma, conseguem-se reduzir os esforços aerodinâmicos, contribuindo para uma maior estabilidade lateral do veículo. A geração de ruído também é reduzida, dado que este tem sobretudo origem nos vórtices longitudinais e nas instabilidades da camada limite na parede lateral. Como tal, é fundamental conhecer o escoamento em torno do veículo, a fim de se determinarem os locais úteis à aplicação das técnicas de controlo, nomeadamente por sucção.

1.2 Objectivos

Esta dissertação tem como propósito o estudo das linhas de corrente superficiais, através de ensaios realizados em túnel de vento, com a finalidade de identificar uma zona ou zonas onde seja útil aplicar a técnica de controlo de camada limite por sucção.

O trabalho foi dividido em quatro grandes tarefas:

- Construção do modelo à escala.
- Estudo da técnica de visualização, no caso em apreço, a técnica de filme de óleo.
- Realização dos ensaios, com vista ao estudo das linhas de corrente limites.
- Identificação de locais úteis para a aplicação da técnica de sucção.

Na execução destas tarefas, o trabalho foi organizado em três fases:

- Construção do modelo do comboio à escala 1:10.
- Aprimoramento da técnica de visualização do escoamento com filme de óleo e escolha do pigmento.
- Ensaios em túnel de vento.

1.3 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 é caracterizado o comboio em estudo e, é feita uma abordagem geral à camada limite tridimensional.

No capítulo 3 é feita uma descrição do processo de construção do modelo, bem como o início da preparação dos ensaios, onde se encontram patentes os pressupostos teóricos e práticos.

No capítulo 4 descrevem-se a preparação dos ensaios, incluindo a afinação da técnica de visualização e a escolha do pigmento.

No capítulo 5 são expostos os resultados dos ensaios.

No capítulo 6 contém a conclusão geral da dissertação.

Capítulo 2

Comboio de alta velocidade ligeiro

2.1 O comboio de alta velocidade ligeiro

Aspectos gerais

Os comboios de alta velocidade, que procuram ser uma alternativa aos demais meios de transporte, especialmente em distâncias até 600 km, apresentam algumas limitações e problemas, onde se destaca o elevado custo das infraestruturas, a dependência da sua estabilidade com o ângulo de guinada, bem como a elevada tara por passageiro, que resulta num consumo energético elevado, principalmente na fase de aceleração, como indicado em [7] e [8]. No caso do comboio de alta velocidade ligeiro, algumas destas limitações não se verificam, enquanto que outras se mantêm. Por exemplo, no comboio longo, devido ao seu comprimento, a espessura da camada limite é grande na parte posterior, e dessa forma, a parte no veículo nesta zona tem uma influência muito limitada para reduzir a força de resistência aerodinâmica [1]. Contrariamente ao comboio longo, o comboio mais curto, permite otimizar mais facilmente a aerodinâmica, com o objectivo de recuperar a pressão na zona traseira.

Para além do benefício da redução da resistência ao avanço, o controlo de camada limite permite uma diminuição do ruído aerodinâmico, causador de enorme desconforto [9].

Características gerais

Trata-se de um comboio cuja geometria consiste num corpo fuselado, com 18 m de comprimento e uma lotação de 40 lugares. Embora no protótipo existam adereços que visam a optimização aerodinâmica, tais como a carenagem das rodas, os mesmos não existem no modelo. O mesmo representa apenas a geometria fuselada do prótótico, tratando-se por isso de uma versão não detalhada do mesmo. As medidas do modelo encontram-se representadas na figura 2.1. Refere-se ainda algumas outras vantagens do comboio ligeiro, como a reduzida área da secção transversal, que diminui o efeito de bloqueamento em túneis, diminuindo assim a amplitude da onda de pressão que se forma à entrada dos mesmos, e ainda a configuração geométrica que apresenta benefícios ao nível do comportamento estrutural e dinâmico do comboio [8].

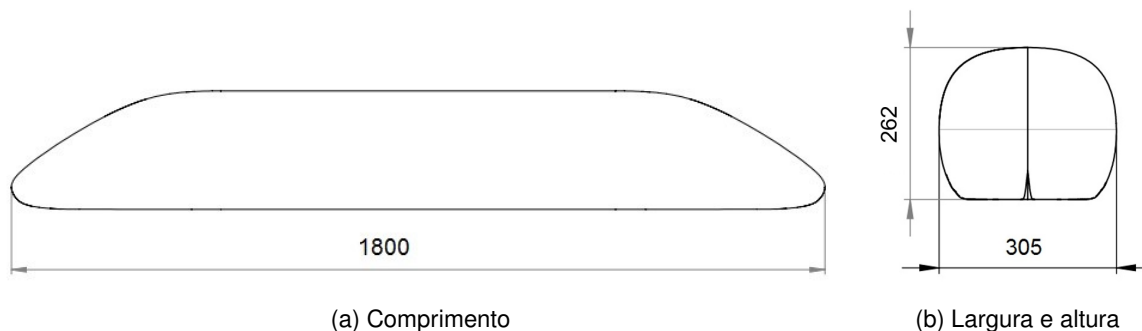


Figura 2.1: Dimensões, em mm, do modelo à escala 1:10.

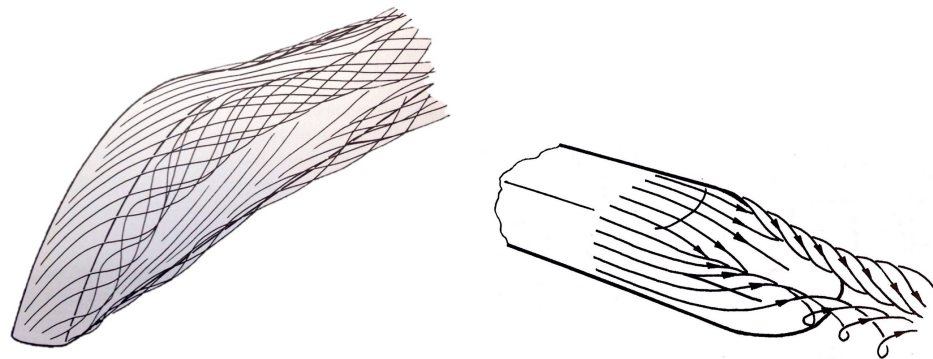
2.2 Controlo de camada limite

2.2.1 Generalidades e métodos

O controlo de camada limite não é aplicável apenas aos transportes, podendo ser empregue em outras áreas, e.g., no controlo do escoamento em torno de pás de turbinas radiais [10]. No entanto, é nos transportes que mais se tem empregue esta metodologia, onde existem fortes potencialidades na facilidade de aplicação e no desenvolvimento, não só por questões de segurança como também por razões energéticas, por via da já referida redução do coeficiente de resistência aerodinâmica – veja-se como exemplo disso, os inúmeros trabalhos realizados no veículo de *Ahmed*, onde aplicando técnicas de controlo de camada limite se obtiveram reduções significativas de C_d (*Coefficiente de resistência aerodinâmica*) [11]. Por exemplo, uma simples injeção de ar em zonas estratégicas na região da esteira, possibilita uma redução do coeficiente de resistência aerodinâmica na ordem dos 35%, podendo este valor ser ainda mais reduzido [1].

As questões ligadas à estabilidade e segurança do comboio estão intrinsecamente, embora não exclusivamente, ligadas à variação de pressão ao longo de toda a superfície, devido a diversos factores, tais como a formação de vórtices longitudinais, com especial destaque para aqueles que são formados no nariz do comboio – ver figura 2.2a. Estas folhas de vórtice têm origem na separação da camada limite tridimensional e, originam forças e momentos de magnitude suficientemente elevada para comprometer a estabilidade do veículo. Tais forças e momentos podem levar ao derrube lateral do comboio. Não menos importante, no comboio ligeiro, na região da esteira, aparecem dois vórtices longitudinais contra-rotativos, como representado na figura 2.2b, após ensaios realizados no IST (*Instituto Superior Técnico*).

Entre as principais técnicas de controlo de camada limite destacam-se três. Uma primeira, que visa o aumento de quantidade de movimento na camada limite – técnica de sopro –, uma segunda que promove a troca de massa entre o escoamento fora e dentro da camada limite - geração de vórtices - e por fim, uma terceira, que visa a extração de massa de fluido de baixa quantidade de movimento – controlo por sucção – [12] e [5].



(a) Formação de vórtices longitudinais a partir da secção dianteira. (b) Representação esquemática de vórtices na esteira.

Figura 2.2: Representação esquemática das linhas de corrente do escoamento exterior [1].

2.2.2 Camada limite tridimensional

A torção da camada limite, que tem origem num gradiente transversal de pressão, é definida como sendo o desvio local das linhas de corrente limites em relação à direcção do escoamento exterior – como esquematizado na figura 2.3, que origina diferenças na velocidade, quer em módulo quer em direcção ao longo da espessura da camada limite. O desvio é maior na região junto à parede por consequência da necessidade de ser garantido o equilíbrio entre o gradiente radial de pressão e a força centrífuga por unidade de volume – mecanismo invíscido denominado de escoamento secundário de Prandtl de 1ª espécie [12].

A actuação do gradiente transversal na direcção z' induz um perfil de velocidade w' , também ele transversal à direcção do escoamento exterior – figura 2.4b.

As técnicas de visualização do escoamento junto da superfície, como aquela que foi utilizada neste trabalho, permitem observar estas linhas de corrente limite que são também denominadas de linhas de tensão de corte superficial. Estas linhas indicam a direcção local do escoamento junto à parede.

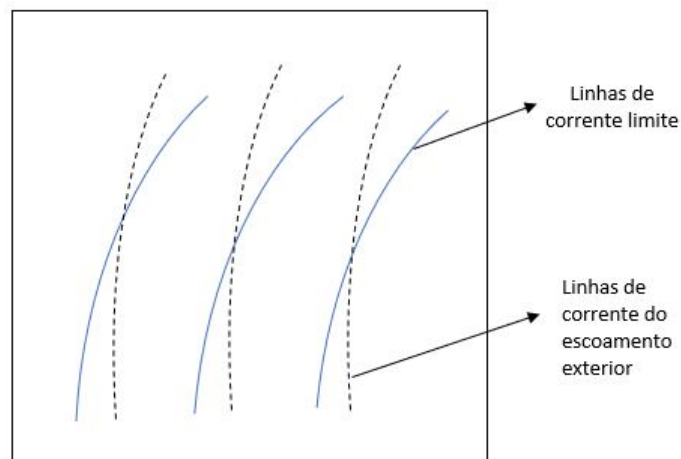


Figura 2.3: Linhas de corrente exteriores e linhas de corrente limites.

Devido à torção de camada limite, a aplicação das técnicas de visualização das linhas de corrente limites, apenas indicam a direcção das linhas junto à superfície, e não a direcção tomada pelas linhas de corrente exteriores. Contudo, através do padrão das linhas de corrente limites podem ser identificadas

zonas onde, por conservação de caudal, poderá ocorrer separação de camada limite tridimensional, que se definem como locais onde linhas de corrente limites distintas, convergem para o mesmo local, abandonando a superfície como uma linha de corrente única [13] [12].

Na fig. 2.5a encontra-se representado uma simplificação da convergência das linhas de corrente, que originam a separação da camada limite - figura 2.5b.

Os vórtices longitudinais têm origem na separação da camada limite tridimensional.

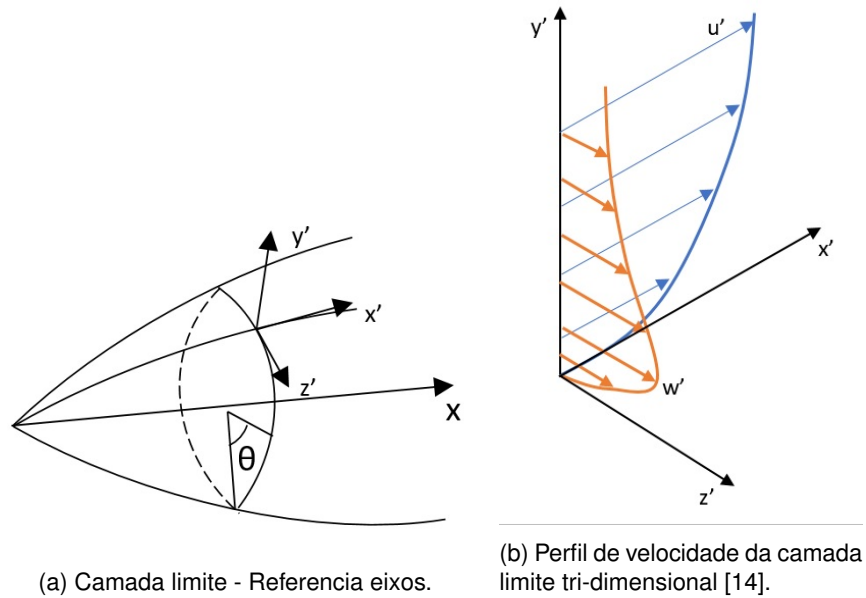


Figura 2.4: Camada limite tridimensional.

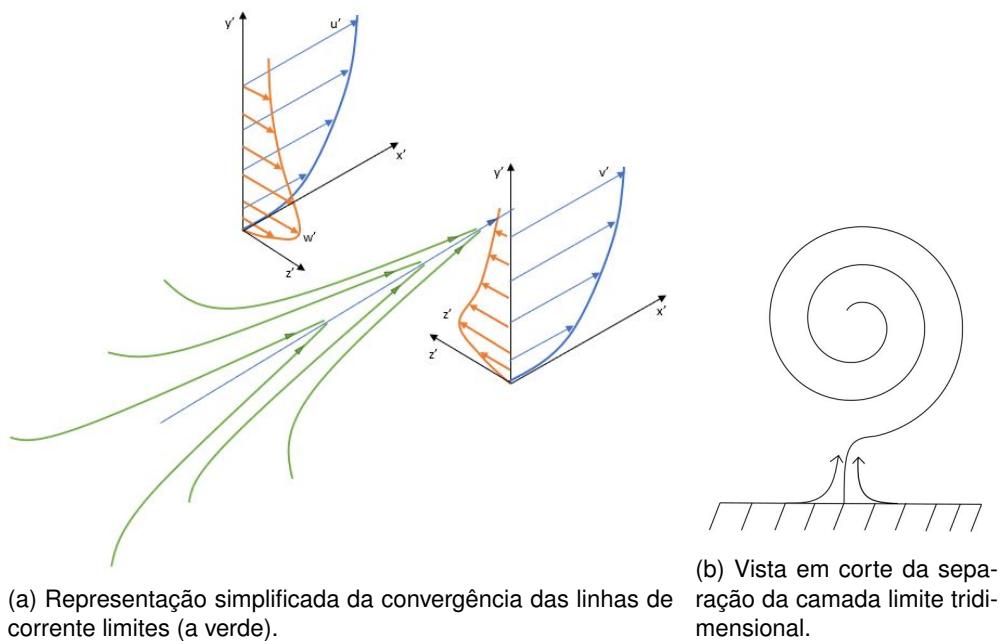


Figura 2.5: Camada limite tridimensional.

2.2.3 Controlo por sucção

Aspectos gerais

A sucção de camada limite aproveita o facto da componente transversal da velocidade – w' –, no referencial do escoamento exterior, só ser muito relevante próximo da parede, nos 10 a 15% inferiores da espessura da camada limite. Nessa zona, tal como já foi referido, a velocidade do escoamento é mais baixa que a do escoamento exterior. Como a velocidade transversal é pequena acima dessa zona, a remoção desta camada inferior dentro da camada limite, reduz muito significativamente a torção e, eventualmente, evita a separação da camada limite tridimensional.

Aplicação ao modelo do comboio ligeiro

Apesar de não se ter chegado a aplicar a técnica de controlo de camada limite, o modelo do comboio foi previamente construído de forma a possibilitar a aplicação futura desta técnica. Para tal, metade do interior do modelo é oco. Desta forma, é possível a realização de furos, ou ranhuras – onde poderá ser feita a sucção – e abrir outro furo, na zona inferior do comboio, para onde irá ser escoado esse mesmo ar – ver figura 2.6 –.

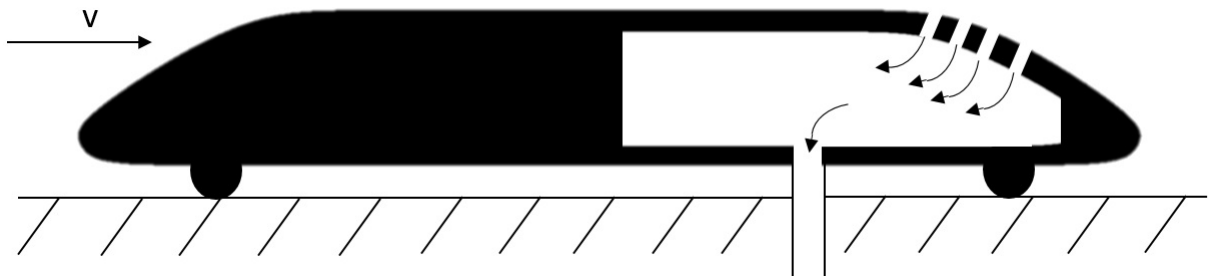


Figura 2.6: Representação simplificada do controlo por sucção no modelo

Capítulo 3

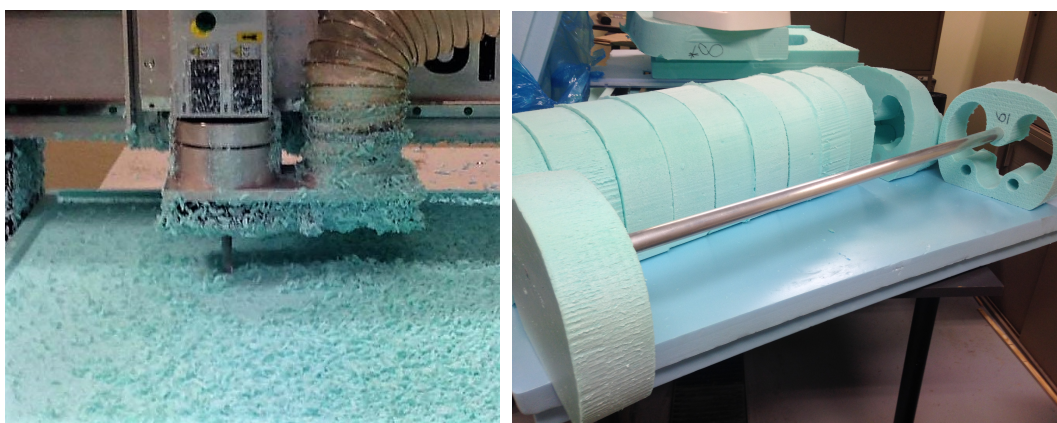
Preparação do modelo e ensaio aerodinâmico

No presente capítulo, e primeiramente, é descrito o processo de construção do modelo, seguido de uma segunda parte, onde se realiza um primeira abordagem teórica à técnica de filme de óleo, abrangendo tópicos como o fluido usado na visualização do escoamento e o cálculo teórico da sua velocidade. Seguem-se os pressupostos para a escolha da sua composição.

3.1 Construção do modelo

3.1.1 Materiais e metodologia

O modelo foi fabricado a partir de placas de poliestireno extrudido, com 100 mm de espessura, cortadas e maquinadas em vinte e uma fatias, por uma máquina CNC (*Computer Numerical Control*) - figura 3.1a -, a partir de um modelo desenhado em *Solidworks*¹. O desenho do comboio já tinha sido definido, numa dissertação de douturamento [8] e serviu de base para este modelo.



(a) Maquinação em CNC

(b) Fatias do modelo pós maquinação

Figura 3.1: Maquinação das placas para a elaboração do modelo

Posteriormente, as fatias foram encaixadas em três tubos de alumínio, que conferem resistência à flexão ao modelo, bem como guiam as fatias no decorrer da montagem - ver figura 3.1b. Com vista a

¹www.solidworks.com

dar acabamento à superfície do modelo, bem como suprimir imperfeições oriundas da maquinagem, o modelo foi coberto com gesso e lixado - ver figura 3.2 -. Esta etapa foi repetida um número considerável de vezes, até conseguir o resultado pretendido. A verificação da geometria pretendida, bem como a detecção de imperfeições relevantes, é feita visualmente, a olhómetro.



Figura 3.2: Colocação do betume

Por fim, uma vez que no ensaio se usa pigmentos de cor branca, o modelo foi pintado em preto mate, de forma a aumentar o contraste. Foram aplicadas dez camadas de tinta, que sucederam à aplicação de três finas camadas de betume. O polimento foi feito com lixas finas, até se obter um acabamento liso e sem marcas de pincel, para que estas não afectassem a visualização das linhas de corte superficiais.

3.2 Preparação do ensaio

3.2.1 Técnica de filme de óleo

A visualização do escoamento sobre a superfície sólida é relevante para a compreensão do escoamento e para a interpretação de forças eventualmente medidas. O método de filme de óleo constitui umas das técnicas mais usadas em visualização de escoamentos [15] e possibilita a obtenção de informação qualitativa e quantitativa (relativamente à forma das linhas de corrente limite).

A técnica de filme de óleo consiste em aplicar uma película muito fina de óleo com pigmento, normalmente dióxido de titânio TiO_2 , sobre a superfície que se pretende estudar, de forma a obter estrias orientadas segundo a direcção local das linhas superficiais de tensão de corte, paralelas à velocidade, localmente.

O filme de óleo não é o único método que permite a compreensão do escoamento em torno de um objecto, existindo outros, tais como fumo [16], dependendo do fim pretendido. A escolha depende das limitações de cada técnica.

3.2.2 Modelação das tensões exercidas sobre a película de óleo

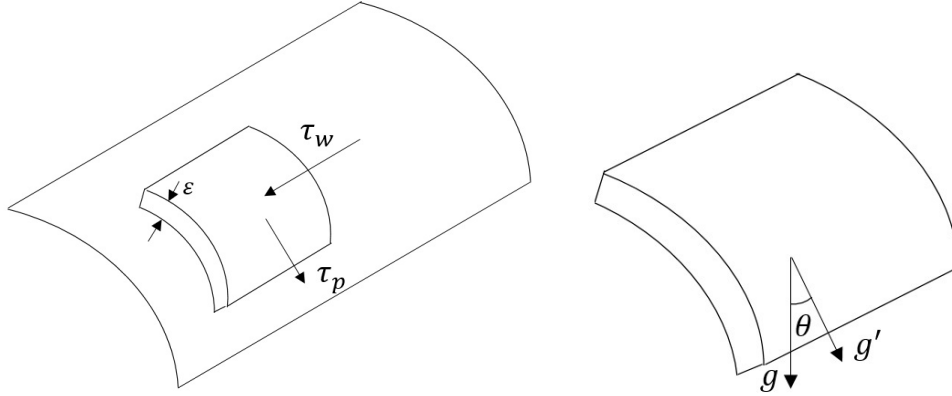
O cálculo aproximado da velocidade, na interface óleo-ar.

Considere-se uma película de óleo de espessura ε sujeita, na interface com o ar, à tensão de corte τ_w , exercida pelo escoamento exterior, e ao seu peso próprio, numa superfície não horizontal - para

que o efeito da força gravítica se faça sentir. A componente do peso ortogonal à superfície sólida é absorvida pela compressão e a componente tangencial do peso gera uma tensão de corte tangencial:

$$\tau_p = \rho_f \varepsilon g \cos(\theta) \quad (3.1)$$

onde ρ_f é a densidade do óleo.



(a) Tensões de corte - representação esquemática das tensões de corte aplicadas a um elemento de fluido, numa superfície inclinada (b) Decomposição da aceleração gravítica g

Figura 3.3: Forças aplicadas no elemento de volume

Pretende-se que a tensão viscosa - τ_w - seja preponderante face a τ_p .

A tensão de corte na interface óleo-ar τ_w é obtida a partir da definição do coeficiente de fricção C_f [17]:

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho U_e^2 \quad (3.2)$$

Para $Re = \frac{x U_\infty}{\nu}$, onde $x \in [1, 2]$ m, $\nu = 1,5 \times 10^{-5}$ m²/s e $U_\infty = 30$ m/s:

$$2 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$$

Desta forma, o regime é turbulento, o que de acordo com a solução aproximada [17]:

$$C_f = 0,0581 Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (3.3)$$

pelo que se obtém-se:

$$3,2 \times 10^{-3} < C_f < 2,8 \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

e

$$1,5 < \tau_w < 1,7 \quad (3.5)$$

com τ_w em Pa.

Para o caso extremo de uma parede vertical ($\theta = 0$), maximizando τ_w em relação a τ_p , para que o efeito gravítico seja minimizado, obtém-se:

$$\tau_w \gg \rho_f \varepsilon g \quad (3.6)$$

A equação 3.6 demonstra que para um dado número de Reynolds, é possível aumentar o valor relativo τ_w face a τ_p diminuindo a espessura do filme de óleo. A espessura do filme de óleo deverá ser

tão fina quanto possível, mas acima da ordem de grandeza do pigmento, de forma a garantir o menor desvio das estrias formadas face à direcção horizontal.

A partir de 3.6 e para:

$$\frac{\tau_w}{\tau_p} > 100 \quad (3.7)$$

Para $\rho_f = 850 \text{ kg/m}^3$, $\tau_w = 1,6 \text{ Pa}$, a partir das equações 3.6 e 3.7:

$$\varepsilon < \frac{1,6}{850 \times 9,81 \times 100} \simeq 1,9 \mu\text{m} \quad (3.8)$$

Esta estimativa de ε serve para impor a granulometria do pigmento.

3.2.3 Estimação da velocidade na interface óleo-ar

Em gradiente de pressão nulo ($\frac{dp}{dx} = 0$), sobre uma superfície horizontal, o escoamento no interior do filme de óleo pode ser modelado como um escoamento de Couette, onde o perfil de velocidades dentro da película de óleo é linear - como esquematizado na figura 3.4 - dado por:

$$u(y) = U_0 \left(\frac{y}{\varepsilon} \right) \quad (3.9)$$

Onde U_0 é a velocidade na interface óleo-ar.

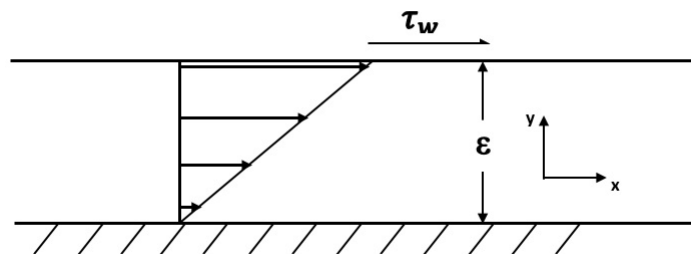


Figura 3.4: Perfil de velocidades da porção de fluido

A tensão de corte é uniforme em toda a espessura ε :

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_w \quad (3.10)$$

donde:

$$U_0 = \frac{\tau_w}{\mu} \varepsilon \quad (3.11)$$

Com base em 3.11 e de acordo os valores de ρ , μ e ν , é possível determinar a velocidade U_0 na interface óleo-ar. Foram escolhidos diversos elementos passíveis de serem utilizados na mistura, cujas propriedades estão disponíveis na tabela 3.1.

Elementos	Densidade [Kg/m ³]	μ [Pa/s]	ν [m ² /s]
Ar	1.2	1.80×10^{-5}	1.50×10^{-5}
Óleo 10W40	875	2.09×10^{-1}	2.39×10^{-4}
Gasolina	750	3.75×10^{-4}	5.00×10^{-7}
Gasóleo	830	2.47×10^{-3}	2.98×10^{-6}
Querosene	810	1.64×10^{-3}	2.02×10^{-6}
Propanol	803	1.92×10^{-3}	2.39×10^{-6}
Óleo de caixa	852.9	4.10×10^{-1}	4.81×10^{-4}
50% óleo + 50% Querosene	842.5	1.85×10^{-2}	2.20×10^{-5}
80% óleo + 20% Querosene	862	7.92×10^{-2}	9.19×10^{-5}

Tabela 3.1: Propriedades gerais dos elementos da mistura

Determina-se então a velocidade para cada uma das substâncias, na interface fluido-ar – tabela 3.2 –, usando ε obtido na equação 3.7.

Elementos	Velocidade [mm/s]
Óleo 10W40	1.45
Gasolina	$9,4 \times 10^2$
Gasóleo	$1,3 \times 10^2$
Querosene	2×10^2
Propanol	$1,7 \times 10^2$
Óleo de caixa	$7,6 \times 10^{-1}$
50% óleo + 50% Querosene	$1,7 \times 10^{-1}$
80% óleo + 20% Querosene	3.9

Tabela 3.2: Velocidade na interface fluido-ar

De acordo com o ensaio realizado numa dissertação de doutoramento, sobre condições indênticas - ver [8]-, onde foi usado o óleo 10W40, o escoamento foi perceptivelmente lento. Interessa que a velocidade do óleo seja baixa para evitar escorregamento abundante e salpicos, embora não excessivamente baixa, que poderia resultar num movimento demasiado lento do óleo. Uma análise qualitativa da tabela 3.2 sugere que misturas de óleo e querosene podem tornar o escoamento suficientemente lento, embora não excessivamente, face a uma mistura contendo apenas óleo.

3.3 Pigmento

3.3.1 Problemática

No ensaio realizado anteriormente [8], foi difícil obter imagens fotográficas do escoamento da mistura de óleo 10W40 com dióxido de titânio TiO_2 , devido a alguns reflexos brilhantes em certas zonas do modelo, que não permitiam uma clara identificação das estrias do pigmento branco nas fotografias.

3.3.2 Tentativas de solução

Para resolver o problema descrito em 3.3.1, procurou-se um pigmento alternativo ao dióxido de titânio, tendo sido feito um levantamento dos principais pigmentos usados na visualização de escoamentos com filme de óleo.

Algumas visualizações recorram a pigmentos, que quando excitados com radiação na gama ultravioleta (UVA), emitem radiação na gama da luz visível, brilhando em ambiente escuro [15]. Com este tipo de pigmento é possível realizar os ensaios em ambientes escuros e, devido à emissão própria de luz do pigmento, maximiza-se o contraste entre o padrão de estrias do pigmento e a superfície sólida. Os ensaios realizados para testar a utilidade do pigmento encontram-se descritos no próximo capítulo.

UVA (ou Luz negra) - Radiação de comprimento de onda λ entre os 315 nm e os 400 nm.

3.3.3 O dióxido de titânio

Trata-se de um pigmento de cor branca, constituído em noventa e nove por cento pela molécula TiO_2 , com densidade de 3.8 g/cm^3 . O valor esperado para o tamanho médio das suas partículas é de $0.21 \mu\text{m}$

3.3.4 O pigmento fosforescente

Trata-se de um pigmento constituído por cristais ($ZnS : Cu, Cl$), que, quando excitado por radiação ultravioleta, emite com maior intensidade radiação de comprimento de onda de aproximadamente 530 nm - ver fig 3.5

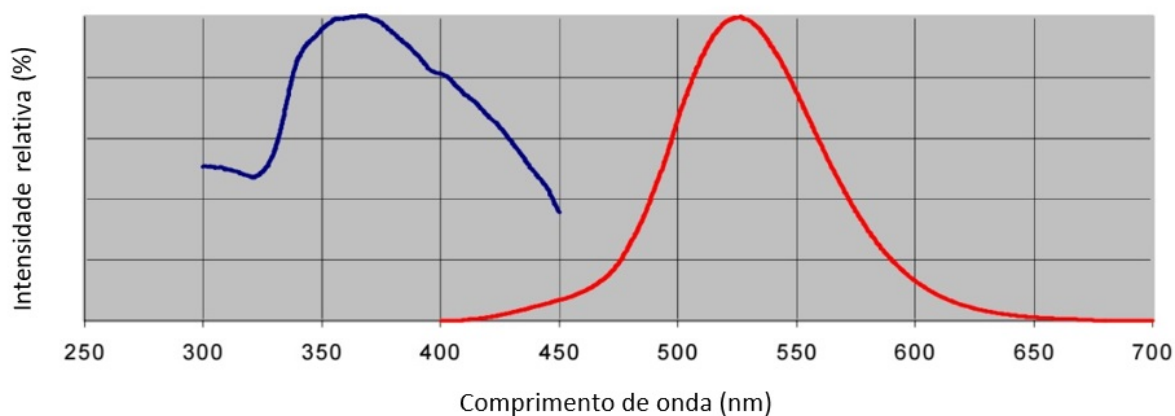


Figura 3.5: Espectro de excitação - a azul, e espectro de emissão - a vermelho, do pigmento fosforescente [fonte: Ficha Técnica DSKH Portugal]

De acordo com a ficha técnica da firma que nos forneceu o produto, o tamanho médio das partículas que o constituem este pigmento fosforescente é de 23 μm , com uma variação de 3 μm , e uma densidade de 4.08 g/cm^3

Capítulo 4

Ensaaios

4.1 Aspectos gerais

Os ensaios foram realizados na *Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT), da Universidade Nova de Lisboa*. Uma descrição do túnel de vento pode ser encontrada na secção 4.1.1. Os primeiros ensaios serviram para escolher os compostos usados e afinar a proporção da mistura - ver secção 4.3. Os ensaios posteriores ocuparam-se da visualização do escoamento.

4.1.1 Túnel de vento da FCT

Trata-se de um túnel de circuito fechado, com uma câmara de ensaios de secção transversal de dimensões 1,50 m x 1,20 m. Nesta parte do túnel a intensidade de turbulência é inferior a 1%.

O sistema de controlo dos ventiladores - três no total - é baseado num conversor de frequências, que permite fixar a velocidade desejada, bem como mantê-la pelo período de tempo necessário. A velocidade do escoamento não perturbado é calculada a partir da pressão dinâmica, medida à entrada do túnel, com um manómetro *Betz* com precisão nominal de 0.1 Pa. A temperatura do ar é lida num termómetro existente a metade desta secção do túnel [18].



Figura 4.1: Modelo no túnel de vento

Este túnel não possui chão móvel, pelo que a espessura de deslocamento δ^* da camada limite no solo, altera a velocidade relativa do ar no canal por baixo da fuselagem do comboio. Para minorar este efeito, o modelo aproveita a zona inicial da secção de trabalho, em que a camada limite sobre o chão tem ainda uma espessura pequena. O chão do túnel é liso e o modelo do comboio foi elevado para ter em conta a espessura de deslocamento. Na retaguarda, a elevação atinge os 5 mm porque a taxa de crescimento da espessura de deslocamento prevista é de 1.6 mm/mm, considerando o regime como turbulento desde o início da secção de entrada do túnel – perfil B da figura 4.3.

Os carris, por baixo do comboio, também têm uma altura crescente do nariz para a retaguarda para garantir uma distância constante entre a cabeça do carril e face inferior da fuselagem.

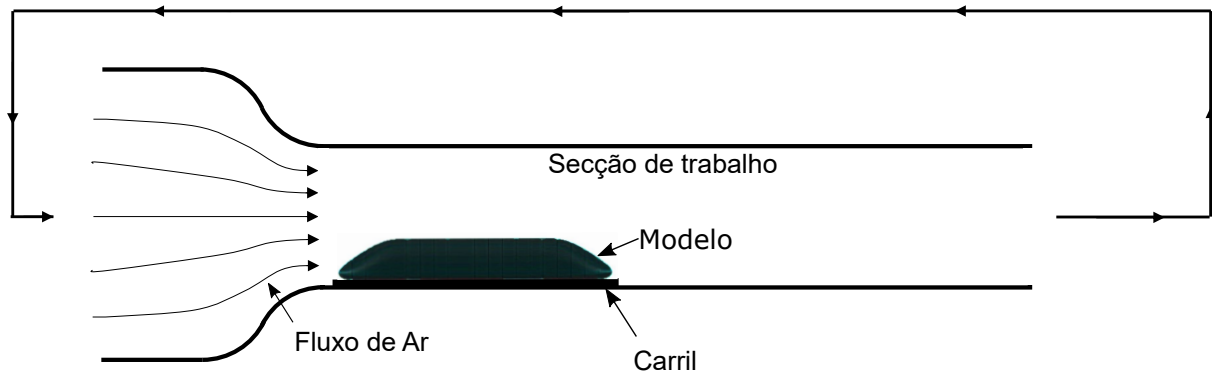


Figura 4.2: Representação esquemática do túnel de vento, de circuito fechado (A imagem não está à escala)

4.1.2 Semelhança do modelo e do protótipo

Por razões práticas, por vezes é difícil ou mesmo impossível garantir que todos os números adimensionais relevantes no estudo aerodinâmico sejam iguais. O protótipo deste comboio, com uma velocidade de aproximação de 70 m/s (250 km/h) e um comprimento de 18 m tem um número de Reynolds de $8,4 \times 10^7$. Para assegurar o mesmo número de Reynolds no modelo, a velocidade de referência teria de ser dez vezes superior, ou seja 700 m/s (2500 km/h); a esta velocidade, o escoamento seria supersónico ($Ma \approx 2$) e o efeito da compressibilidade não poderia ser desprezado, alterando por completo o problema. No entanto, é possível a realização de ensaios a diferentes números de Reynolds no modelo e no protótipo, uma vez que, a elevados números de Reynolds, o escoamento adimensional, nomeadamente o coeficiente de resistência aerodinâmica, é aproximadamente constante.

As principais diferenças entre o modelo e o protótipo verificadas no escoamento superior são ao nível da camada limite, onde um número de Reynolds mais elevado se traduz numa antecipação da transição e num perfil mais cheio, com menor défice de quantidade de movimento θ (em escala adimensional) e maior resistência da camada limite ao gradiente de pressão adverso.

Contudo estas diferenças não são menos significativas a elevados números de Reynolds, como é o caso do modelo ensaiado e do protótipo. A principal diferença entre o modelo e este protótipo deve-se à condição de fronteira no chão. No referencial do veículo, o chão desloca-se com a mesma velocidade do escoamento de aproximação, mas não é prático ter um chão móvel no túnel aerodinâmico. Na figura 4.3, o caso A, representa simbolicamente o perfil de velocidades por baixo do comboio, num túnel de vento com chão movendo-se com velocidade igual à velocidade do escoamento de aproximação. O caso B, corresponde ao túnel com chão parado. O perfil de velocidades representado em C é dos ensaios com correcção da espessura de deslocamento.

A elevação da retaguarda do modelo teve como objectivo a aproximação do perfil C ao perfil A - figura 4.4b.

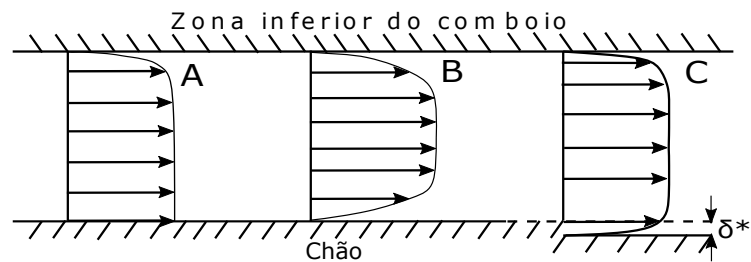


Figura 4.3: Perfis de velocidades, na zona inferior do comboio, para três situações. A - Perfil de velocidade real com referencial na linha; B - Perfil de velocidade no túnel com chão parado; C - Perfil de velocidade com correcção da espessura de deslocamento.

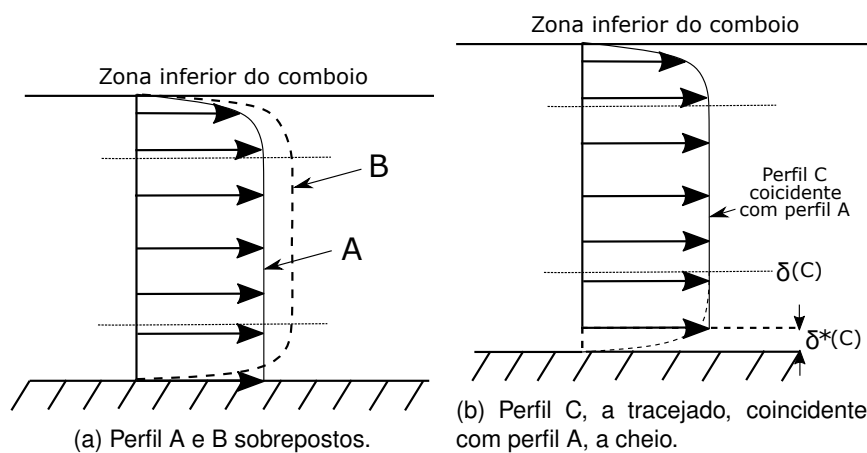


Figura 4.4: Sobreposição dos perfis de velocidade na parte inferior do comboio.

4.1.3 Efeito de bloqueamento no túnel

Os testes em túnel de vento produzem efeitos de bloqueamento que alteram a velocidade local do escoamento. No caso em estudo, o túnel de vento tem uma área transversal de $1,8 \text{ m}^2$ e, com a colocação do modelo do comboio, com ângulo de guinada nulo, a área fica reduzida a $1,72 \text{ m}^2$. A razão entre a velocidade do escoamento nesta zona do túnel e do escoamento de aproximação é de 1,04, pelo que o efeito de bloqueamento pode ser desprezado.

Mesmo para um ângulo de guinada máximo de 20° , o efeito de bloqueamento continua a poder ser desprezado porque o modelo nunca fica muito perto das paredes laterais.

4.2 Mecanismo de formação das estrias

4.2.1 Motivação e desafios

Desenvolver a técnica de visualização foi um objectivo instrumental desta dissertação, que ocupou muitas semanas de trabalho no túnel aerodinâmico, de estudo e muitas diligências a preparar pigmentos e grãos. A superação de problemas revelou-se extensa e interessante porque se procurou compreender o fenómeno observado - aparecimento nítido das linhas de tensão de corte - como se expõe seguidamente. Tal como referido na secção 3.3, foi procurada uma alternativa ao dióxido de titânio.

4.2.2 Desvio angular de uma partícula em relação à horizontal

Considerando uma partícula de grão de um pigmento, aproximada como sendo esférica, imersa numa película de óleo, sujeito à acção da gravidade — Peso \vec{P} — e, à força de arrasto — \vec{D} —, esquematizado em 4.5.

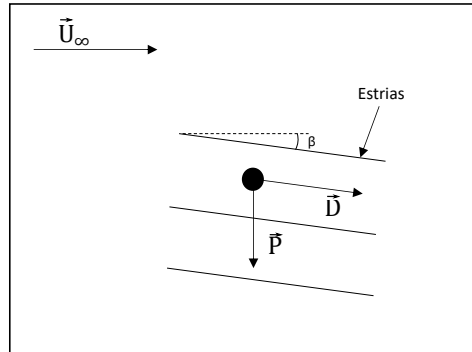


Figura 4.5: Grão arrastado no filme de óleo sujeito à acção gravidade.

Num escoamento não confinado:

$$\vec{P} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 \vec{g} \quad (4.1)$$

onde r é o raio da partícula do grão e, ρ_1 é a densidade do grão.

Dada que a partícula está a ser arrastada pelo fluido, com uma pequena diferença de velocidade em relação ao mesmo, o número de Reynolds é inferior a 1 ($Re \ll 1$). A força de arrasto é calculada pela lei de Stokes:

$$\vec{D} \propto 6\pi\mu r \vec{V}_r \quad (4.2)$$

onde \vec{V}_r é a velocidade relativa e r o raio da partícula.

Para minimizar o efeito da gravidade, pretende-se:

$$\frac{|\vec{D}|}{|\vec{P}|} \gg 1 \quad (4.3)$$

Em 4.3, não se descontou ao peso a força de impulsão porque, numa película vertical de óleo, a pressão do óleo não é hidrostática. Substituindo as equações 4.1 e 4.2 em 4.3, obtém-se:

$$\frac{9\mu \vec{V}_r}{2gr^2\rho_1} \gg 1 \quad (4.4)$$

A partir da equação 4.4 conclui-se que partículas mais pequenas tendem a acompanhar o fluido com menor influência da força gravítica.

4.2.3 Medição do desvio angular

Devido ao efeito gravítico, procurou-se quantificar o desvio angular máximo de uma estria em função da velocidade do escoamento de aproximação. Colocou-se uma placa plana vertical numa conduta horizontal no *Instituto Superior Técnico*. Como se sabia que o escoamento de ar era horizontal, a inclinação das estrias em relação à horizontal indicava o desvio angular devido ao peso.

Esta conduta tinha uma secção transversal de 160 x 240 mm e os ensaios foram realizados numa zona em que praticamente toda a secção estava fora da camada limite das parede. Portanto, a placa vertical recebia um escoamento horizontal de velocidade uniforme, alinhado com ela. A instalação permite o ajuste da velocidade por regulação do caudal de entrada. Foram realizados ensaios para três velocidades diferentes. O valor da velocidade foi obtido a partir da equação 4.6, e os valores da pressão dinâmica, Δp , foram retirados de um manómetro de coluna de álcool. Os dados e resultados relativos aos ensaios encontram-se na tabela 4.1.

Foi usada uma mistura de 16 ml de volume de óleo 5W40 para 4 ml de volume de querosene e de 3,5 ml dióxido de titânio 2 ml de óleo de linhaça.

Velocidade do escoamento uniforme no túnel A pressão dinâmica é dada por:

$$\Delta p = \rho_{alcohol} g \Delta h \quad (4.5)$$

onde $\rho_{alcohol}$ é 850 kg/m^3 e Δh é a diferença de altura manométrica entre o tubo de pressão estática e o tubo de pressão dinâmica. A velocidade do escoamento é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{ar}}} \quad (4.6)$$

A equação 4.6 é obtida a partir da equação de Bernoulli. Na tabela 4.1, Δl representa o comprimento molhado no manómetro e α a inclinação do manómetro.

A altura manométrica vertical é: $\Delta h = \Delta l \sin(\alpha)$.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Δl [mm]	75,9	102	130
α [°]	36,7	36,7	36,7
Δh [mm]	45,3	60,9	77,7
Δp [Pa]	378,2	508,3	647,8
Velocidade [m/s]	24,3	29,1	32,9
β [°]	$9,7 \pm 1,4$	$4,7 \pm 0,9$	$3,8 \pm 0,08$

Tabela 4.1: Dados, velocidade de ensaios e desvio β de uma estria em relação à horizontal. O ângulo α corresponde à inclinação do manómetro.

De acordo com a tabela 4.1, o valor máximo encontrado para o ângulo de desvio β foi de $9,7^\circ$, para a velocidade mais baixa. Foram retirados quatro valores de β para cada ensaio e calculada a sua média aritmética e o desvio padrão (cf. tabela 4.1).

Nos primeiros ensaios, verificou-se uma elevada aglomeração de fluido nalgumas secções da placa, que formavam pequenos rios óleo muito influenciados pela força gravítica devido à elevada espessura do filme de óleo. Só depois de essa algomeração ser estriada significativamente é que a película de óleo começava a responder às tensões de corte na interface com o ar em vez de sofrer uma influência importante da gravidade. Tal impõe um cuidado acrescido no decorrer dos ensaios no modelo, de forma a garantir a menor espessura e a boa distribuição de filme de óleo pela superfície. A 29 m/s, uma placa plana vertical com demasiado óleo tem um desvio de 8° ; Com uma espessura de óleo na ordem de um micrómetro, o desvio é de $4,7^\circ$.

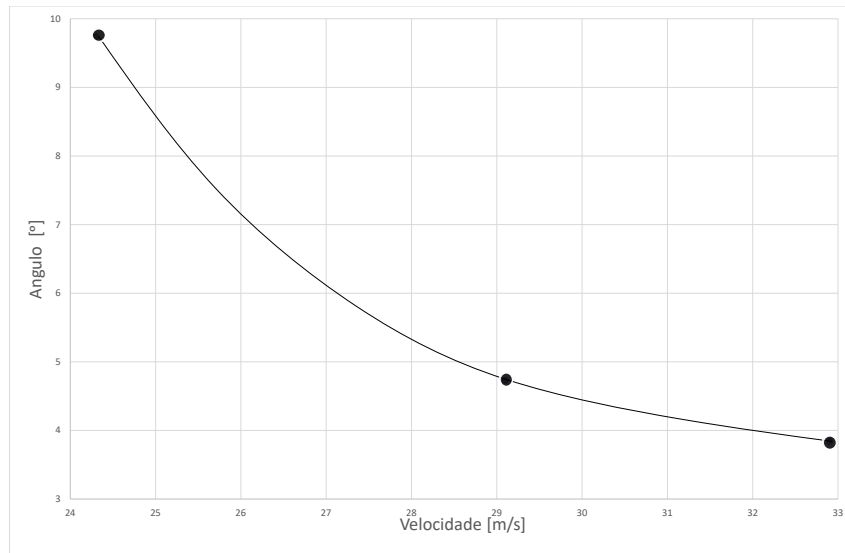


Figura 4.6: Erro angular.

O gráfico 4.6 sugere que o desvio angular máximo é uma hipérbole quadrática da velocidade exterior, o que é expectável, uma vez que a tangente do ângulo β é proporcional a τ_p / τ_w (ver secção 3.2.2) e $\tau_w = f(C_f, \rho, U_e^2)$, sendo que, a números de Reynolds elevados, τ_w é aproximadamente proporcional a U_e^2 :

$$\tan(\beta) = \frac{k}{U_e^2} \quad (4.7)$$

em que $k = \frac{\rho_f \varepsilon g \cos(\theta)}{C_f \frac{1}{2} \rho_a r}$.

De facto, $C_f = f(Re)$ é esta função é aproximadamente constante para esta gama de velocidades.

Foram igualmente feitas diversas tentativas de variação das proporções dos componentes da mistura, especialmente a proporção de querosene e óleo de linhaça. Não foram observadas alterações significativas para o caso do querosene, contudo a adição excessiva de óleo de linhaça provoca uma difusão maior das partículas de TiO_2 , tornando o aspecto das estrias do pigmento mais difusas. Foi ainda observada um dependência da formação de estrias nítidas em função da velocidade, sendo que a velocidades mais baixas a formação de estrias é menor e as visíveis são pouco distintas.

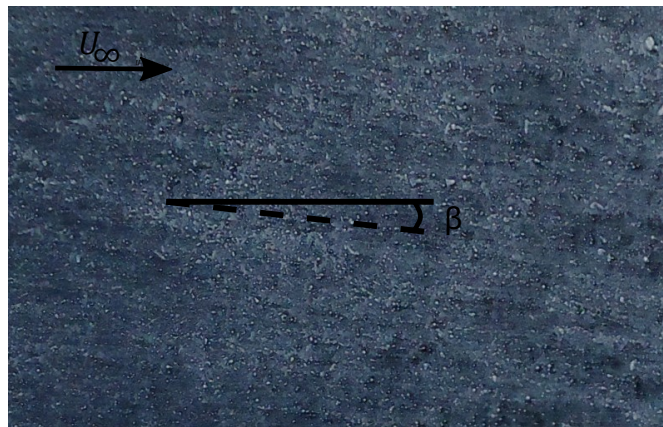


Figura 4.7: Desvio em relação à horizontal de uma estria - ângulo $\beta = 3,8^\circ$ - numa placa vertical, onde a linha a tracejado representa o trajecto seguido pela partícula.

4.2.4 Mecanismo da formação de estrias de pigmento sobre a superfície sólida

O escoamento de ar sobre o filme de óleo produz tensões de corte na interface óleo-ar que produzem o estiramento da película de óleo. Sob a acção destas forças de corte, o óleo espalha-se pela superfície diminuindo a sua espessura. As partículas em suspensão acompanham este movimento e, à medida que o óleo evapora, as partículas em suspensão começam a depositar-se e inicia-se o processo de formação das estrias.

A deposição de um grão na superfície constitui um obstáculo contra o qual colidem outros grãos, de forma sucessiva. Os grãos que não chocam contra aqueles que já estão depositados, irão posteriormente depositar-se, devido à diminuição da espessura do filme de óleo, na superfície ou encalhar noutro grão.

4.3 Ensaaios com diferentes pigmentos

Nesta secção são descritos os ensaios realizados tendo em vista a superação do problema de obter registos fotográficos claros. Pretendeu-se também afinar a proporção dos componentes na mistura de óleo, dado que não existe uma regra, na literatura, que indique as correctas proporções a utilizar. Existem contudo algumas sugestões disponíveis em [19], que estiveram na base da afinação feita. Em todos os ensaios, o filme de óleo foi aplicado com um rolo, de forma a uniformiza-lo.

4.3.1 Ensaaios com pigmento fosforescente

Foi realizada uma campanha de ensaios onde, partindo das proporções dos componentes usadas em [8], foi sendo variada a proporção de óleo, de querosene, de óleo de linhaça e de pigmento, até se obter estrias bem definidas.

Os ensaios para afinação foram realizados com velocidade do escoamento de aproximação de 25,3 m/s sobre uma placa plana, pintada a preto mate, alinhada com o escoamento de aproximação. Foram também realizados ensaios sobre o modelo. Estes últimos ensaios decorreram no túnel de vento da FCT, a uma velocidade de 29,5 m/s.

As proporções da mistura de óleo que permitiram a visualização de algumas estrias, encontram-se na tabela 4.2. Foi observado que o pigmento fosforescente, após a evaporação do óleo e do querosene, apresentava um aspecto muito homogéneo e, que embora se conseguissem observar as estrias, estas encontravam-se demasiado esbatidas, tornando a sua visualização muito limitada e o seu registo fotográfico praticamente impossível - figuras 4.8 e 4.9.

No casos dos ensaios em placa plana, procurou-se ainda diminuir a espessura, ϵ , do filme de óleo, esperando mais tempo, para o óleo ficar mais estirado e se evaporar mais. Alterou-se também, independentemente a quantidade do dispersante da mistura - óleo de linhaça.

Composto	1ª Tentativa	2ª Tentativa
Óleo	16	12
Querosene	4	8
Pigmento	4	4
Óleo de linhaça	3,5	3,5
Volume total	27,5	27,5

Tabela 4.2: Quantidade de volume utilizado de cada componente na mistura, em ml.

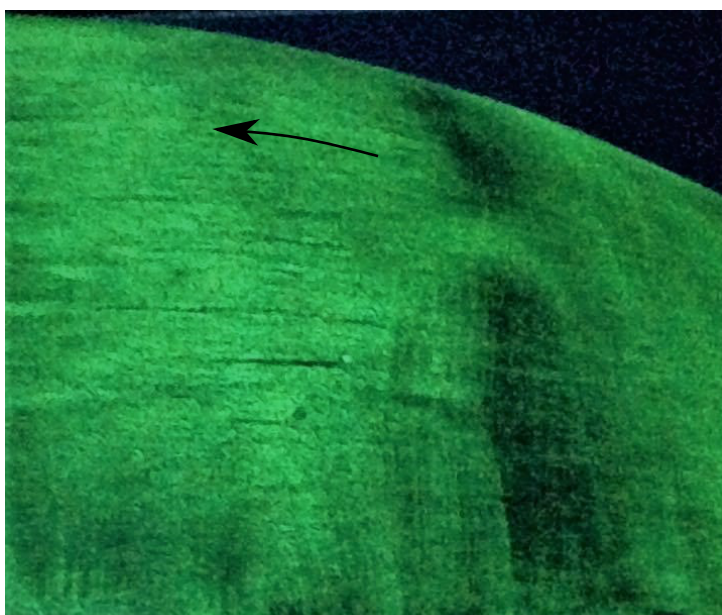


Figura 4.8: Mancha demasiado homogénea do pigmento fosforescente.

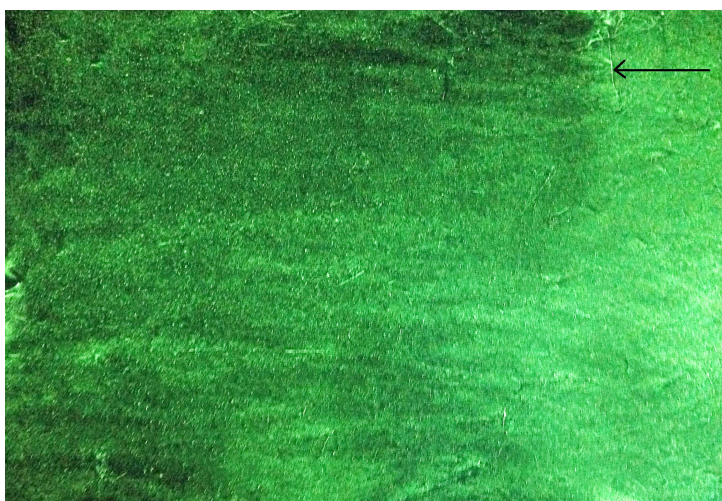


Figura 4.9: Escoamento em placa plana do pigmento fosforescente.

Dado que o diâmetro do grão do pigmento fosforescente é cerca de cem vezes superior ao diâmetro do grão do dióxido de titânio, procurou-se aumentar a espessura do filme de óleo, de forma a garantir a suspensão dos grãos durante o estriamento do filme. Constatou-se que o aumento da espessura permitia a formação de algumas estrias localmente, embora pouco nítidas. Contudo o aumento da espessura tem uma maior sensibilidade à gravidade, pelo que o seu uso é limitado a superfícies pouco inclinadas.

Visualização da partícula Para compreender a não formação de estrias com a utilização do pigmento fosforescente, suspeitámos que o seu diâmetro fosse demasiado grande e a sua deposição ocorresse com a película de óleo ainda muito espessa, antes de ser estirada e reflectir as tensões superficiais do escoamento de ar. Por isso, os grãos do pigmento fosforescente foram vistos ao microscópio. O objectivo principal era saber se estes pigmentos possuíam tamanhos homogéneos e confirmar os seus tamanhos. Esta visualização foi realizada no *Centro de Química-Física Molecular do Instituto Superior Técnico*. O pigmento fosforescente apresentou partículas de tamanho heterogéneo, entre os 3 μm e 26 μm . Foram realizadas observações com uma ampliação de 10x e 50x.

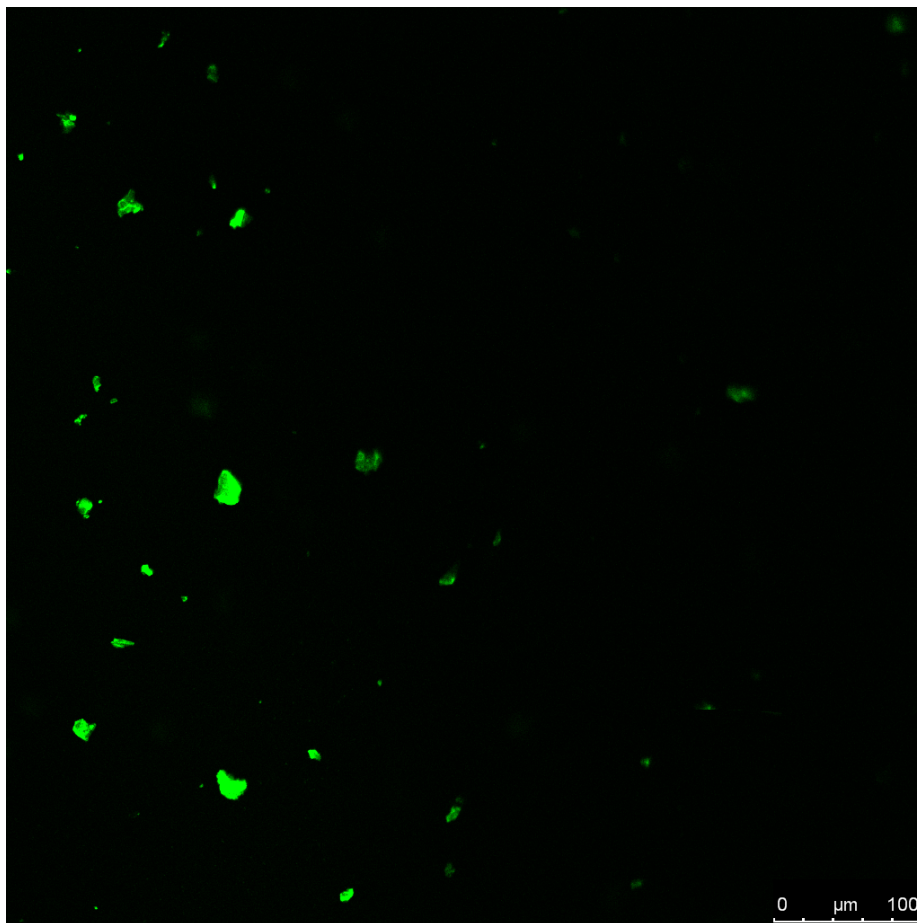


Figura 4.10: Visualização ao microscópio do pigmento fosforescente com uma ampliação de 10x.

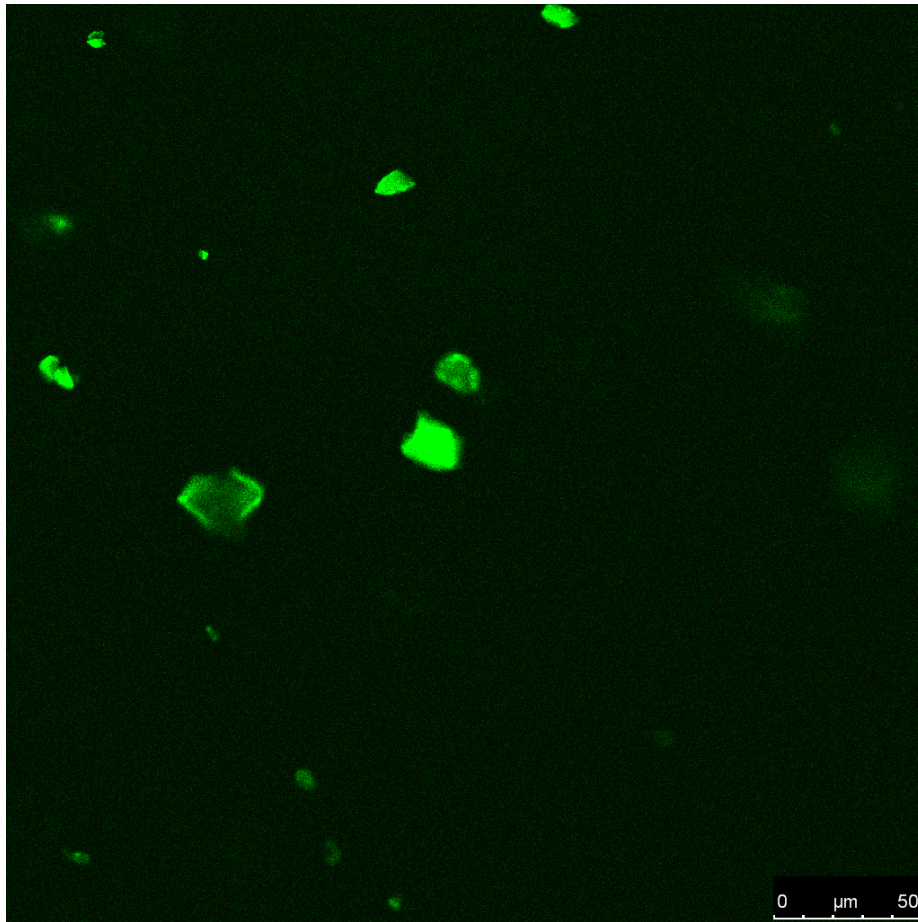


Figura 4.11: Visualização ao microscópio do pigmento fosforescente com uma ampliação de 50x.

Foi também feita uma observação do dióxido de titânio com uma ampliação de 50x. Contudo o microscópio utilizado foi concebido para a visualização de partículas fosforescente e fluorescentes e com um tamanho mínimo na ordem de $1 \mu m$, o que impossibilitou uma boa visualização do pigmento de dióxido de titânio. A figura 4.12 procura representar a imagem observada ao microscópio deste pigmento. Tratam-se de grãos com diâmetros aparentemente iguais e de dimensões inferiores às do pigmento fosforescente, o que poderá ajudar a explicar o melhor desempenho do dióxido de titânio na formação de estrias.

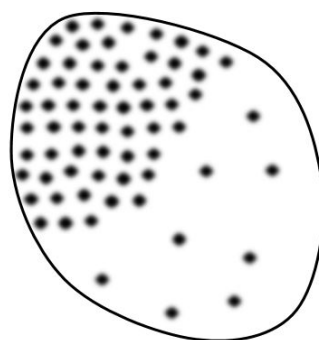


Figura 4.12: Representação da observação feita no microscópio do dióxido de titânio.

As visualizações feitas no microscópio sugerem que a não homogeneidade do diâmetro das partí-

culas fosforescentes e a elevada dimensão de algumas delas explicam o não aparecimento de estrias como no caso do dióxido de titânio.

4.3.2 Ensaio complementares

Corante fluorescente Tendo em conta os resultados obtidos para o pó fosforescente, procurou-se pigmentos que reagissem à luz UV e que tivessem um diâmetro inferior a este. Foram feitos ensaios com um corante fluorescente, fornecido pelo *Centro de Química-Física Molecular do IST*, com o objetivo de obter as estrias que não se obtiveram com o pigmento fosforescente, mantendo a particularidade de a visualização ser feita sobre a luz UV.

Os ensaios foram realizados sobre uma placa lisa e alinhada com o escoamento de aproximação, com uma velocidade do escoamento de aproximação de 25,6 m/s. O corante foi misturado com óleo e querosene, aproximadamente nas mesmas proporções usadas com o dióxido de titânio. Foram realizados sucessivos ensaios, nos quais se procurou alterar a proporção dos componentes da mistura, bem como se procurou perceber o efeito da não utilização do óleo de linhaça após o estiramento do óleo.

Os ensaios revelaram uma distribuição muito homogénea do corante, não existindo formação de estrias, verificando-se em contrapartida a formação de vários glóbulos visíveis - ver figura 4.13. Verificou-se ainda que o óleo de linhaça dispersava ainda mais o corante, tornando-o ainda mais homogéneo.

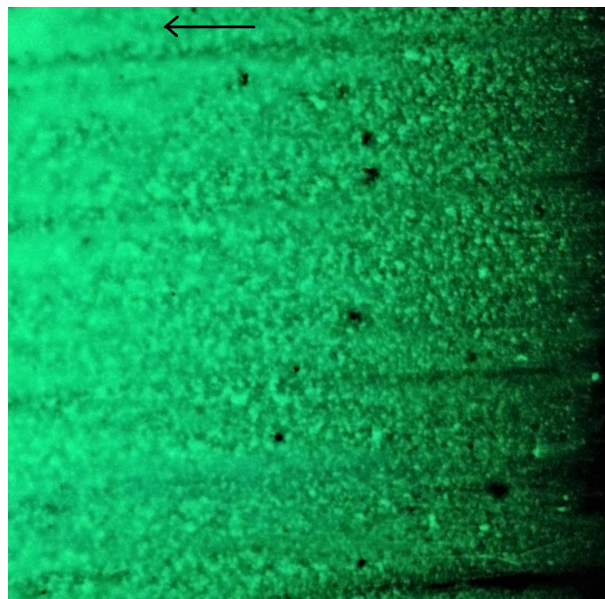


Figura 4.13: Escoamento do corante fluorescente sem óleo de linhaça.

Esferas de sílica com corante No sentido de criar um pigmento de dimensões próximas do dióxido de titânio e capaz de reagir à luz UV, recorreu-se a esferas de sílica tingidas com corante fluorescente. O pigmento foi preparado no laboratório do *Centro de Química-Física Molecular do IST*. Foram misturados 0.125 mg de esferas de sílica com 0.10 mg de corante. Para impregnar o corante nas esferas de sílica, diluiu-se o corante e as esferas em etanol puro. A mistura foi sujeita a duas fases de centrifugação. Uma primeira, mais lenta, com duração de 14h e uma última com duração de 5 min. Posteriormente, o etanol evaporou lentamente até à secagem completa das esferas de sílica tingidas com o corante.

As esferas de sílica tingidas com o corante foram misturadas com o óleo e querosene, com e sem adição de óleo de linhaça. As proporções usadas foram alteradas diversas vezes, não tendo sido em nenhum caso observado a formação de estrias. Observou-se também que o estiramento do óleo não

era homogéneo sobre a superfície, bem como a existência de um elevado número de grãos facilmente visíveis - zonas A e B da figura 4.14 - que coalesceram no decorrer do ensaio. Foram realizadas duas campanhas de ensaios, com velocidades do escoamento de aproximação de 25 m/s e 29 m/s. A figura 4.14 exibe o resultado do estiramento do filme de óleo, sobre acção da luz ultravioleta:

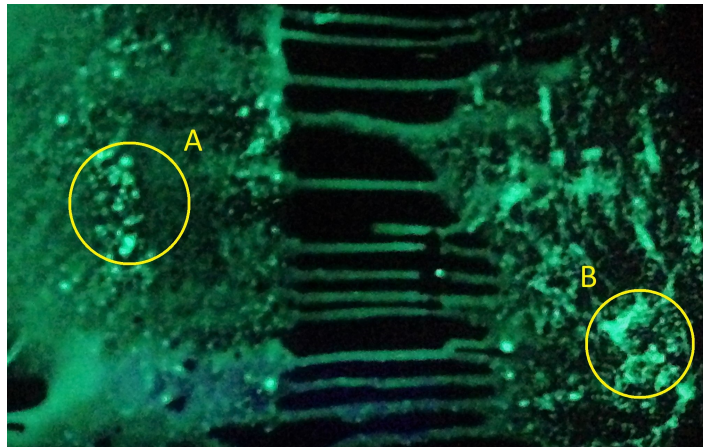


Figura 4.14: Escoamento com partículas de sílica tingidas com corante fluorescente. Sentido do escoamento da direita para a esquerda.

A razão pela qual se observaram grãos deve-se ao facto do etanol não ter evaporado totalmente, havendo por isso coalescência dos grãos de sílica ainda antes do estiramento do filme de óleo.

Capítulo 5

Resultados

Foram realizado ensaios a ângulo de guinada nulo e com ângulo de guinada de 12 e 20 graus. A escolha dos ângulos foi feita de forma a permitir a comparação com os testes realizados em [8]. Para a obtenção dos registos fotográficos foi utilizada uma máquina fotográfica *Sony dsc-w550*.

5.1 Ângulo de guinada nulo

Os testes foram realizados simultaneamente nas secções dianteira e traseira do modelo, procurando encontrar zonas de convergência das linhas de tensão de corte superficiais. Foi aplicada uma fina camada de óleo a rolo, para garantir a uniformidade do filme sobre a superfície, usado as proporções de mistura indicadas na tabela 5.1. Houve o cuidado de fazer a aplicação da mistura ortogonalmente à direção do escoamento para evitar que as irregularidades da aplicação se confundissem com as estrias relacionadas com o escoamento.

Os ensaios foram realizados à velocidade máxima permitida pelo túnel e a mesma foi obtida a partir dos valores de pressão e temperatura no interior do túnel.

Os dados relativos às condições estão organizados na seguinte tabela:

	1ª Campanha	2ª Campanha	3ª Campanha	4ª Campanha
Pressão dinâmica [Pa]	448	446	447	448
Temperatura [°C]	25,8	26,5	28,5	28,5
Densidade do ar [kg/m ³]	1,181	1,178	1,17	1,17
Velocidade [m/s]	27,5	27,5	27,6	27,7

Tabela 5.1: Dados das campanhas de ensaios.

	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Óleo 10W40	18	24	18
Querosene	3,2	6	3,2
TiO_2	2,4	4,8	2,4
Óleo de linhaça	2,6	4	2,6

Tabela 5.2: Volume utilizado de cada componente na mistura, em ml.

No quarto ensaio trabalhou-se com a mesma mistura de óleo do 3º ensaio, procedendo-se apenas a redistribuição de óleo na superfície, nas zonas de maior acumulação.

A duração de cada ensaio variou entre os trinta e quarenta minutos, porque foi necessário garantir o estiramento da película de óleo e dar tempo para a evaporação do óleo.

5.1.1 Estiramento do óleo na secção dianteira

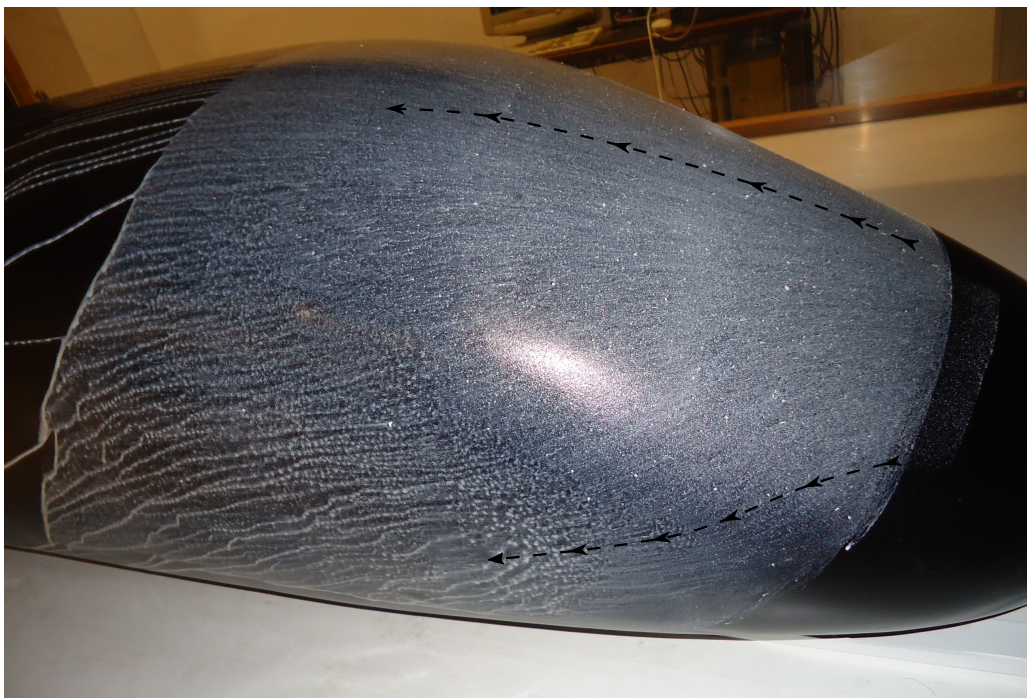


Figura 5.1: Escorregamento do filme de óleo ao fim de 12 minutos na secção dianteira.

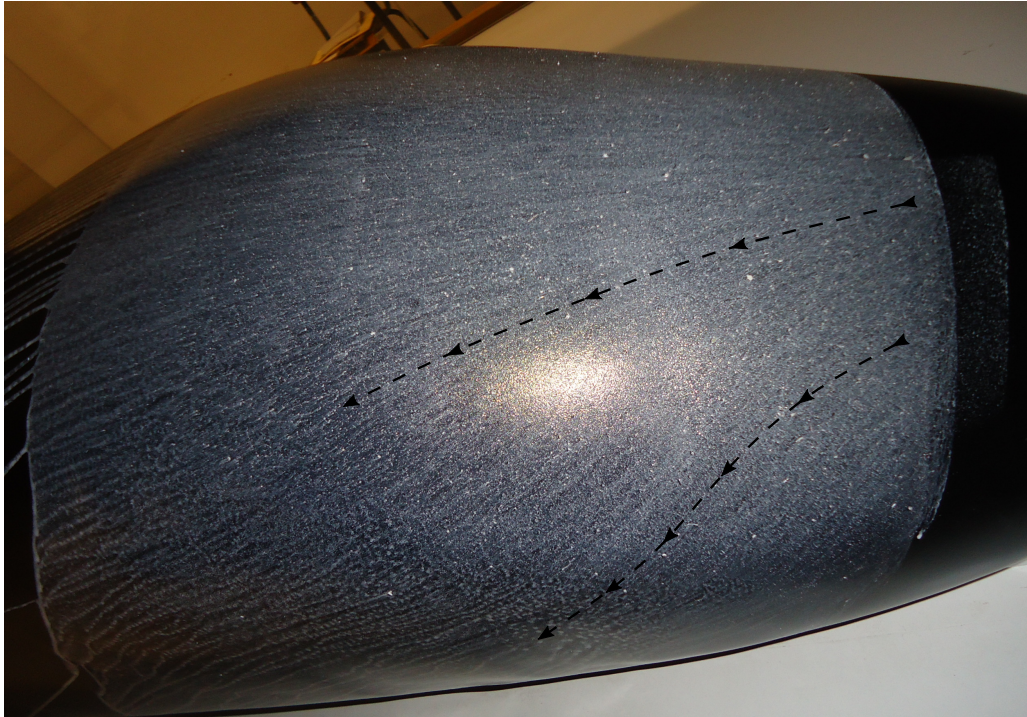
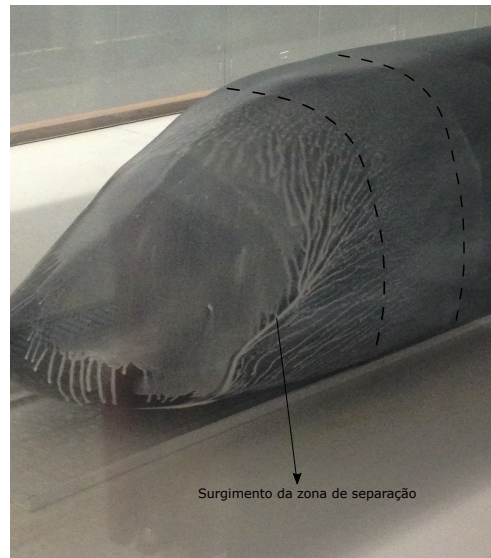


Figura 5.2: Escorregamento do filme de óleo ao fim de 20 minutos na secção dianteira.

Na figura 5.1 são visíveis *rios* de óleo que ainda escorrem ao longo da superfície do modelo, sendo no entanto já visível a formação de estrias, assinaladas pelas setas. Nestes *rios*, o óleo tem maior espessura e portanto a sua inclinação é mais afectada pela gravidade. Decorridos vinte minutos do ensaio já era visível uma maior extensão de estrias, com a quase totalidade do óleo evaporado - figura 5.2.



(a) Película de óleo demasiado espessa, ainda pouco estirada pelo escoamento de ar.



(b) Convergência das linhas de corrente para a região de separação.

Figura 5.3: Escoamento na retaguarda do modelo

Na figura 5.3b, na zona entre as linhas a traço interrompido é visível a formação de estrias, que seguem as linhas de corrente limite sem influência significativa da gravidade. Mais atrás, há *rios* de

óleo que não traduzem com tanta fidelidade o escoamento superficial. Mesmo assim já se advinham linhas de corrente convergentes, a denunciar uma separação tridimensional. Na figura 5.4 já quase toda a cauda do comboio possui estrias claramente formadas. As manchas das várias zonas devem-se a que a aplicação do óleo se fez por zonas e nem todas ficaram com a mesma densidade do pigmento.

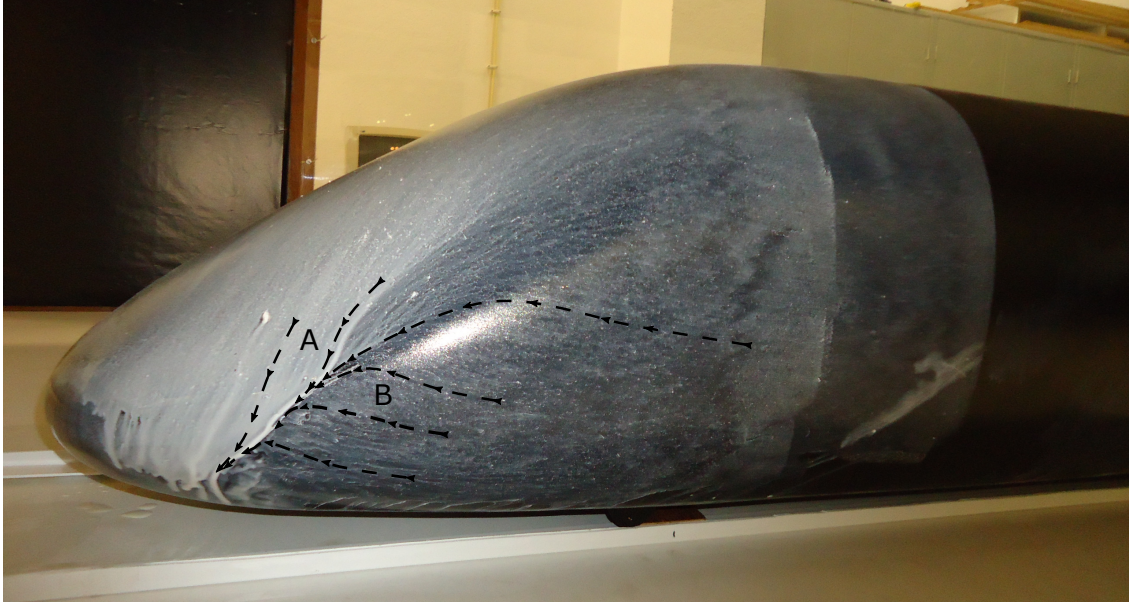


Figura 5.4: Convergência das linhas de tensão de corte na retaguarda do modelo.

Convergência das linhas de corrente superficiais A partir das observação das estrias, verifica-se que antes da extremidade posterior do modelo, o escoamento vindo topo é desviado lateralmente - linhas A da figura 5.4 e 5.5, e simultaneamente, o escoamento inferior é desviado para cima - linhas B da figura 5.4. As estrias convergem dando origem a uma zona de separação. A região de convergência e separação de camada limite pode situar-se ligeiramente acima do indicado na figura 5.4 por causa da gravidade. No entanto, o desvio das estrias é pequeno quando o filme de óleo já está estirado, tanto mais que a superfície do modelo não é vertical nesta zona.

Numa fase mais adiantada no estiramento do óleo já se nota a convergência das linhas de corrente limites, indicando um possível local de separação de camada limite tridimensional. Na figura 5.4 é possível observar diferenças na formação de estrias na zona A e B. A zona A, mais homogênea face à zona B. Esta diferença deve-se à diferença de velocidades em cada uma das zonas, sendo a velocidade em A inferior a B.

Para ângulos de guinada nulos, na zona do comboio com secção transversal constante, as linhas de tensão de corte são muito aproximadamente paralelas, divergindo ou convergindo apenas quando a superfície exhibe curvatura no plano longitudinal, como é o caso da dianteira e traseira do modelo.

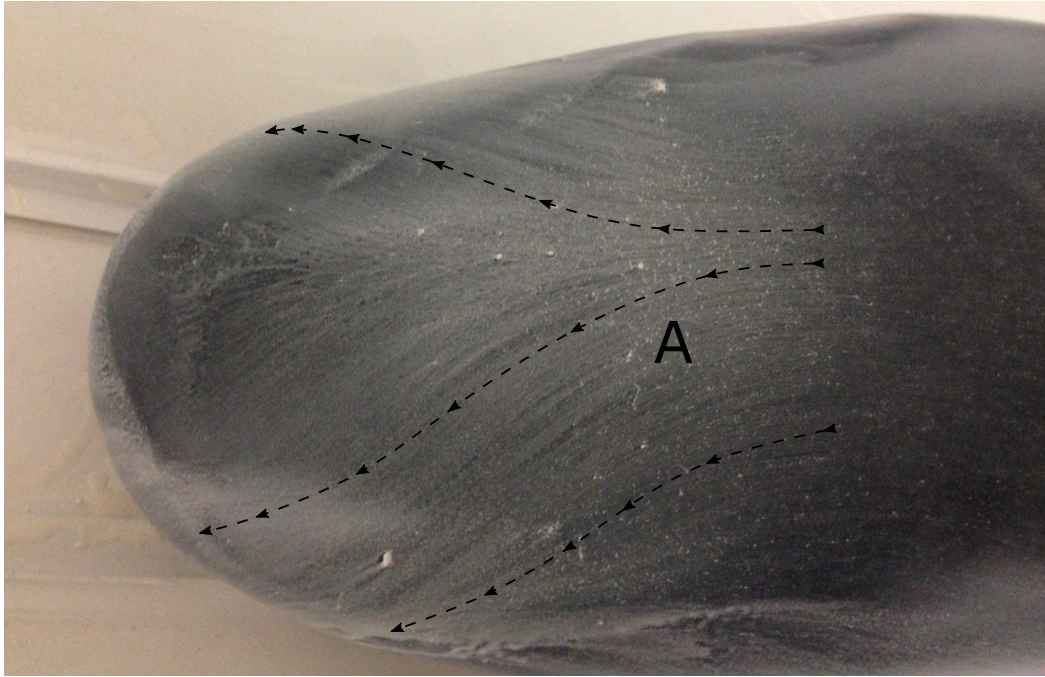


Figura 5.5: Curvatura, na zona posterior do comboio, das linhas de corrente superficiais.

A simulação numérica do escoamento (figura 5.6) mostra que os modelos numéricos correm o risco de apresentar demasiada difusão na região da parede da camada limite [8], diminuindo a torção e alterando consequentemente as linhas de corrente limites e as zonas de separação tridimensional.

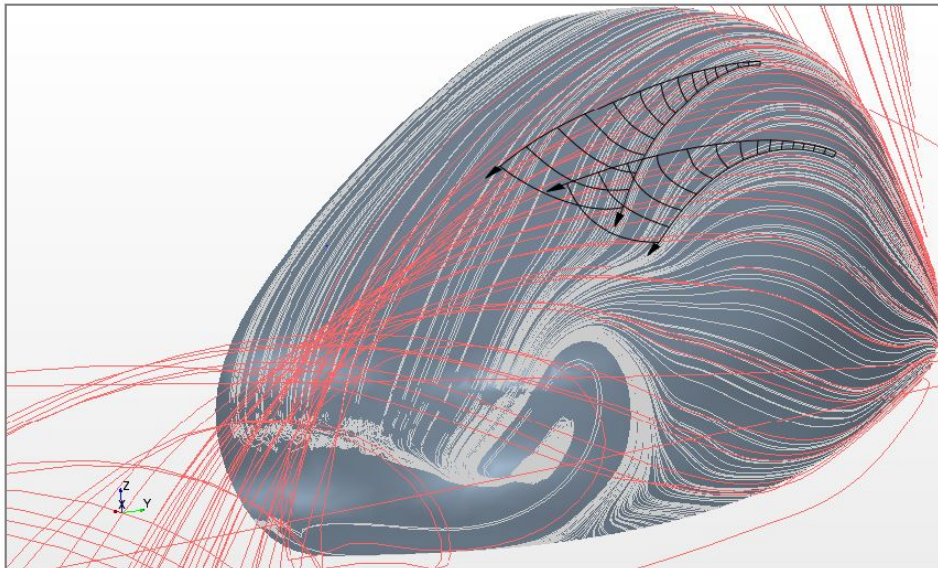


Figura 5.6: Simulação numérica [2] da torção do escoamento, com formação de vórtices longitudinais.

5.2 Ensaaios com ângulos de guinada não nulos

A figura 5.7 representa o esquema de montagem em planta do modelo para ângulos de guinada - θ - diferentes de zero. Por segurança foram colocados dois arames a segurar o modelo lateralmente.

Em todos os ensaios o modelo também estava seguro longitudinalmente por um arame fino. No entanto, apesar de o modelo ser muito leve, oco e praticamente constituído por espuma, o atrito das rodas foi suficiente para segurar o modelo, mesmo à velocidade máxima do túnel. Os fios de arame nunca chegaram pois a ficar em tensão. Este facto é uma indicação de que a carenagem deste comboio não origina esforços aerodinâmicos perigosos, i.e., capazes de derrubar o comboio.

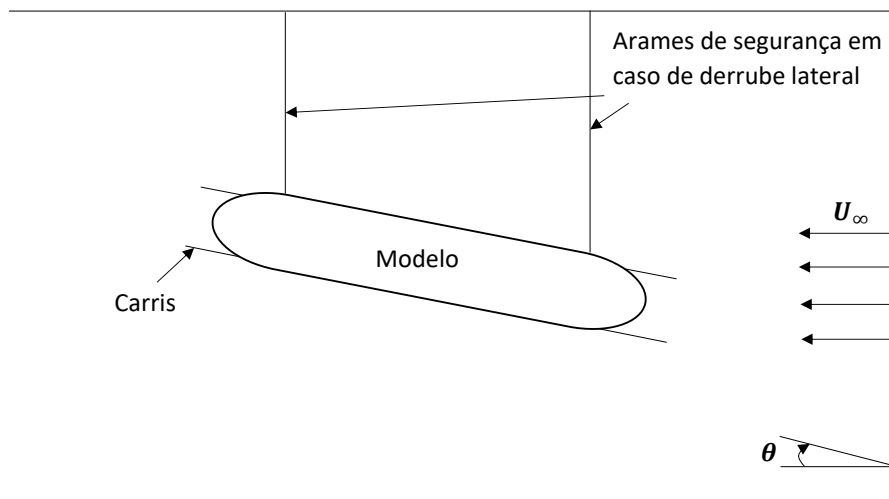


Figura 5.7: Representação esquemática da montagem para os ensaios com ângulo de guinada não nulo

Análise adimensional entre o protótipo e o modelo As forças aerodinâmicas F são proporcionais ao quadrado do comprimento de referência e ao quadrado da velocidade relativa. Designando por p as variáveis referentes ao protótipo e m as do modelo, para o mesmo coeficiente de resistência aerodinâmico C_d :

$$F_p = F_m \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^2 \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^2 \quad (5.1)$$

Onde:

$$\frac{l_p}{l_m} = 10 \quad (5.2)$$

Para $v_m = 27$ m/s e $v_p = 70$ m/s, a razão entre as forças aerodinâmicas no protótipo e no modelo, usando a equação 5.1 é de 625.

Para uma igual relação entre as forças aerodinâmicas e o peso, e para uma massa do protótipo de 13×10^3 kg, a massa do modelo M_m deveria ser:

$$M_m = M_p \frac{F_{am}}{F_{ap}} = 21 \text{ kg} \quad (5.3)$$

Onde F_{am} e F_{ap} designam as forças aerodinâmicas no modelo e no protótipo, respectivamente. A massa deste modelo é menos de um terço deste valor e, mesmo assim ele é estável.

5.2.1 Ângulo de guinada de 12 graus

Os ensaios foram realizados com uma mistura igual à do 1º ensaio da tabela 5.2, tendo sido realizadas dois grupos de ensaios. Os dados relativos aos mesmos estão organizados na tabela 5.3.

	1º grupo	2º grupo
Pressão dinâmica [Pa]	445	446
Temperatura [°C]	25,5	26
Densidade do ar [kg/m³]	1,181	1,178
Velocidade [m/s]	27,4	27,5

Tabela 5.3: Dados dos ensaios com $\theta=12^\circ$.

Zona dianteira Nesta região do comboio foi observado o aparecimento de uma linha de convergência, indicadora de separação na zona inferior do comboio. Na figura 5.8, as estrias ainda não estão formadas junto à zona indicadora de separação deste vórtice mas já se nota que a componente ascendente da velocidade na zona A é suficiente para contrariar a gravidade, tal como previsto por [8], onde existe a geração de um vórtice longitudinal, o qual foi verificado com recurso à técnica de fio de lã.

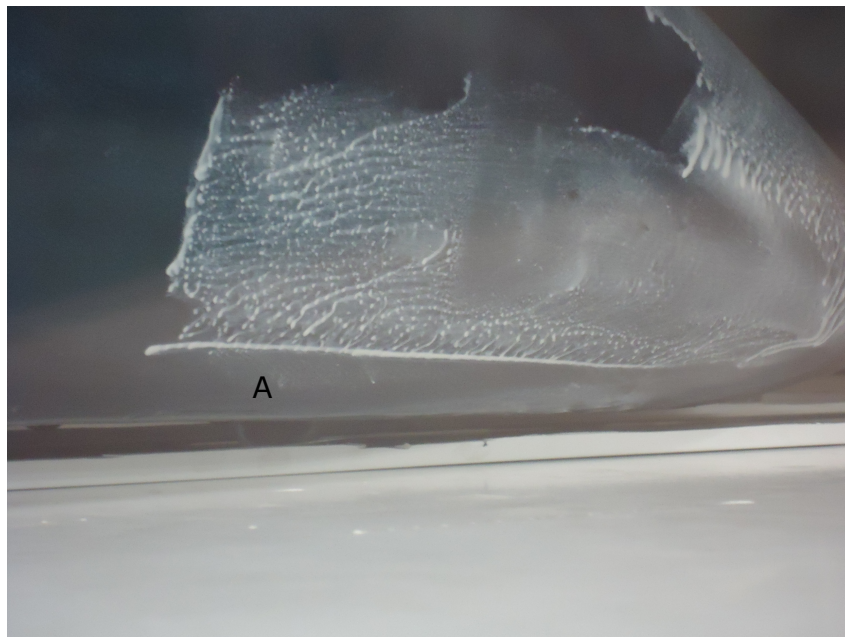


Figura 5.8: Formação de vórtice longitudinal na secção dianteira e inferior do modelo.

Na região A da figura 5.8 não foi aplicado filme de óleo, contudo é evidente que o escoamento é ascendente na direcção da linha branca, por cima de A.

Quando se obteve um padrão distribuído de estrias, as fotografias ficaram com má qualidade. De qualquer modo, confirmaram-se as observações de [8].

Zona traseira No lado direito do modelo (sotavento) foi observado um ligeiro deslocamento descendente da linha de convergência em relação ao ensaio com ângulo de guinada nulo, bem como se

verificou que ela começa muito antes, visível na linha branca da figura 5.10. A fotografia da figura 5.9 foi tirada num momento em que a película de óleo ainda só estava estirada em algumas regiões.



Figura 5.9: Zona indicadora de separação na região da traseira com indicação da direcção local das linhas de corrente limites.



Figura 5.10: Extensão da linha de convergência indicadora de separação na região da traseira do modelo.

À semelhança do caso de ângulo de guinada nulo, a curvatura das estrias - visíveis na figura 5.9 -, seguida pela sua convergência indica a existência de torção de camada limite e separação.

5.2.2 Ângulo de 20 graus

Foi realizado uma campanha de ensaio para este ângulo de guinada, no qual as proporções da mistura foram as mesmas descritas na secção 5.2.1. Os dados relativos a estes ensaios estão organizados na tabela 5.4.

Ensaio	
Pressão dinâmica [Pa]	448
Temperatura [°C]	25,5
Densidade do ar [kg/m ³]	1,178
Velocidade [m/s]	27,6

Tabela 5.4: Dados dos ensaios com $\theta=20^\circ$.

Secção dianteira Em experiências anteriores com esta geometria, com um modelo mais pequeno, verificou-se o aparecimento de vórtices longitudinais a desenvolverem-se a partir do nariz do comboio a um ângulo de guinada de 18° . Com o presente modelo, conseguiu-se um número de Reynolds 18% maior, face ao mais pequeno, o que é importante na parte dianteira do comboio, no qual o número de Reynolds baseado na distância ao ponto de estagnação é suficientemente grande para não ser necessário forçar a transição para o regime turbulento (O número de Reynolds entra-se na ordem dos $7,5 \times 10^5$ no fim do nariz). No caso do modelo mais pequeno, a fracção do escoamento laminar era significativa em todo o comprimento do nariz, ao ponto de ter sido necessário forçar a transição da camada limite perto do ponto de estagnação. No ensaio com o modelo maior, o escoamento apresentou-se maioritariamente turbulento, não havendo necessidade de forçar a transição.

Para ângulos de guinada de 20° observou-se acumulação de óleo nalgumas zonas. Estas zonas foram analisadas sucessivamente, concentrando apenas o filme de óleo naqueles locais. Tratam-se de regiões onde o modelo sofreu uma deformação. Para ângulos de guinada menores, essas imperfeições não têm consequências mas, a 20° originam linhas de separação - ver zona A da figura 5.11.

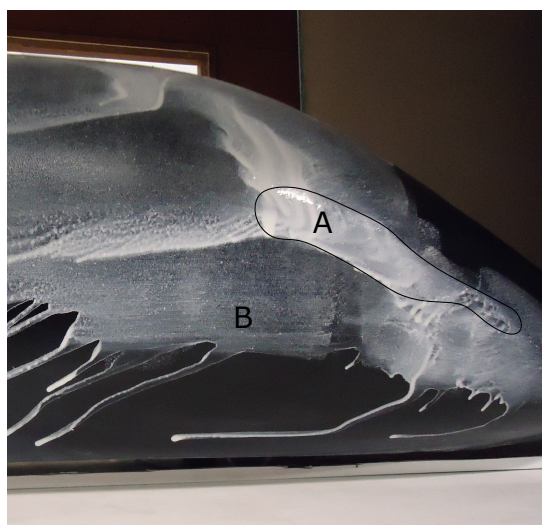


Figura 5.11: Separações desencadeadas por imperfeições geométricas do modelo, a 20° de ângulo de guinada.

A partir da não uniformidade do estiramento do filme de óleo na região do nariz, indica que a velocidade do escoamento exterior à camada limite varia muito de ponto para ponto no modelo, uma vez que a formação de estrias, para a mesma mistura, depende da velocidade na interface óleo-ar. Como tal, não foi possível dosear as proporções da mistura de óleo, pigmento e óleo de linhaça adequadas simultaneamente a todas as regiões. Quando se obtinham estrias claras numa zona, a visualização era deficiente noutras zonas do nariz. Analisando sucessivamente as várias zonas, conclui-se que até 20° de ângulo de guinada, o vórtice longitudinal superior era inexistente ou incipiente.

Isto significa que a distribuição de pressão é relativamente simétrica a barlavento e sotavento e, portanto, a força resultante lateral e o momento aerodinâmico de derrube são pequenos. Na zona B da figura 5.11, a película de óleo está estirada numa pequena região. Nesta região, as linhas de corrente limite são perfeitamente horizontais, não exibindo qualquer convergência. Aparentemente, o padrão é semelhante em todas as outras zonas do nariz, excepto a uma cota muito baixa (cerca de 10% da altura do modelo).

Região traseira Nesta região, a visualização de estrias de estrias foi mais difícil. Para este ângulo de guinada, a região observada passa a ser dominada por baixas velocidades, tal como concluído nos ensaios descritos na secção 4.2.3, é mais difícil a obtenção de estrias nítidas. Observam-se por isso poucas zonas com a película de óleo completamente estiradas, sendo elevada a acumulação de óleo. O problema agrava-se quando se interrompe o escoamento do ar, para permitir a obtenção de registos fotográficos, por causa da influência da gravidade. Por este motivo não é claro a região de convergência das linhas, contudo a observação directa evidencia duas dessas linhas, S e T, na figura 5.12.



Figura 5.12: Regiões onde aparenta existir convergência das linhas de tensão de corte superficiais. Essas linhas não são claras na fotografia mas são mais visíveis a olho nú.

5.3 Identificação de local útil para aplicação da técnica de sucção de camada limite

Um dos objectivos desta investigação foi obter indicações para melhorar o desempenho aerodinâmico deste veículo. Na cauda do comboio, as separações longitudinais dependem da torção da camada limite, como representado na figura 5.13a.

O padrão na figura 5.13a evidencia uma torção muito importante da camada limite e sugere que teria grande interesse fazer a sucção da camada limite nesta zona. Sabe-se que a torção da camada limite se concentra na região da parede (cerca de 10-15% da espessura da camada limite) e, portanto, é essa a espessura aproximada que conviria remover.

É de esperar que esta intervenção eliminasse, ou reduzi-se substancialmente, os vórtices longitudinais descritos nas secções anteriores. Em qualquer dos casos, a linha de separação deslocar-se-ia para o plano longitudinal da simetria do comboio, com a vantagem de aumentar a recuperação de pressão na traseira e, sobretudo, reduzir a força lateral na cauda.

Até cerca de 20° de ângulo de guinada (um vento lateral de 91 km/h, para um comboio a 250 km/h) a única separação longitudinal a partir do nariz é a baixa cota (10% da altura), não influenciando portanto significativamente a força lateral, o momento de derrube e a produção de ruído aerodinâmico com impacto fora da linha. O ruído produzido a baixa cota é facilmente absorvido por barreira acústicas, ao passo que o ruído produzido a maior altura se propaga até grandes distâncias da linha.

Contudo, para este ângulo de guinada muito elevado, formou-se um vórtice longitudinal por baixo da curva entre a parede lateral e o tejadilho, aproximadamente a 60% da altura, a partir de cerca de metade do comboio.

Actuar sobre este vórtice com sucção de camada limite implica fazer sucção no tejadilho. Embora não seja impossível, é menos prático fazer sucção nesse local, por cima do compartimento dos passageiros. Talvez alguma sucção limitada fosse suficiente para atrasar a formação desses vórtices ou deslocá-lo para cotas inferiores.

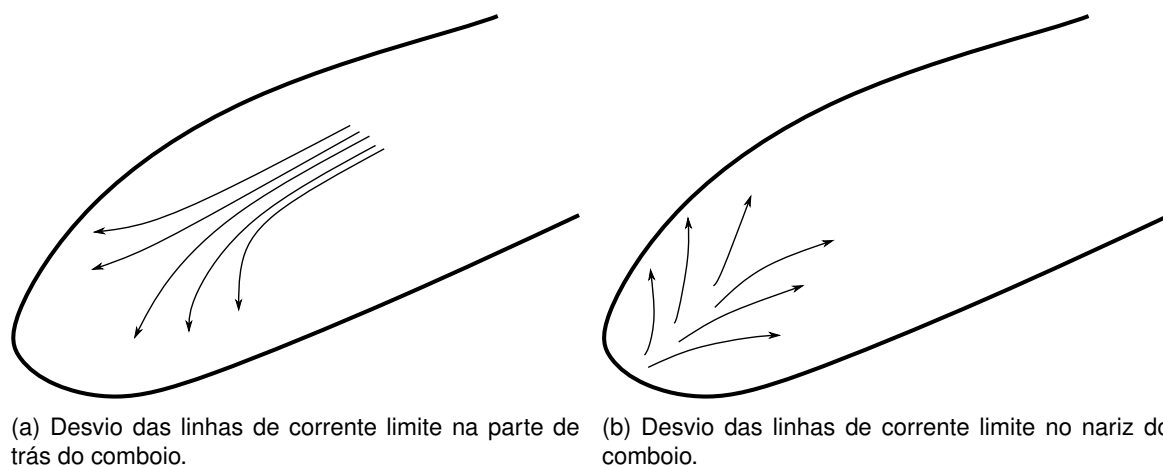


Figura 5.13: Desvio das linhas de corrente limite.

Capítulo 6

Conclusões

A investigação patente neste trabalho permitiu concluir que implementação do método de filme de óleo requer sensibilidade na dosagem dos componentes usados na mistura, bem como a necessidade de garantir uma espessura da película de óleo na ordem de $1 \mu m$, que tem em conta a dimensão média da partícula de dióxido de titânio, espalhada uniformemente sobre a superfície, tendo a conta a sua sensibilidade à gravidade. uma vez que não existe uma formula geral que relacione todas as variáveis importantes para este método.

As pesquisas e diligências feitas relativamente ao pigmentos usados na mistura do óleo revelou a importância do tamanho dos seus grãos para a compreensão do mecanismo de formação das estrias.

Nas campanhas de ensaios foi aplicada a técnica de filme de óleo simultaneamente na frente e traseira do comboio, tendo sido identificadas zonas de convergência das linhas de tensão de corte superficiais. Estas linhas são indicativas de separação de camada limite tridimensional. Com base na localização das mesmas, foram sugeridas localizações para a extracção de ar. Foi obtido o mesmo padrão de linhas de tensão de corte superficiais para ângulos de guinada mais pequenos, quando comparado com o modelo anterior [8]. Contudo, o não aparecimento do vórtice longitudinal superior no nariz do comboio, sugere que o número de Reynolds tenha um papel decisivo na formação do mesmo. As observações feitas às linhas de corrente limite, permitiram inferir que um local vantajoso para a extração de fluído da camada limite, seria na cauda do comboio, nomeadamente na zona central e superior. A geometria deste modelo apresenta uma aerodinâmica bastante bem desenvolvida, uma vez que o comboio é suficientemente fuselado para que somente o atrito entre as rodas do comboio e o chão do túnel é suficiente para garantir que o modelo não é arrastado pelo escoamento.

Para verificar a eficácia do controlo de camada limite por sucção, seria útil no futuro a execução de furos ou ranhuras, aproveitando a zona interior oca do modelo, e a realização de novos ensaios, a fim de comparar com os obtidos neste trabalho. Seria igualmente útil a continuação do estudo da técnica de visualização utilizada neste trabalho, procurando outros pigmentos capazes de formar estrias que permitam um maior contraste em relação à superfície. Alternativamente, seria benéfico tentar trabalhar na obtenção de registos fotográficos, nomeadamente na eliminação de reflexos.

Bibliografia

- [1] J. M. C.S André, *Transporte Interurbano em Portugal - 2 Volumes*. IST - Instituto Superior Técnico, 2008.
- [2] J. R. C. Pedro, *Controlo Aerodinâmico Ativo de um Comboio de Alta-Velocidade*. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (Lisboa), 2016.
- [3] M. D. Gunzburger, *Flow control*, vol. 68. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] I. Korkischko and J. R. Meneghini, “Investigação experimental e simulação numérica do escoamento ao redor de um modelo automobilístico: corpo de ahmed,” *Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 2006.
- [5] H. Viets, M. Piatt, and M. Ball, “Boundary layer control by unsteady vortex generation,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 7, no. 2, pp. 135–144, 1981.
- [6] R. McCallen, F. Browand, and J. Ross (Eds.), *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*. Springer, 2004.
- [7] J. M. C.S André, *Transporte Interurbano em Portugal - 1 Volumes*. IST - Instituto Superior Técnico, 2008.
- [8] I. d. M. B. Pereira, *Aerodinâmica de comboios de alta velocidade*. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (Lisboa), 2014.
- [9] A. Orellano, “Aerodynamics of high speed trains,” 2010.
- [10] N. Kumar, “Flow modification over rotor blade with suction boundary layer control technique,” 2016.
- [11] T. Heinemann, M. Springer, H. Lienhart, S. Kniesburgers, C. Othmer, and S. Becker, “Active flow control on a 1: 4 car model,” *Experiments in Fluids*, vol. 55, no. 5, p. 1738, 2014.
- [12] V. De Brederode, *Aerodinâmica incompressível: Fundamentos*. IST - Instituto Superior Técnico, 2014.
- [13] E. Maskell, “Flow separation in three dimensions,” tech. rep., Ministry of Supply, Royal Aircraft Establishment, RAE Farnborough, 1955.
- [14] A. M. C. Martins, *Controlo de camada limite em comboios de alta velocidade*. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (Lisboa), 2010.
- [15] V. Mosharov, A. Orlov, and V. Radchenko, “New approach to surface oil-flow visualization,” in *Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, 2005. iciasf’05. 21st International Congress on*, pp. 176–180, IEEE, 2005.
- [16] W. Merzkirch, “Techniques of flow visualization,” tech. rep., DTIC Document, 1987.

- [17] L. Eça, “Cálculo de parâmetros integrais de camada limite em gradiente de pressão nulo,” 2008.
- [18] D. C. Vaz, R. A. Almeida, E. Didier, A. P. Urgueira, and A. J. Borges, “Improving the aerodynamic performance of vila-real bridge deck-section,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 156, pp. 72–83, 2016.
- [19] O. D. T. De L’Atlantique, “Flow visualization in wind tunnels using indicators,” AGARD, 1962.