



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

# **Geometrias de revestimentos para redução do consumo de energia em veículos automóveis**

**Serafim Daniel da Costa Pinto**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Eletromecânica**

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor José Carlos Páscoa Marques

Coorientador: Prof. Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos

**Covilhã, outubro de 2015**



# Dedicatória

Ao meu irmão Francisco.



# Agradecimentos

De todos os que me ajudaram neste trilha que agora culmina nesta Dissertação de Mestrado, gostaria de agradecer profundamente ao meu Orientador, Professor Doutor José Carlos Páscoa Marques por todas as orientações, pela motivação e por toda a disponibilidade e ao meu Coorientador, Professor Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos pela oportunidade de realizar este trabalho por todo o apoio e dedicação que me facultou.

A ambos um bem-haja.

Deixo também uma palavra de apreço a todos os meus amigos que me incentivaram e apoiaram de forma direta ou indireta com especial ressalva ao Miguel Duarte, Inês Carmo, Luís André Barbosa, André Oliveira, Tiago Machado, Fernando Bento, Tobias Abrantes, João Sena, João Amado e Karolina Gross.

E em último, mas não por último, aos meus pais Emília e Daniel, que sempre acreditaram.



# Resumo

O bio mimetismo da pele de tubarão é uma das técnicas mais interessantes para redução do atrito aerodinâmico e hidrodinâmico de forma passiva. Esta consiste na aplicação de ranhuras ao longo de uma superfície no sentido do escoamento de fluidos, uma vez que o controlo da transição de regime laminar para turbulento é conseguido mais facilmente.

Neste trabalho é proposta, a aplicação do bio mimetismo pele de tubarão em veículos automóveis e a respetiva simulação computacional através da aplicação das equações de *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS).

Utilizando os últimos avanços tecnológicos, podemos compreender melhor os fenómenos associados aos efeitos pretendidos. Simulando o efeito aerodinâmico da pele de tubarão, com o auxílio de computadores e *software* adequado, podemos prever o seu comportamento físico. Tal não era possível, por exemplo, na década de 80, em que a tecnologia não era tão acessível e a capacidade de processamento era mais reduzida. De salientar que há hoje um revivalismo nesta matéria devido aos avanços científicos entretanto realizados, devido também ao surgimento de novas tecnologias e novos materiais utilizando novos métodos de produção graças à nanotecnologia e impressoras tridimensionais, que hoje em dia estão muito em voga.

## Palavras-chave

Regime turbulento, Bio mimetismo da pele de tubarão, Redução de atrito aerodinâmico, Modelo de turbulência.



# Abstract

The biomimetic of the shark skin is one of the most interesting techniques for passive reducing the aerodynamic and hydrodynamic frictions. It consists on the application of grooves along the surface in the direction of the fluid's flow, since the control of the laminar to turbulent transition regime is achieved more easily.

This thesis proposes the application of the biomimetic of the shark skin in land vehicles and its computer simulation by applying the equations of Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).

Using the latest technologies, we can better understand the phenomena associated with the intended effects. Simulating the aerodynamic effect of the shark skin, with the support of computers and appropriate software, we can predict its physical behaviour. This was not possible, for example, in the eighties, when the technology wasn't so accessible and the processing was reduced. It is important to emphasize that currently there is a revival regarding this matter due to scientific advances achieved recently, and also due to the emergence of new technologies and new materials. In addition to that, now-a-days the use of new production methods is very diffused due to the nanotechnology and three-dimensional printers.

## Keywords

Turbulent flow, Shark Skin Biomimetic, Aerodynamic Drag Reduction, Turbulence model



# Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract.....	ix
Índice .....	xi
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Lista de Acrónimos.....	xxi
Lista de Símbolos .....	xxiii
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	3
1.1.1 Utilizações .....	3
1.2 Objetivos .....	7
1.3 Visão geral da organização da Dissertação.....	8
2 Escoamento sobre <i>Riblets</i> .....	9
2.1 Fundamentos teóricos .....	9
2.1.1 Tipos de escoamento .....	9
2.1.2 A Turbulência .....	10
2.1.2.1 Vórtices e isotropia.....	11
2.1.2.2 Camada Limite e escalas associadas .....	13
2.1.2.3 Camada Limite Laminar (CLL) e escalas associadas .....	15
2.1.2.4 Camada Limite Turbulenta (CLT) e escalas associadas .....	16
2.1.2.5 Resistência aerodinâmica .....	17

2.1.2.6 Resistência aerodinâmica de atrito puro: escoamento sobre uma placa paralela ao escoamento .....	18
2.1.2.7 Camada limite em regime turbulento .....	21
2.2 Estado da Arte - Os <i>Riblets</i> como mecanismo de redução de resistência aerodinâmica.....	23
2.2.1 Técnicas de redução de resistência aerodinâmica em regime turbulento .....	23
2.2.2 Regimes de escoamentos sobre superfícies rugosas.....	25
2.2.3 Análise teórica do mecanismo de <i>Riblets</i> .....	26
2.2.4 Investigação Experimental em <i>Riblets</i> .....	30
2.2.5 Síntese de resultados experimentais em <i>Riblets</i> .....	34
2.2.6 Estrutura dos <i>Riblets</i> .....	36
2.2.7 Construção de Superfícies com <i>Riblets</i> .....	40
3 Modelação Computacional.....	43
3.1 Método dos volumes finitos .....	44
3.2 Equações de Navier-Stokes .....	44
3.2.1 Equações de conservação de massa .....	45
3.2.2 Equação da quantidade de movimento .....	45
3.3 Lei universal da parede .....	46
3.4 Modelo de Turbulência .....	50
3.5 Domínio de Cálculo.....	52
3.6 Condições de Fronteira .....	53
3.6.1 Geometria dos <i>Riblets</i> estudados.....	53
3.7 Malha .....	54
4 Resultados numéricos .....	57
5 Conclusão.....	63
5.1 Conclusões da simulação numérica.....	63

Bibliografia.....	65
-------------------	----



# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Veículos Automóveis desenvolvidos pela UBI para competição Shell Eco-marathon com revestimentos irregulares para redução de atrito aerodinâmico.....	1
Figura 1.2 - Pormenor da pele de tubarão makko, <i>isurus oxyrinchus</i> . ....	3
Figura 1.3 - Equipamento de natação LZR Racer. ....	4
Figura 1.4 - Avião da companhia aérea comercial TAP com utilizações de <i>Riblets</i> para a redução de atrito aerodinâmico [15].....	5
Figura 1.5 - Superfície plana 77% coberta vs. Superfície com <i>Riblets</i> 35 % ocupada de bactérias ao fim de 21 dias.....	6
Figura 1.6 - Casco de navio encrostado que apresenta encostamento de organismos que crescem nas partes exteriores submersas, Foto: J. Lewis [16]. ....	7
Figura 2.1 - Estruturas do escoamento turbulento (adaptado de [24]). ....	11
Figura 2.2 - Espectro de um escoamento turbulento [19]. ....	12
Figura 2.3 - Transição entre o escoamento laminar e o turbulento na camada limite [19]. ...	14
Figura 2.4 - Subcamada viscosa limite Turbulenta [19].....	15
Figura 2.5 - Variação do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds para uma placa plana lisa paralela ao escoamento (adaptado de [7]). ....	21
Figura 2.6 - Modelo conceptual ilustrando o processo da ascensão dos vórtices ao longo do corpo resultando na formação de pares de vórtices contra rotacionais, regiões com tensão de corte na parede extrema e regiões de baixo momento em superfícies lisas [37]. ....	25
Figura 2.7 - Representação de <i>Riblets</i> na Rugosidade de transição na subcamada de transição num escoamento turbulento. ....	26
Figura 2.8 - Efeitos de distância entre cristas ( $s^+$ ) na tensão superficial de <i>Riblets</i> triangulares com ângulo de $60^\circ$ (adaptado de [9]). ....	27
Figura 2.9 - Origem aparente de superfície com <i>Riblets</i> (adaptado de [54]). ....	29

Figura 2.10 - Curvas de redução de resistência aerodinâmica em vários <i>Riblets</i> para inclinação viscosa comum. Redução de resistência aerodinâmica (a) em função do espaçamento $s + e$ (b) em função da raiz quadrada da secção de corte, $Lg += Ag + 12$ . Triângulos não preenchidos - resultados obtidos de experiências de Bechert [9]. Círculos preenchidos - são resultados obtidos por DNS de García-Mayoral & Jiménez [60].	30
Figura 2.11 - <i>Riblets</i> de 62 $\mu\text{m}$ .	31
Figura 2.12 - <i>Riblets</i> Triangulares e Retangulares testados [69].	32
Figura 2.13 - Amostra de pele de tubarão.	36
Figura 2.14 - Diferenças entre o grão da pele de tubarão dependendo da zona do corpo e da espécie (adaptado de [109]).	37
Figura 2.15 - Intervalo de projeto da altura de <i>Riblets</i> (adaptado de [113]).	38
Figura 2.16 - Variação da altura efetiva da protrusão em escoamento no sentido da corrente e escoamento transversal para <i>Riblets</i> : a) triangulares, b) parabólicos, c) rectangulares (adaptado de [9]).	39
Figura 2.17 - Processo de produção de estruturas de <i>Riblets</i> utilizando um rolo [119].	41
Figura 2.18 - Exemplo de tintas para redução de atrito aerodinâmico com $s=15$ [121].	41
Figura 2.19 - Esquema de aplicação da pintura [121].	42
Figura 2.20 - Sequência de produção de réplicas de micro- <i>Riblets</i> [122].	42
Figura 3.1 - Subcamadas laminar, turbulenta e zona de ajuste entre os perfis de velocidade (adaptado de [19]).	47
Figura 3.2 - Perfil de velocidade junto a uma superfície sólida (adaptado de [21]).	49
Figura 3.3 - Lei da mistura do modelo de turbulência modelo $K-\omega$ SST ( adaptado de [21])	51
Figura 3.4 Volume de Controlo	52
Figura 3.5 - <i>Riblets</i> trapezoidais em comparação com outras geometrias	54
Figura 3.6 - Malha constituída por blocos.	55
Figura 3.7 - Detalhe da malha não estruturada junto aos <i>Riblets</i> .	55

Figura 3.8 - Malha estruturada na parede .....	56
Figura 3.9 - Detalhe de malha estruturada a acompanhar os <i>Riblets</i> . .....	56
Figura 4.1 - Visualização do campo de velocidade axial na parede nervurada, na saída e num plano a meio do domínio de cálculo. Resultados para um escoamento de aproximação de 80.22 m/s. As velocidades estão impostas segundo a direção negativa ao eixo dos Zs.....	57
Figura 4.2 Representação do $y^+$ junto da parede nervurada. Resultado obtido para uma velocidade de escoamento imposto de 80.22 m/s .....	58
Figura 4.3 Distribuição da tensão de parede ao longo da placa nervurada. Resultado obtido para uma velocidade de escoamento imposto de 80.22 m/s.....	58
Figura 4.4 - Visualização das linhas de corrente e velocidade média num plano transversal a meio do comprimento da placa nervurada. ....	59
Figura 4.5 - Imagem de escoamento sobre <i>Riblet</i> demonstrando o efeito de redução de Atrito aerodinâmico causado por <i>Riblets</i> (adaptado de [43]).....	59
Figura 4.6 - Apresentação gráfica da evolução da força de resistência viscosa total em função das diferentes velocidades. As condições do escoamento são $Re=2.8 \times 10^6$ , com base no comprimento da placa. ....	60



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Percentagem de redução de resistência aerodinâmica utilizando <i>Riblets</i> em perfis alares DU 96-W-180.....	31
Tabela 2.2 - Modelos de <i>riblets</i> testados pela NASA (adaptado de [69]). .....	32
Tabela 2.3 - Estudos experimentais em canal de água com placas planas de diferentes tipos de <i>Riblets</i> [69]. .....	34
Tabela 2.4 - Estudos experimentais realizados em túnel de vento com placas planas de diferentes tipos de <i>Riblets</i> [69]. .....	35
Tabela 2.5 - Estudos experimentais em canal de óleo em placas com diferentes tipos de <i>Riblets</i> [69]. .....	36
Tabela 3.1 Modelos de turbulencia disponíveis no Ansys Fluent .....	44
Tabela 3.2 - Constantes do modelo k- $\omega$ SST .....	51
Tabela 3.3 - Dimensões do volume de controlo .....	52
Tabela 3.4 - Propriedades do fluido. ....	53
Tabela 3.5 Condições de entrada .....	53
Tabela 4.1 - Resultados obtidos numericamente para a força de resistência viscosa total na placa nervurada, na direção do escoamento. ....	60
Tabela 4.2 - Redução de arrasto comparativamente com os valores de placa plana.....	61



# Lista de Acrónimos

BNSS	Bionic Non-Smooth Surface
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLL	Camada Limite Laminar
CLT	Camada Limite Turbulenta
DRAG	Atrito aerodinâmico
DNS	Direct Numerical Simulation
LEBU	Large Eddy Breakup Devices
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
TBT	Tributilestanho
VITA	Variável Interna de Tempo Médio
IMO	Organização Marítima Internacional
EDM	Electrical Discharge Machining
Ti-6Al-4V	Liga de Titânio



# Lista de Símbolos

$A$	Área
$U$	Velocidade do escoamento
$T$	Temperatura
$L$	Comprimento característico do escoamento
$u_\tau$	Velocidade de fricção
$h^+$	Altura adimensional
$s^+$	Largura adimensional
$t^+$	Espessura adimensional
$h_p$	Altura do deslocamento efetivo
$Re$	Número de Reynolds
$y^+$	Distância adimensional ao primeiro ponto do centróide da malha
$\rho$	Densidade
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\tau_w$	Tensão de corte na Parede
$\delta$	Espessura da Camada Limite
$t$	Escala de tempo
$D_f$	Resistência Aerodinâmica
$D_v$	Resistência aerodinâmica viscosa
$D_p$	Resistência aerodinâmica de pressão
$C_D$	Coefficiente de Resistência aerodinâmica
$C_f$	Coefficiente de Fricção
$\Delta$	Variação finita
$k$	Energia Cinética turbulenta
$\varepsilon$	Dissipação turbulenta



# 1 Introdução

Atualmente, uma das maiores preocupações a nível mundial incide na poupança de recursos e energia. Neste trabalho estudar-se-ão as possibilidades de diminuição do consumo energético, em meios de transporte, pela redução do atrito aerodinâmico. A redução do atrito aerodinâmico influencia diretamente a diminuição do consumo de combustível e, por consequência, a emissão de gases poluentes. Estes pressupostos vão de encontro aos vários protocolos e diretivas que visam a redução do consumo energético e utilização de recursos naturais, como é o caso do protocolo de Quioto [1] e a diretiva da União Europeia 20-20-20 [2]: esta diretiva visa a redução de 20% na emissão de gases do efeito estufa, 20% da energia consumida (devendo ser produzida, cada vez mais, através de fontes renováveis) e o aumento em 20% da eficiência energética até 2020.

Várias iniciativas, a nível europeu e académico, têm sido realizadas para encorajar a redução do consumo energético, como a *Shell Eco-Marathon Europe*. O objetivo principal nesta competição é desenvolver um veículo automóvel e percorra a maior distância, com o menor consumo de combustível possível. Para tal, todos os sistemas constituintes do veículo devem ser projetados para a máxima eficiência, como por exemplo o sistema de propulsão, a direção e o chassis, contribuindo para a redução das perdas de todas as formas possíveis, sendo que um dos aspetos que influenciam a eficiência em veículos é a sua aerodinâmica. Devido às limitações impostas pelos regulamentos da competição, as regras de segurança e os aspetos técnicos, o *design* do veículo automóvel muitas vezes não corresponde ao desejado em termos de eficiência aerodinâmica. Tendo em conta estas limitações, surgiu a ideia de aplicar um revestimento superficial baseado na teoria *sharkskin effect*, como se pode ver na Figura 1.1 [3].



Figura 1.1 - Veículos Automóveis desenvolvidos pela UBI para competição Shell Eco-marathon com revestimentos irregulares para redução de atrito aerodinâmico.

Ao longo de milhares de anos a Natureza impulsionou a evolução dos seres vivos, através da seleção natural, tornando-os mais aptos às condições do seu meio e permitindo a sua sobrevivência. A seleção natural consiste na sucessiva acumulação de pequenas variações úteis

face às condições orgânicas e inorgânicas do meio envolvente. Esta adaptação gradual afeta todos os seres vivos: cada ser vivo tende a adaptar-se relativamente às condições do seu meio; este aperfeiçoamento conduz inevitavelmente à evolução gradual da organização dos seres vivos como um todo [4].

Um exemplo que a História Natural nos dá referente ao processo evolutivo é o caso do tubarão: esta espécie, cujos fósseis mais antigo têm 415 milhões de anos [5], sofreu uma alteração biológica significativa - segundo o paleontologista Martin Brazeau - tal como sugerem os fósseis com 325 milhões de anos [6]; esta alteração tornou a família genológica dos tubarões em predadores natos, encontrando-se no topo da sua cadeia alimentar ainda hoje. Recorrendo ao bio mimetismo podemos replicar estes exemplos de adaptação e retirar muitas lições úteis, usando esses conhecimentos em favor da humanidade e da própria natureza.

Uma das aplicações do bio mimetismo da pele de tubarão encontra-se no tecido *Fastskin*®, desenvolvido pela *Speedo*: este tecido imita os dentículos ásperos da pele de tubarão, reduzindo a resistência aerodinâmica hidrodinâmica em áreas estratégicas do corpo. A pele de tubarão apresenta rugosidades muito pequenas (em comparação com a maioria dos peixes) e uma estrutura semelhante a dentes, denominada “dentículos dérmicos”, ou seja, “minúsculos dentes de pele” [7].

A superfície com estruturas rugosas mas regulares que imitam a pele dos tubarões são denominados de *bionic non-smooth surface* (BNSS). Os *Riblets* derivam da forma da pele de tubarão (*sharkskin*), sendo considerada a forma BNSS ideal para reduzir o atrito ou hidrodinâmico.

Aliando a forma hidrodinâmica, os seus músculos poderosos e sua pele (que reduz a resistência hidrodinâmica), algumas espécies de tubarão (como a *Isurus oxyrinchus*, também conhecida como tubarão-sardo ou tubarão-mako) podem atingir uns impressionantes 75 km/h. [8]. As minúsculas escamas que cobrem a pele de tubarões (dentículos dérmicos) têm a forma de pequenas estrias e alinhados na direção do fluxo de fluido como apresentado na Figura 1.2.

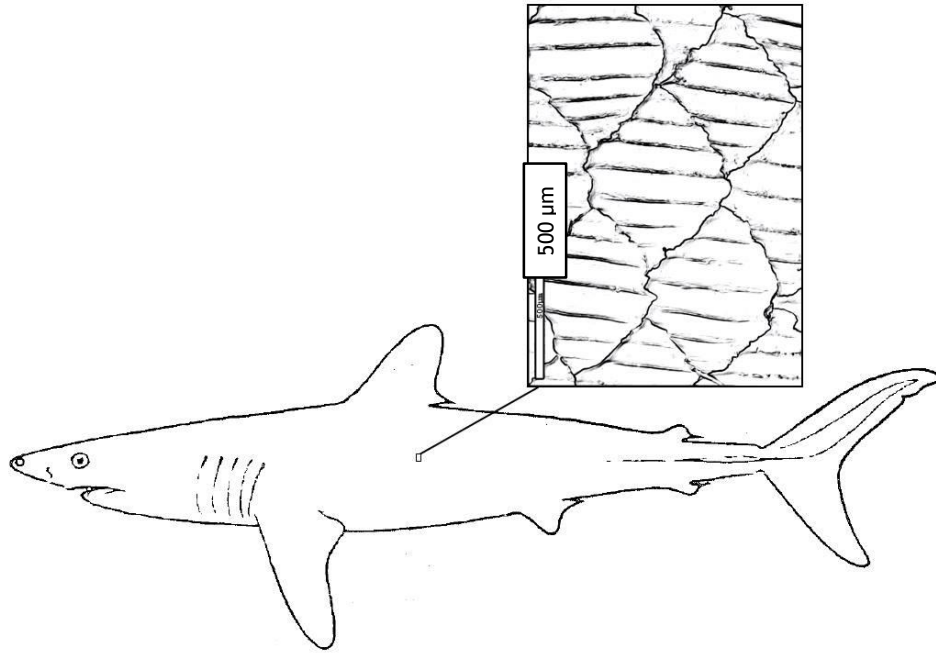


Figura 1.2 - Pormenor da pele de tubarão makko, *isurus oxyrinchus*.

Os *Riblets* inspirados na pele de tubarão são benéficos na redução de resistência aerodinâmica até 9,9% [9]. Os denticulos dérmicos são também utilizados para prevenir que organismos aquáticos microscópicos se fixem à superfície, mantendo assim a pele desimpedida de obstáculos que reduziriam o seu desempenho [10].

## 1.1 Enquadramento

O número de aplicações em engenharia e biomedicina em que o bio mimetismo da pele de tubarão pode ter um efeito benéfico é verdadeiramente impressionante. Não tem apenas capacidades de redução de consumo de combustíveis como também pode proteger a vida marinha de químicos prejudiciais, além de poder ser utilizada para evitar infeções hospitalares perigosas e potencialmente salvar vidas [11].

### 1.1.1 Utilizações

Na Figura 1.3 encontra-se o fato de natação da *Speedo LZR*. Este é o resultado de vários anos de pesquisa realizados em conjunto pela marca *Speedo*, o Instituto Australiano de Desporto e a NASA.

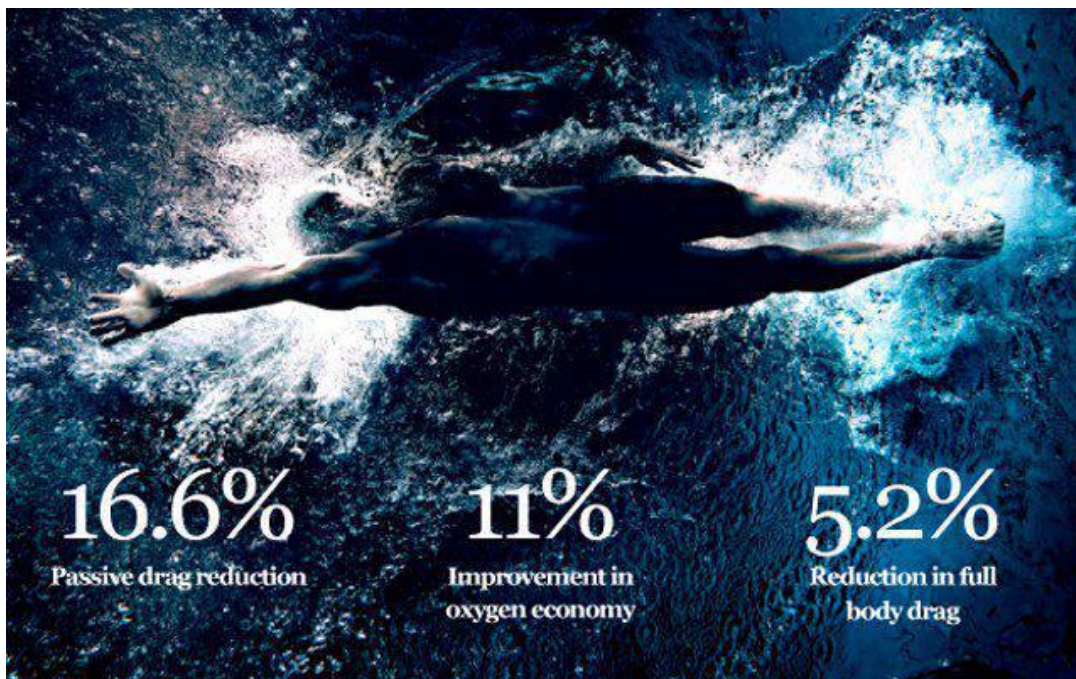


Figura 1.3 - Equipamento de natação LZR Racer.

Usufruindo do *software* de análises do escoamento de fluidos e das instalações da NASA, foram desenvolvidos testes em túneis de vento e canais hidráulicos para criar “o fato de natação mais rápido do mundo” que, essencialmente, reproduz a dinâmica da textura da pele de tubarão através da água. Esta textura assemelha-se aos pequenos dentes dérmicos que cobrem o corpo deste animal, permitindo assim reduzir o atrito hidrodinâmico, nadando mais rapidamente e com menos esforço. O fato de banho é constituído por uma malha de elastano, um tecido que tem propriedades de contração elevada, de nylon/poliéster (*flexskin*).

As nervuras em forma de V, impressas na superfície do fato de natação, têm o mesmo efeito que os denticulos encontrados na pele de tubarão. Isso significa que, no seu comportamento em água, se verifica uma redução do atrito hidrodinâmico por manter o escoamento mais perto do corpo do nadador. A eficácia dos seus movimentos é assim melhorada.

Utilizando este equipamento de natação, Michael Phelps ganhou 6 medalhas de ouro e duas de bronze nos Jogos Olímpicos de Atenas (em 2004), tornando-se o primeiro nadador da história a ganhar 8 medalhas no mesmo campeonato Olímpico [12]. Já em 2008, 94% das competições de natação nos Jogos Olímpicos de Pequim foram vencidas por atletas que envergavam este tipo de fato de natação [13]. De salientar que este fato foi produzido numa empresa portuguesa, de Paços de Ferreira, que utiliza uma tecnologia patenteada de ultrassons (*ultrasonic welding*) para a sua execução, sem costuras.

De referir ainda a utilização deste conceito, neste caso para a redução do consumo de combustíveis na aviação comercial. Na Figura 1.4 encontra-se a nova aeronave Airbus A330 NEO

que utiliza Riblets nas suas asas para a redução do drag. Desde 1981 que esta tecnologia tem vindo a ser testada nas aeronaves A310: estes Riblets são micro nervuras que são aplicadas ao longo do escoamento do ar que passa no corpo da aeronave, apresentando-se em forma de fitas adesivas que são implementadas sobre várias áreas da fuselagem e asas do aparelho, contribuindo assim para a redução do consumo de combustível [14].



Figura 1.4 - Avião da companhia aérea comercial TAP com utilizações de *Riblets* para a redução de atrito aerodinâmico [15].

Esta tecnologia também pode ser usada na área da medicina. Os padrões presentes na pele de tubarão podem prevenir o crescimento de bactérias sobre uma superfície, tal como se pode verificar na Figura 1.5. Testes realizados pelo professor Anthony Brennan (Universidade da Florida, departamento de Materiais, Ciência e Engenharia) provaram que este design inspirado na pele de tubarão é eficaz contra o crescimento, entre outras bactérias, da “*Staphylococcus aureus*” ou da “*Escherichia coli*”. Este acabamento superficial pode ser aplicado em instrumentos hospitalares. Visto ser uma tecnologia que não recorre aos antibióticos, reduz o perigo de mutação das bactérias e de estas se tornarem resistentes [16].

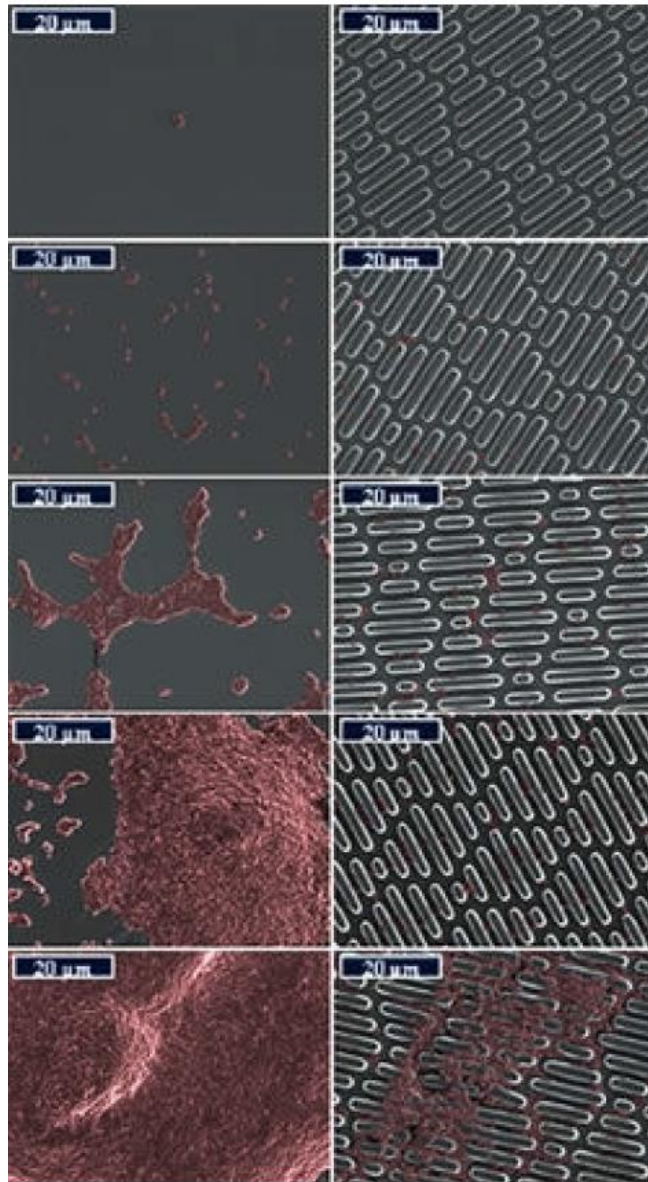


Figura 1.5 - Superfície plana 77% coberta vs. Superfície com *Riblets* 35 % ocupada de bactérias ao fim de 21 dias.

Já na antiguidade, os marinheiros Fenícios deparavam-se com o problema das incrustações (seres vivos que se depõe nos cascos dos navios, como conchas e algas), que causavam desgaste e corrosão nos navios, levando à fadiga e rotura dos materiais. Na Figura 1.6 encontra-se um exemplo de incrustações nas hélices de um navio. Foi então que se começaram a utilizar revestimentos anti incrustações, à base de chumbo, cobre e outros metais. Mais recentemente, já no século XX, foram introduzidos revestimentos que utilizam tributilestanho (TBT), um biocida que se tornou o principal método para reduzir a incrustação biológica [11].



Figura 1.6 - Casco de navio encrostado que apresenta encostamento de organismos que crescem nas partes exteriores submersas, Foto: J. Lewis [16].

Verificou-se, mais tarde, que este método era uma ameaça para o meio ambiente e a saúde pública, sendo encontrados vestígios de TBT no sangue e fígado humano [17]. Devido aos danos no ecossistema causados pelo TBT, partiu-se em busca de uma solução mais ecológica e igualmente eficaz [18].

Um das razões para os métodos de anti incrustação serem tão desejados é por causa das perdas que as empresas de transporte marítimo sofrem: de acordo com a Organização Marítima Internacional (IMO), as superfícies submersas dos navios com incrustação apresentam um aumento da resistência e uma diminuição da velocidade, com um custo extra de 40% em combustível [11]. Os custos anuais com este problema estão estimados em 1 bilhão de dólares [18].

Aplicando uma textura de pele de tubarão (*sharkskin*, como o *Sharklet AF™*) reduz-se a incrustação até 67%, o que representa inúmeras vantagens além de manter os cascos limpos: não são utilizados agentes tóxicos, é melhorada a eficiência dos navios (reduzindo a resistência) e o consumo de combustível é menor [11].

## 1.2 Objetivos

Neste trabalho são estudados modos de funcionamento e efeitos aerodinâmicos de um padrão rugoso que será analisado com o intuito de reduzir o atrito aerodinâmico de um corpo ao atravessar um fluido que, poderá ter a capacidade de reduzir o consumo energético. Ao utilizar estes padrões rugosos, que se dominam *Riblets*, pode por exemplo, através de um revestimento superficial baseado nestes, é suscetível a redução do consumo em diversos tipos

de sistemas de transportes. Tendo ainda em conta que o aumento da eficiência energética é um assunto atual, e cada vez mais considerado um benefício para qualquer sistema.

Na literatura, surgem inúmeros trabalhos de aplicação desta tecnologia para a indústria aeronáutica e marítima, em que a aplicação destes dispositivos garante, na maioria dos casos, a redução de atrito aerodinâmico e hidrodinâmico que conseqüentemente aumentam a eficiência destes sistemas. O objetivo neste trabalho é estudar computacionalmente, os efeitos aerodinâmicos em condições diferentes das anteriormente referidas, nomeadamente estudar estas estruturas em ambientes onde a velocidade, viscosidade e tamanho do corpo são diferentes, ou seja características que podem ser manipuladas através do número de Reynolds podendo fazer uma avaliação do desempenho neste ambiente.

### **1.3 Visão geral da organização da Dissertação**

Após serem apresentados os objetivos deste trabalho, descreve-se agora a organização e estrutura adotada para esta dissertação.

O primeiro capítulo é de carácter introdutório, onde se pretende dar ao leitor uma primeira impressão do que se trata o conceito do bio mimetismo da pele de tubarão e as suas aplicações nas mais diferentes áreas.

No segundo capítulo é realizada na primeira secção uma revisão sobre fundamentos teóricos acerca da turbulência e as suas propriedades físicas. Na segunda secção deste capítulo, realiza-se uma revisão ao estado da arte sobre os *Riblets* na sua utilização como mecanismos de redução de atrito aerodinâmico.

No capítulo terceiro são apresentados os métodos numéricos usados para a discretização das equações de governo e a descrição dos modelos de turbulência utilizados na simulação computacional.

No capítulo quatro são mostradas as condições de fronteira utilizada para o cálculo dos casos de teste para o escoamento sobre *Riblets* e os resultados numéricos obtidos para se poder comparar com a referência.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2 Escoamento sobre *Riblets*

### 2.1 Fundamentos teóricos

Na experiência comparativa da queda de uma maçã e de uma pena, Galileu sugeria que a diferença do tempo de queda entre os dois objetos se devia à sua diferença de peso. Atualmente, realizando a mesma experiência num tubo em vácuo, os dois objetos chegam simultaneamente ao ponto final. Quer isto dizer que a resistência aerodinâmica (*drag*) é responsável pela queda mais lenta da pena, devido à sua forma e não ao seu peso, como anteriormente pensado.

Na mecânica dos fluidos, o estudo da turbulência é uma matéria importante para a compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem na grande maioria dos escoamentos, pelo que é relevante a sua análise. Os escoamentos presentes em rios, canais, tubagens, turbinas, na esteira de navios, aviões e automóveis pertencem a esta categoria de escoamento [19]. Estes escoamentos são caracterizados pelo seu movimento instável (mesmo que o escoamento principal pareça ser estável), tridimensional (mesmo que o escoamento principal seja apenas bidimensional), rotacional, fortemente difusivo, dissipativo e altamente irregular no espaço e no tempo [20].

#### 2.1.1 Tipos de escoamento

Na realização deste estudo o fluido de trabalho será o ar, caracterizando-se por um escoamento newtoniano, turbulento e incompressível.

O número de Reynolds é um valor adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. É utilizado, por exemplo, em projetos de tubagens industriais e asas de aviões.

O seu nome vem de Osborne Reynolds, físico e engenheiro irlandês, tendo como significado físico o quociente de forças: forças de inércia ( $U\rho$ ) entre forças de viscosidade ( $\mu/L$ ).

Apresenta-se como:

$$Re = \rho \frac{UL}{\mu} \quad 2.1$$

Onde:

$U$  é a velocidade média do fluido,  $L$  o comprimento característico do escoamento,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido e  $\rho$  a densidade.

A grande importância do número de Reynolds deve-se ao facto de permitir avaliar a estabilidade do fluxo e indicar se flui de forma laminar ou turbulento. Para um fluxo externo ao longo de uma superfície, o número de Reynolds para o regime turbulento será maior que 500.000 enquanto, em torno de um obstáculo terá um  $Re \geq 20.000$  e para escoamentos internos o  $Re \geq 2.300$ . Porém outros fatores como a corrente turbulenta, condições da superfície, sopro ou sucção podem causar a transição mais precocemente [21].

### 2.1.2 A Turbulência

A turbulência é definida pelo “*Glossary of Oceanographic Terms*” como um estado de escoamento do fluido no qual as velocidades instantâneas exibem flutuações irregulares e aparentemente aleatórias de tal forma que, na prática, apenas propriedades estatísticas podem ser reconhecidas e analisadas [22]. Estas flutuações constituem as principais deformações do escoamento e são capazes de transportar momento, energia e outras propriedades com taxas muito maiores que da difusão molecular nos escoamentos laminares [23].

Muitas teorias e conceitos têm sido formulados na tentativa de obter uma descrição universal para o fenómeno da turbulência que seja adequada para qualquer problema de interesse prático. Enquanto tal descrição não é alcançada, e há dúvidas se algum dia será, têm sido propostos modelos simplificados de modo a analisar problemas específicos em cada área de interesse [24]. De facto, a turbulência é um fator complexo na análise dos fenómenos de transportes de massa, momento e energia [19], tornando o seu escoamento extremamente complexo e não permitindo uma abordagem estritamente analítica [25].

Tennekes & Lumley destacam que [26]:

- Uma característica muito importante dos escoamentos turbulentos é a sua habilidade para misturar ou transportar propriedades a taxas muito mais elevadas (várias ordens de magnitude) do que aquelas alcançadas por difusão molecular;
- Escoamentos turbulentos são sempre dissipativos e o mecanismo da turbulência necessita de uma alimentação contínua de energia para suprir as perdas viscosas de modo que, se nenhuma energia for fornecida ao escoamento, a turbulência decai rapidamente;
- A turbulência é um fenómeno contínuo, ou seja, mesmo os menores vórtices encontrados nestes escoamentos são tipicamente muito maiores que a escala do comprimento molecular, fazendo com que a Hipótese do Continuum seja validada e o escoamento turbulento seja governado pelas equações de Navier-Stokes.

A presença de vórtices desempenha um papel fundamental na análise da turbulência, pois os escoamentos turbulentos são sempre rotacionais. Isto significa que teorias bem estabelecidas de escoamento potencial (estritamente bidimensionais) não se aplicam ao estudo da turbulência. É possível provar ainda que, para que a turbulência seja mantida, os

mecanismos tridimensionais devem estar presentes no escoamento (*vortex stretching*) [24]. Podemos assim afirmar que os escoamentos turbulentos são altamente não lineares, aleatórios e não previsíveis tornando-se impossível uma abordagem determinística do fenómeno (característica conhecida como “irregularidade”) [27] e [28].

### 2.1.2.1 Vórtices e isotropia

Apesar do estado caótico que caracterizam os escoamentos turbulentos, certos padrões básicos têm sido identificados, quer pela via teórica, quer pela via experimental [24].

O conceito de vórtice está associado a estes padrões básicos, também denominados de estruturas coerentes ou grandes vórtices, observáveis nas maiores escalas do escoamento turbulento. Importa salientar que a turbulência se manifesta em diferentes escalas de comprimento, que estão relacionadas com as dimensões características destes vórtices. Já nas pequenas escalas não conseguimos identificar vórtices individualmente e a equação “pequenos vórtices” não significa mais que aquela parte do movimento turbulento que apresenta coerência apenas em curtas distâncias (isotropia local). É usual definirmos o movimento turbulento como uma superposição de vórtices de diferentes tamanhos que interagem entre si (como mostra a Figura 2.1) trocando energia, quantidade de movimento e concentração de espécies, fazendo com que as quantidades transportadas flutuem [19].

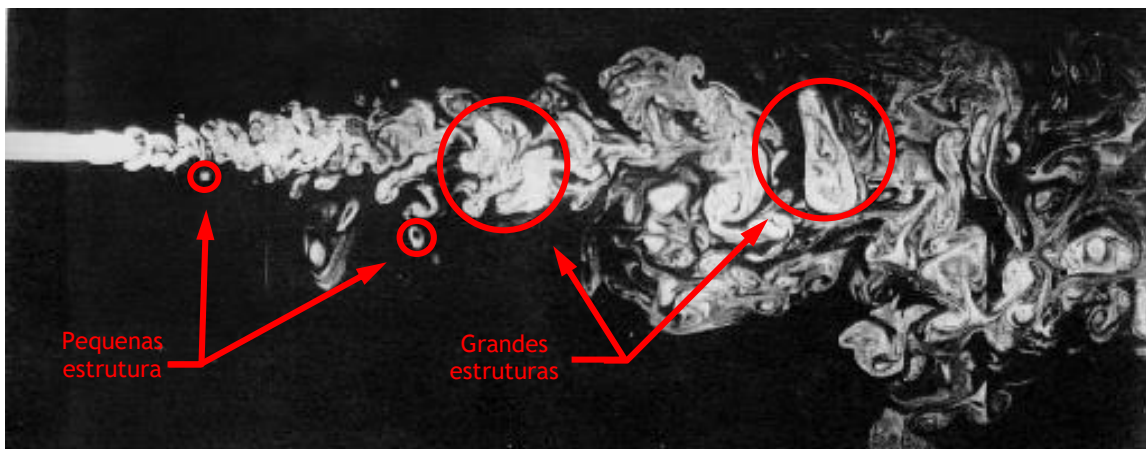


Figura 2.1 - Estruturas do escoamento turbulento (adaptado de [24]).

A analogia entre estes vórtices e as moléculas de um gás (que são as entidades fundamentais da bem estabelecida Teoria Cinética dos Gases) serviu como base para o estudo dos fenómenos turbulentos.

Mas a analogia não é perfeita, enquanto as moléculas são entidades bem definidas e facilmente identificáveis, os vórtices não o são. Ao contrário das moléculas, os vórtices exibem dimensões variáveis no tempo e no espaço, trocam massa entre si e são caracterizados por uma orientação. A “colisão” entre dois vórtices, por exemplo, é um fenómeno muito mais complexo que a colisão entre duas moléculas [24].

Uma das características dos escoamentos turbulentos é a presença simultânea de uma grande quantidade de vórtices, numa vasta gama de escalas temporais e espaciais [19].

Dentro deste espectro, os maiores vórtices transferem energia do escoamento médio para outros menores e estes para outros menores ainda. Cria-se assim um processo contínuo de transferência de energia em direção à uma escala de tamanhos onde a energia é dissipada pelas tensões viscosas, atingindo-se um estado de equilíbrio [29]. Esse processo é conhecido por “cascata de energia” e foi descrito por Kolmogorov em 1941 [28]. A Figura 2.2 mostra um espectro de potência típico de escoamentos turbulentos, representando a energia cinética turbulenta ao longo das escalas espaciais do escoamento em função da frequência de flutuação.

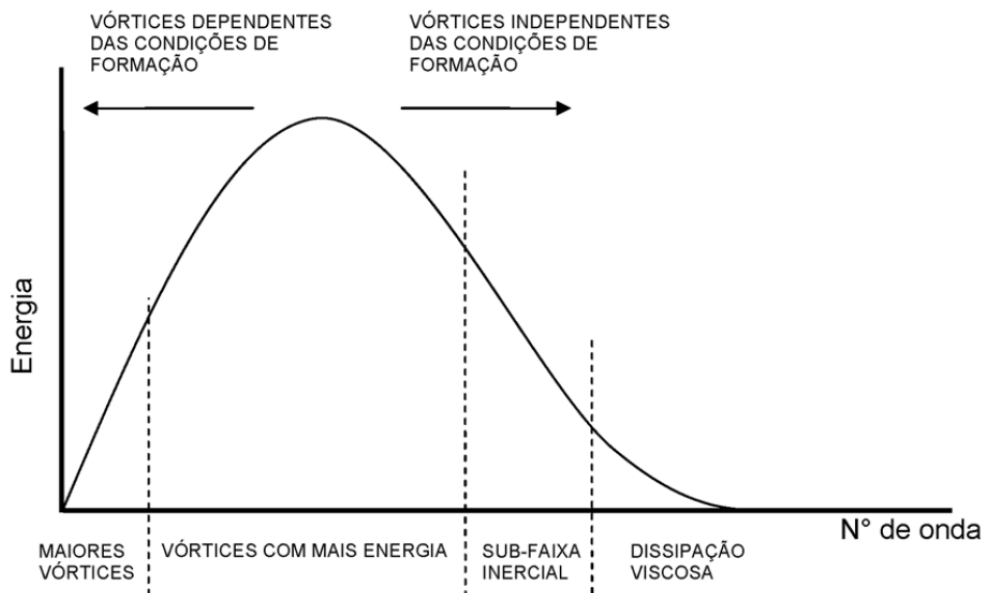


Figura 2.2 - Espectro de um escoamento turbulento [19].

Os grandes vórtices dependem fortemente da geometria do escoamento e da maneira como são gerados, por isso possuem características anisotrópicas e comportamento um tanto determinístico. Ao considerarmos vórtices cada vez menores, a influência da geometria do escoamento vai desaparecendo e o padrão do campo turbulento torna-se cada vez mais aleatório e mais isotrópico [19].

Segundo Eiger, um escoamento turbulento exibe um espectro contínuo nas dimensões dos vórtices, de modo que a quantidade de diferentes tamanhos presentes no espectro é diretamente proporcional ao número de Reynolds do escoamento médio [24]. Este espectro é limitado superiormente pelos contornos físicos do escoamento (vertente esquerda da Figura 2.2). No escoamento num canal, por exemplo, é impossível existir um vórtice cuja dimensão vertical seja maior que a profundidade do canal. De destacar que os vórtices maiores apresentam frequências de flutuações mais baixas e, conforme pode ser observado na Figura

2.2, possuem as maiores escalas de comprimento, ocorrendo o oposto na situação dos vórtices menores [19].

Os vórtices mais energéticos do escoamento turbulento são aqueles que, do ponto de vista estatístico, mais contribuem para o transporte turbulento de massa, energia e momento. Na impossibilidade de simular numericamente todos os componentes do espectro, devido às limitações computacionais, os menores vórtices (menores escalas) são incorporados ao modelo numérico após serem parametrizados pelos chamados modelos de turbulência que se irá referir no capítulo 3 [19].

### **2.1.2.2 Camada Limite e escalas associadas**

Os escoamentos com alto número de Reynolds são caracterizados pela existência de várias escalas de comprimento, as quais possuem um limite superior (imposto pelas dimensões físicas do escoamento - “corpo d’água”) e um limite inferior (determinado pela ação difusiva da viscosidade molecular), a Camada Limite (conceito introduzido por Prandtl em 1904) e a análise das escalas envolvidas nas camadas limite laminar e turbulenta, assim como as Escalas de Kolmogorov [19].

O conceito da camada limite forneceu o elo de ligação entre a teoria e a prática (introduziu, principalmente a possibilidade teórica do resistência aerodinâmica), para além de permitir a solução de problemas de escoamentos viscosos, o que seria impossível pela aplicação das equações de Navier-Stokes ao campo do escoamento. Na camada limite, tanto as forças viscosas como as forças de inércia são importantes. Por consequente, não é surpreendente que o Número de Reynolds seja significativo na caracterização dos escoamentos de camada limite, para averiguar o comprimento característico usado no  $Re$  ou o comprimento na direção do escoamento no qual a camada limite se desenvolveu ou a medida da espessura da camada limite [7].

Prandtl demonstrou que a maioria dos escoamentos viscosos pode ser analisada pela divisão do escoamento em duas regiões: uma próxima da superfície sólida confinante e a outra cobrindo o restante do escoamento. Apenas numa pequena região adjacente ao contorno (denominada camada limite) faz-se sentir o efeito da viscosidade. Observa-se que, em qualquer escoamento viscoso, o fluido em contato direto com a superfície possui a mesma velocidade desta superfície (condição de “não escorregamento”). Na região além desta camada o efeito da viscosidade é desprezável e o fluido pode ser tratado como não viscoso [19].

Uma melhor visualização da formação da camada limite pode ser obtida através da análise de um escoamento com velocidade uniforme sobre uma placa plana. Este fluido, na vizinhança imediata da superfície, fica sujeito à ação de forças de corte devido à desaceleração imposta pela placa como mostra na Figura 2.3. Estas forças tendem a ajustar a velocidade do fluido àquela da superfície em virtude da condição de “não escorregamento” [19].

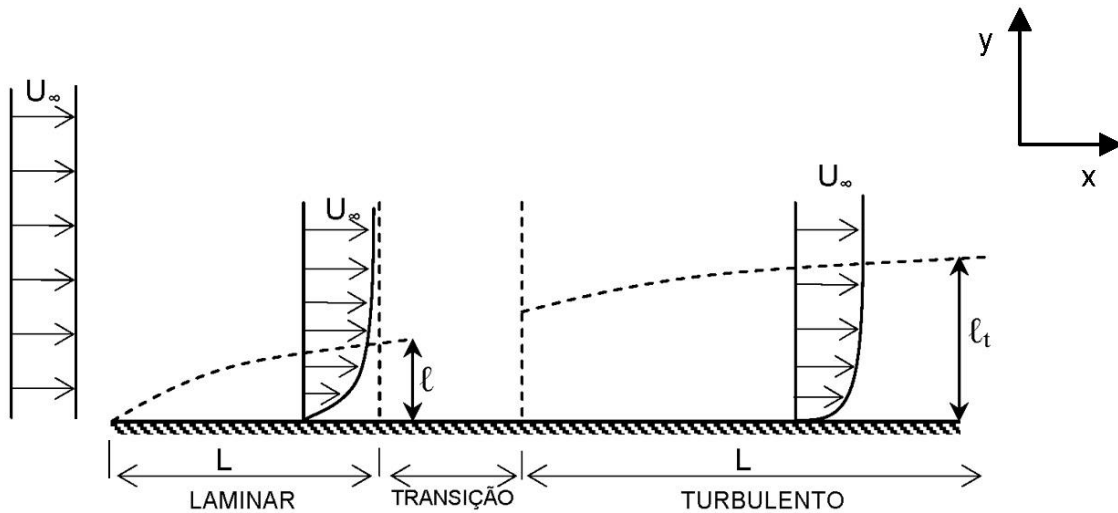


Figura 2.3 - Transição entre o escoamento laminar e o turbulento na camada limite [19].

Na Figura 2.3,  $U_\infty$  representa a velocidade do escoamento livre, ou seja, longe da influência da superfície. No caso específico da Figura 2.3 (escoamento unidirecional na direção de  $x$ ) a tensão de corte  $\tau_{yx}$  será dado por:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad 2.2$$

Na equação 2.2 conhecida como Lei de Newton da Viscosidade,  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica molecular do fluido e  $u(y)$  é a função que define o perfil de velocidade do escoamento. Se a placa estiver em repouso o momento junto à superfície será nulo, enquanto no escoamento livre será expresso por  $\rho U_\infty$ . Isto significa que a presença da placa provoca, na camada adjacente, um déficit de momento em relação àquele do escoamento livre. Por exemplo, o movimento ao redor da asa de um avião, do casco de um navio podem ser representados, de maneira aproximada, pelo escoamento do fluido sobre uma placa plana [19].

A tensão de corte, que atua sobre o perfil de velocidade nas adjacências da superfície, trazendo a velocidade do fluido para o mesmo valor daquele do contorno, mostra que tanto as forças de inércia quanto as viscosas são importantes na camada limite. Não é de surpreender então que o número de Reynolds seja importante na caracterização dos escoamentos em camada limite. O comprimento ou dimensão característica utilizado na determinação deste parâmetro é o que caracteriza o escoamento na região de interesse, podendo ser tanto o comprimento na direção do escoamento, sobre o qual a camada limite se desenvolve, como alguma medida (transversal) da espessura da mesma [30].

O escoamento na camada limite pode ser tanto laminar como turbulento. Esta camada desenvolve-se inicialmente laminar e as instabilidades fazem com que se torne turbulenta. A

Figura 2.4 mostra que uma região laminar forma-se na borda de ataque (lado esquerdo da placa, esta ao longo do eixo  $x$ , cresce em espessura, atingindo uma região de transição onde o escoamento muda de laminar para turbulento. Devido às perturbações de velocidade na direção  $y$ , o perfil de velocidade do escoamento dentro da camada limite turbulenta é mais “achatado” que o correspondente perfil para a camada limite laminar. Na região turbulenta da camada limite a turbulência diminui em direção à parede em tal extensão que começam a predominar os efeitos laminares (viscosos). Isto sugere que mesmo na camada limite turbulenta se desenvolve uma fina subcamada laminar, onde os efeitos viscosos (moleculares) predominam sobre os efeitos de inércia, conforme mostra a Figura 2.2 [31].

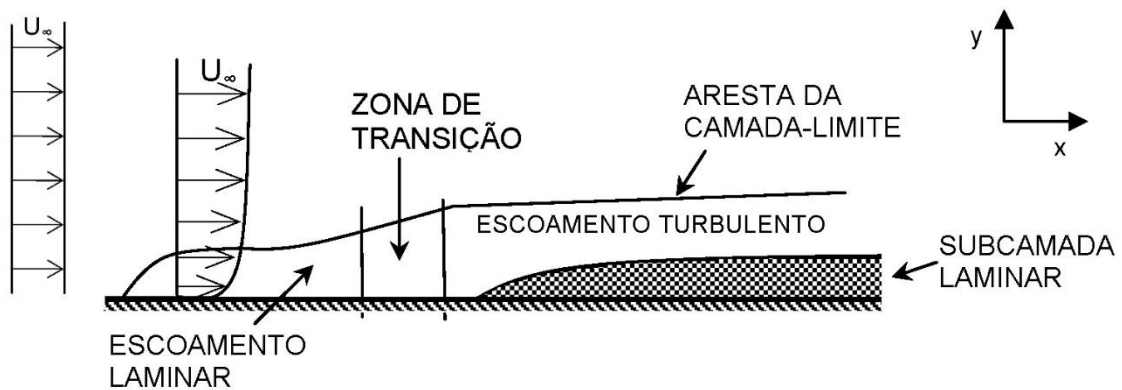


Figura 2.4 - Subcamada viscosa limite Turbulenta [19].

### 2.1.2.3 Camada Limite Laminar (CLL) e escalas associadas

Um escoamento laminar viscoso, estacionário, pode ser descrito pelas equações de Navier-Stokes na forma:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad 2.3$$

Na equação 2.3  $u_{i(j)}$  é a velocidade do escoamento na direção  $x_{i(j)}$ ,  $p$  é a pressão,  $\nu$  é o coeficiente de viscosidade cinemática e  $\rho$  é a massa específica do fluido.

Uma análise de escala aplicada na equação 2.3 permite estimar o termo de inércia como tendo ordem  $O(U^2/L)$ , onde  $U$  e  $L$  são as escalas características de velocidade e comprimento do escoamento (na direção paralela à superfície), respetivamente enquanto o termo de fricção viscosa possui ordem  $O(\nu U/L^2)$ . A relação entre estes dois termos, que comparam as forças de inércia com as forças viscosas que atuam sobre o fluido, é o número de Reynolds, dado por  $Re = \frac{UL}{\nu}$ .

Um elevado número de  $Re$  indica que o termo viscoso é negligenciável quando comparado com o termo de inércia. Mas determinadas condições de contorno podem tornar impossível omitir este termo nalgumas zonas do escoamento. Por exemplo no escoamento sobre uma superfície sólida é necessária a existência de uma *camada limite*. Os efeitos viscosos são importantes nesta região, o que sugere a associação destes efeitos com uma nova escala de comprimento que seja compatível com a camada limite. Pode-se então investigar uma escala de comprimento  $l$ , onde os termos viscosos subsistam e sejam tão importantes quanto os termos advectivos (inércia), o que implica um número de Reynolds na camada limite,  $Re_{CL}$ , de ordem (1). Visto que a ordem do termo viscoso foi agora modificada para *ordem*  $O(\nu U/l^2)$ , pode escrever-se:

$$Re_{CL} = \frac{U^2/L}{\nu U/l^2} = \frac{Ul^2}{\nu L} \left(\frac{l}{L}\right) = Re \left(\frac{l}{L}\right)^2 \quad 2.4$$

Na equação 2.4  $Re$  é o número de Reynolds no escoamento livre. A partir desta equação, a escala da espessura da camada limite laminar  $l$  pode ser relacionada com a escala de comprimento do escoamento livre  $L$  pela seguinte equação:

$$\frac{l}{L} \sim \frac{1}{Re^{1/2}} \quad 2.5$$

Uma escala de tempo  $t$ , característica dos processos difusivos, possui *ordem*  $O(L/U)$ . Através da equação 2.4 é possível escrever:

$$t \sim \frac{l^2}{L} \quad 2.6$$

A escala de comprimento  $l$ , associado à espessura de CLL, é transversal à superfície representada do lado esquerdo da Figura 2.3, dado que está associada à difusão de *momento* na direção normal ao escoamento [19]. Destaca-se que esta difusão, na direção paralela ao escoamento, é negligenciável quando comparada ao transporte advectivo de momento nesta mesma direção [27]. A equação 2.5 mostra que a escala  $l$  do campo de escoamento do qual ela se desenvolve, sendo tão menor quanto maior o número de Reynolds do escoamento.

#### 2.1.2.4 Camada Limite Turbulenta (CLT) e escalas associadas

As escalas de comprimento e velocidade na CLT são ilustradas no dado direito da Figura 2.3. A turbulência transfere o *deficit* de momento, a partir da superfície, na direção normal ao escoamento, a uma taxa  $l_t/t \sim u_t$ , onde  $l_t$  é a escala de comprimento associada à espessura da

CLT,  $t$  é a escala de tempo e  $u_t$  é a escala das flutuações da velocidade do escoamento dentro da CLT. Como os processos advectivo e difusivo ocorrem simultaneamente, pode-se escrever:

$$t \sim L/U \sim l_t/u_t$$

Ou:

$$l_t \sim L \left( \frac{u_t}{U} \right) \quad 2.7$$

O mesmo procedimento, seguido para encontrar uma relação entre as escalas difusiva e advectiva na CLT, poderia ter sido aplicado para encontrar a relação entre as escalas difusiva e advectiva na CLL. Todavia, preferiu-se analisar uma escala entre os termos advectivos e difusivo na equação 2.3 do *momento*. A equação 2.7 demonstra que a escala da espessura da CLT, assim como a da CLL, conforme a equação 2.5, é consideravelmente menor que a escala  $L$  do campo de escoamento no qual ela se desenvolve.

### 2.1.2.5 Resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica,  $D_f$ , resulta da ação cumulativa de dois mecanismos:

A resistência aerodinâmica viscosa, que também pode ser designada por resistência aerodinâmica de atrito, designado por  $D_v$ , pode ser determinada por simples integração da equação 2.2 ao longo do comprimento  $L$  do sólido [32].

Esta é a componente da força sobre um corpo que atua paralelamente à direção do movimento relativo [7].

$$D_v = \int_0^L \tau_0(x) dx \quad 2.8$$

A resistência aerodinâmica de pressão, ou também conhecida como a resistência aerodinâmica de forma, depende da geometria do sólido e é designada por  $D_p$ . Esta surge devido à existência de variação de pressão ao longo da geometria do corpo (e mesmo a jusante dela, como acontece no caso da esteira) [32].

A resistência aerodinâmica total pode ser apresentada pela equação seguinte:

$$D_f = D_v + D_p \quad 2.9$$

É também possível definir de uma forma adimensional a resistência aerodinâmica,  $C_D$ , através da relação entre a resistência total  $D$  e o produto da pressão dinâmica do escoamento de aproximação por uma área característica do sólido como apresentado na seguinte equação:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad 2.10$$

Nesta equação,  $A$  representa a área frontal do sólido, que se obtém por projeção do mesmo sobre um plano perpendicular à direção do escoamento incidente. O coeficiente da resistência aerodinâmica consiste de acordo com a equação 2.10, numa relação entre duas forças. É então o mesmo para dois escoamentos que apresentam semelhança dinâmica, não dependendo portanto, da dimensão do corpo mas sim da sua forma. Para escoamentos claramente subsônico,  $C_D$  é uma função do número de Reynolds. As resistências  $D_v$  e  $D_p$  são decorrentes de forças exercidas segundo as direções tangencial e normal à superfície, respetivamente.

#### 2.1.2.6 Resistência aerodinâmica de atrito puro: Escoamento sobre uma placa paralela ao Escoamento

Como o gradiente de pressão é zero, e como as forças de pressão são perpendiculares à placa em qualquer evento, estas não contribuem para a resistência aerodinâmica [7]. A resistência aerodinâmica total é igual à resistência aerodinâmica de atrito assim:

$$F_D = \int_{\text{superfície da placa}} \tau_w dA \quad 2.11$$

e,

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} = \frac{\int_{PS} \tau_w dA}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad 2.12$$

Onde,  $A$  é a área total da superfície em contacto com o fluido (área molhada) e  $\tau_w$  é a tensão de corte na parede. O coeficiente de resistência aerodinâmica para uma placa plana paralela ao escoamento depende da distribuição de tensão de corte ao longo da placa [7].

Para o escoamento laminar sobre uma placa plana, o coeficiente de tensão de corte é dado por:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad 2.13$$

O coeficiente de resistência aerodinâmica total da superfície para o escoamento com velocidade de corrente livre,  $U$ , sobre uma placa plana de comprimento  $L$  e largura  $b$  é obtido substituindo  $\tau_w$  da equação 2.13 na equação 2.12, assim:

$$C_D = \frac{1}{A} \int_A 0,664 Re_x^{-0,5} dA = \frac{1}{bL} \int_0^L 0,664 \left(\frac{V}{v}\right)^{-0,5} x^{-0,5} b dx \quad 2.14$$

$$= \frac{0,664}{L} \left(\frac{v}{V}\right)^{0,5} \left[ \frac{x^{0,5}}{0,5} \right]_0^L = 1,33 \left(\frac{v}{VL}\right)^{0,5} \quad 2.15$$

$$C_D = \frac{1,33}{\sqrt{Re_L}} \quad 2.16$$

Considerando que a camada limite é turbulenta a partir da borda de ataque, o coeficiente de tensão de corte [7], é dado por:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{0,0594}{Re_x^{1/5}} \quad 2.17$$

Substituindo  $\tau_w$  da equação 2.17 na equação 2.12, obtém-se:

$$C_D = \frac{1}{A} \int_A 0,0594 Re_x^{-0,2} dA = \frac{1}{bL} \int_0^L 0,0594 \left(\frac{V}{v}\right)^{-0,2} x^{-0,2} b dx \quad 2.18$$

$$= \frac{0,0594}{L} \left(\frac{v}{V}\right)^{0,2} \left[ \frac{x^{0,8}}{0,8} \right]_0^L = 0,0742 \left(\frac{v}{VL}\right)^{0,2} \quad 2.19$$

$$C_D = \frac{0,0742}{Re_L^{1/5}} \quad 2.20$$

A equação 2.20 é válida para  $5 \times 10^5 < Re_L < 10^7$ . Para  $Re_L < 10^9$ , a equação empírica é dada por Schlichting [33]:

$$C_D = \frac{0,455}{(\log Re_L)^{2,58}} \quad 2.21$$

Ajustando-se modelarmente aos dados experimentais. Para uma camada limite que inicialmente é laminar e passa por uma transição em algum local sobre a placa, o coeficiente de resistência aerodinâmica turbulento deve ser ajustado para levar em conta o escoamento laminar no comprimento inicial. O ajuste é feito pela subtração da quantidade  $B/Re_L$  do  $C_D$  determinado para escoamento completamente turbulento. O valor de  $B$  depende do número de Reynolds na transição [7], onde  $B$  é dado por:

$$B = Re_{tr}(C_{D_{turbulento}} - C_{D_{laminar}}) \quad 2.22$$

Para um número de Reynolds na transição de  $5 \times 10^5$ , o coeficiente de resistência aerodinâmica pode ser calculado fazendo o ajuste da equação 2.20, neste caso:

$$C_D = \frac{0,0742}{Re_L^{1/5}} - \frac{1740}{Re_L} \quad (5 \times 10^5 < Re_L < 10^7) \quad 2.23$$

Ou na equação 2.21, caso em que:

$$C_D = \frac{0,455}{(\log Re_L)^{2,58}} - \frac{1610}{Re_L} \quad (5 \times 10^5 < Re_L < 10^9) \quad 2.24$$

A variação no coeficiente de resistência aerodinâmica para uma placa plana paralela ao escoamento é mostrada na Figura 2.5.

Neste gráfico foi considerada a transição ocorrer em  $Re_x = 5 \times 10^5$ , para escoamentos em que a camada limite era inicialmente laminar. O número de Reynolds real, no qual a transição ocorre, depende de uma combinação de fatores tais como rugosidade da superfície e perturbações da corrente livre. A transição tende a ocorrer mais cedo (em número de Reynolds mais baixos) quando a rugosidade da superfície ou da turbulência da corrente livre é aumentada [7].-

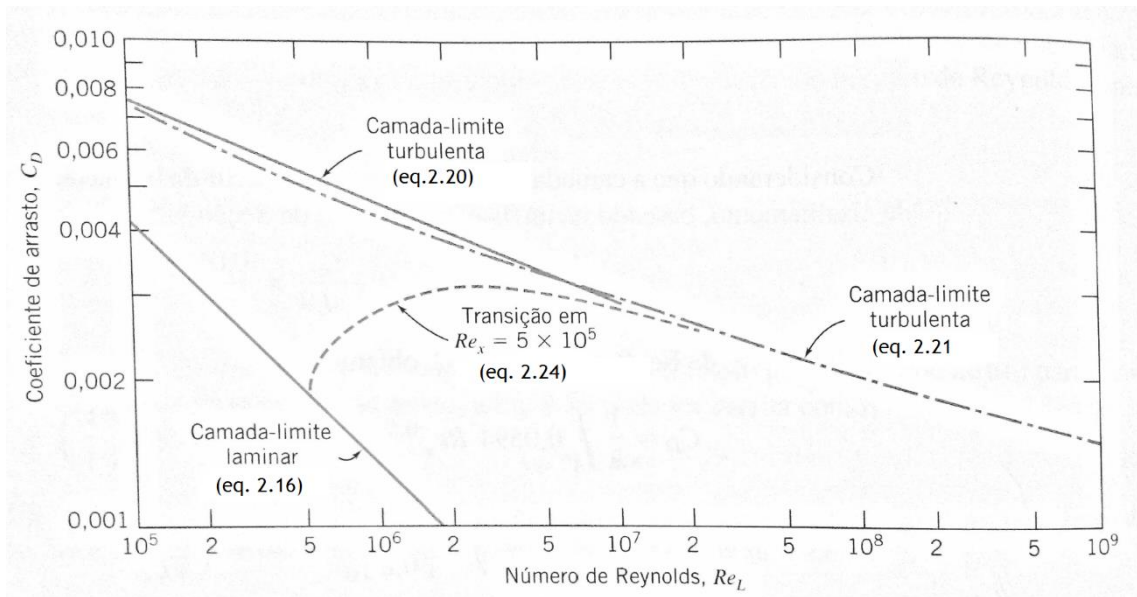


Figura 2.5 - Variação do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds para uma placa plana lisa paralela ao escoamento (adaptado de [7]).

### 2.1.2.7 Camada limite em regime turbulento

Para uma placa plana com velocidade  $U = \text{constante}$  pode-se satisfazer o perfil de velocidade turbulenta através de uma aproximação e a tensão de corte na parede  $\tau_w$  de forma a resolver a para  $\delta(x)$ :

$$\tau_w = \rho U^2 \frac{d\delta}{dx} \int_0^1 \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) d\eta \quad 2.25$$

A equação integral da quantidade de movimento é aproximada, assim um perfil de velocidades aceitável para a camada limite turbulenta sobre uma placa plana lisa é o perfil empírico da lei de potência. A utilização do expoente  $\frac{1}{7}$  é tipicamente usado para modelar o perfil de velocidade turbulento:

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} = \eta^{1/7} \quad 2.26$$

No entanto, este perfil não permanece nas vizinhanças imediatas da parede, uma vez que se prevê  $du/dy = \infty$  na parede. Portanto não se pode usar na definição de  $\tau_w$  para se obter uma expressão para  $\tau_w$  em função de  $\delta$ , para tal para o regime turbulento tem de se adaptar uma expressão desenvolvida para escoamento em tubo:

$$\tau_w = 0.0332 \rho \bar{V}^2 \left[ \frac{v}{R\bar{V}} \right]^{0.25} \quad 2.27$$

Para o perfil de potência  $\frac{1}{7}$  em tubo, substituindo  $\bar{V}/U = 8.17U$  e  $R = \delta$  e substituindo na equação 2.27, obtém-se:

$$\tau_w = 0.0332\rho U^2 \left(\frac{v}{U\delta}\right)^{1/4} \quad 2.28$$

Substituindo para  $\tau_w$  e  $u/U$  na equação 2.25 e integrando, resulta:

$$0.0332\rho U^2 \left(\frac{v}{U\delta}\right)^{1/4} = \frac{d\delta}{dx} \int_0^1 \eta^{1/7} (1 - \eta^{1/7}) d\eta = \frac{7}{72} \frac{d\delta}{dx} \quad 2.29$$

Obtendo-se assim, uma equação diferencial para  $\delta$ :

$$\delta^{1/4} d\delta = 0.24 \left(\frac{v}{U}\right)^{1/4} dx \quad 2.30$$

Que ao ser integrada, vem:

$$\frac{4}{5} \delta^{5/4} = 0.24 \left(\frac{v}{U}\right)^{1/4} x + c \quad 2.31$$

Ao considerar que  $\delta = 0$  para  $x = 0$  (considerando o escoamento turbulento desde a borda de ataque), então  $c = 0$ :

$$\delta = 0.382 \left(\frac{v}{U}\right)^{1/5} x^{4/5} \quad 2.32$$

A espessura da camada limite,  $\delta$ , demonstra-se que cresce conforme  $x^{4/5}$ . Este crescimento é praticamente linear. Normalmente  $\delta$  é apresentada de uma forma adimensional:

$$\frac{\delta}{x} = 0.382 \left(\frac{v}{Ux}\right)^{1/5} = \frac{0.382}{Re_x^{1/5}} \quad 2.33$$

Usando a equação 2.28, obtém-se o coeficiente de atrito superficial em função de  $\delta$ :

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = 0.466 \left( \frac{v}{U\delta} \right)^{1/4} \quad 2.34$$

Substituindo para  $\delta$ :

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{0.0594}{Re_x^{1/5}} \quad 2.35$$

Dados experimentais demonstram que a equação 2.35 prevê satisfatoriamente o atrito superficial turbulento numa placa plana para  $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$  [7].

## 2.2 Estado da Arte - Os *Riblets* como mecanismo de redução de resistência aerodinâmica

A utilização de padrões de rugosidades, *Riblets*, ao longo do escoamento é um método de controlo da camada limite para redução de atrito aerodinâmico, visto que na presença destas geometrias próximas da parede que está intimamente ligado com a interação das forças viscosas com a área molhada observando-se uma redução das flutuações turbulentas próximas da parede comparativamente ao escoamento sobre uma placa lisa, significando um decréscimo na transferência de momento turbulento acima da superfície dos *Riblets* e como consequência, um decréscimo na tensão de corte da parede  $\tau_w$ , resultando na redução de atrito aerodinâmico viscoso.

### 2.2.1 Técnicas de redução de resistência aerodinâmica em regime turbulento

O controlo de escoamento é classificado de duas categorias distintas:

**Ativa** - requerendo a adição de energia e/ou a utilização de realimentação, por exemplo, no controlo da camada limite do fluido na parede, usando técnicas como a sucção, aquecimento da parede para atrasar a transição de regime laminar para regime turbulento no escoamento, modificação da viscosidade do fluido através da injeção de polímeros ou alterar a temperatura do fluido.

**Passiva** - Este controlo é autorregulável sem que seja necessária adição de energia. Estão incluídos neste método de controlo do escoamento técnicas como a modificação de estruturas em escoamentos externos como “*Large Eddy Breakup Devices*” (LEBU) e o controlo laminar natural (gradiente de pressão/forma da parede). Uma das técnicas encontradas é a

redução da tensão de corte na parede, recorrendo à utilização de “*Riblets*”. Assim, para haver um entendimento dos mecanismos de resistência aerodinâmica requer-se um conhecimento da geração e interação dos fluxos de resistência aerodinâmica com a rugosidade da superfície. As formas mais básicas de resistência aerodinâmica num fluido, como visto na secção 2.1.2.5, são apresentadas na forma de resistência aerodinâmica de pressão e resistência aerodinâmica de fricção. A resistência aerodinâmica de pressão é associado com a energia requerida para mover o fluido da frente de um sólido em movimento que depois é reposta por trás deste. Criando assim formas simples que permite a redução de resistência aerodinâmica. A resistência aerodinâmica de fricção é gerada pela interação entre o fluido e a superfície do sólido, bem como entre as atrações moleculares do fluido [20].

Os mais recentes resultados experimentais bem como estudos numéricos sugerem que, existem duas atividades importantes na turbulência junto à parede na camada limite, denominadas de varrimentos (*sweeps*) e ejeções (*ejections*) em que é produzida 80% da energia da turbulência [34], representadas na Figura 2.6.

*Ejeções* são associadas à *componente – u* negativa e à *componente – v* positiva da velocidade. Esta injeção de vórtices fora da subcamada viscosa (bem como no escoamento caótico nas camadas externas na camada turbulenta) são formas pela transferência de momento, sendo estas fatores importantes na resistência aerodinâmica.

*Varrimentos* são ações turbulentas associadas com a *componente – u* positiva e à *componente – v* negativa da velocidade. Estas são particularmente importantes no que diz respeito à redução de resistência aerodinâmica, porque são as responsáveis pela geração de tensão turbulenta de corte na parede [35].

Foram realizados estudos que demonstram a estreita relação entre a formação de vórtices e instabilidade na esteira [36], indicando que a criação de vórtices não se envolve com a geração de vórtices no escoamento devido à vorticidade transversal junto à parede pela condição de não escorregamento ou da vorticidade devido à rotação do fluido. Em vez disso, a razão deve-se à contração e retração da vorticidade transversal junto à parede que levam ao seu colapso.

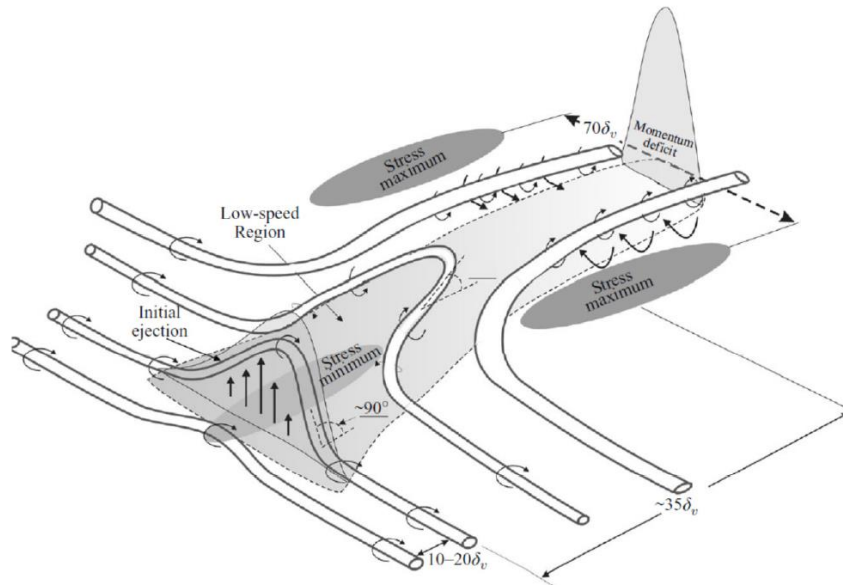


Figura 2.6 - Modelo conceitual ilustrando o processo da ascensão dos vórtices ao longo do corpo resultando na formação de pares de vórtices contra-rotacionais, regiões com tensão de corte na parede extrema e regiões de baixo momento em superfícies lisas [37].

### 2.2.2 Regimes de escoamentos sobre superfícies rugosas

A condição da superfície da parede, bem como a rugosidade, tem uma influência importante nas características da estrutura do escoamento turbulento na região junto à parede. Os elementos rugosos, dependendo das características do escoamento turbulento, podem ser subdivididos em *tipo-d* e *tipo-k*. No escoamento *tipo-d* as cavidades entre as rugosidades são estreitas e são influenciadas por uma escala externa (por exemplo, o diâmetro do canal). No escoamento *tipo-k*, a turbulência é dependente da altura das rugosidades [38].

Com base em evidências experimentais sobre geometrias físicas da parede, revelou-se que existem três regimes de escoamentos turbulentos sobre superfícies rugosas, hidraulicamente lisas, transição rugosa e completamente rugosas, dependem principalmente do tamanho dos elementos da rugosidade relativamente à subcamada viscosa [39]. Para a rugosidade do tipo-k, o grão equivalente do grão da rugosidade para o número de Reynolds  $k_{eq}^+ = U_\tau k_{eq} / \nu$  onde  $U_\tau$  é a velocidade de fricção,  $k_{eq}$  é altura equivalente do grão de rugosidade, e  $\nu$  é a viscosidade cinemática [40] e [41]. Pode ser usado como um indicador do regime turbulento induzido pela rugosidade na parede nos seguintes:

Hidraulicamente Liso	$0 < k_{eq}^+ \leq 5$
Transição Rugosa	$5 < k_{eq}^+ \leq 70$
Completamente Rugosa	$k_{eq}^+ \geq 70$

Vários parâmetros e escalas de medição de superfícies têm sido estudadas por vários investigadores, entre as quais a velocidade de fricção,  $u_\tau$ . Na literatura este é um dos parâmetros mais frequentemente usado para analisar a influência dos efeitos que a superfície rugosa tem na velocidade média do campo de turbulência. As estruturas denominadas *Riblets* (que são usadas para a redução de resistência aerodinâmica) podem ser consideradas como rugosidades de transição [42]. A Figura 2.7 demonstra o método de otimização dos *Riblets*.

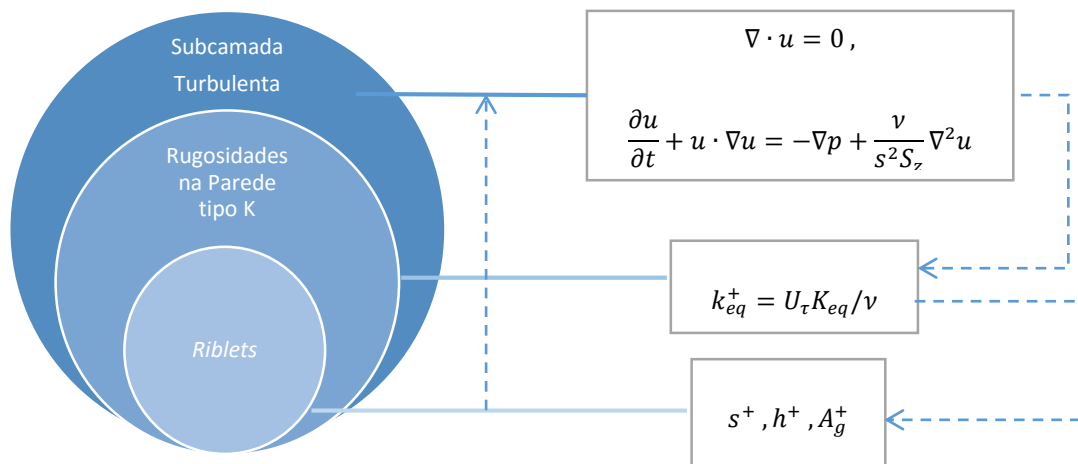


Figura 2.7 - Representação de *Riblets* na Rugosidade de transição na subcamada de transição num escoamento turbulento.

### 2.2.3 Análise teórica do mecanismo de *Riblets*

O controlo passivo de redução de resistência aerodinâmica utilizando *Riblets* diminui aproximadamente entre 6% a 8% a resistência aerodinâmica aerodinâmico em escoamento turbulento. O conceito dos *Riblets* é inspirado na pele de tubarão que simplificada-mente são micro protuberâncias longitudinais aplicadas na superfície de um corpo. Estas parecem-se com ranhuras em forma de V, que no caso do da pele dos tubarões, aumentam a velocidade e a agilidade destes predadores, ao diminuírem a tensão de corte total ao longo da superfície impedindo movimento transversal do escoamento (*cross-stream translation*) e de translação de vórtices (*stream-wise vortices*) na subcamada viscosa.

Tipicamente, num escoamento em regime turbulento, a resistência aerodinâmica aerodinâmico cresce dramaticamente com o aumento da área de superfície fazendo com que as tensões de corte atuem nessa maior área. No entanto, os vórtices permanecem acima dos *Riblets*, interagindo apenas acima das cristas e raramente causam fluxos de alta velocidade nos vales. Assim, os vórtices de alta velocidade apenas interagem com pequenas áreas da

superfície e somente estas áreas estão sujeitas a tensões de corte. Além disso as baixas velocidades no fluido produzem também tensões de corte particularmente reduzidas no interior dos vales, comparativamente com a maioria das superfícies de *Riblets*, reduzindo assim as flutuações e o movimento transversal do escoamento do que comparando com a placa plana [43].

Estas diferenças nas flutuações de velocidades no movimento transversal do escoamento são evidências da redução da tensão de corte e transferência de momento junto à parede, o que minimiza os efeitos do aumento da área. Embora os vórtices permanecem acima das cristas dos *Riblets*, ocorrem algumas formações de vórtice secundários que se introduzem nos seus vales, mas a tensão de corte causada pela sua interação é relativamente pequena [44]. Estas saliências estão orientadas para o lado do campo do escoamento, fazendo elevar o escoamento para que a transição da camada turbulenta se dê mais rapidamente. Por isso é que as alturas dos *Riblets* a montante do escoamento são maiores que a espessura da camada limite. Esta dimensão ( $s^+$ ) é referida como altura que define a performance otimizada, como mostra na Figura 2.8.

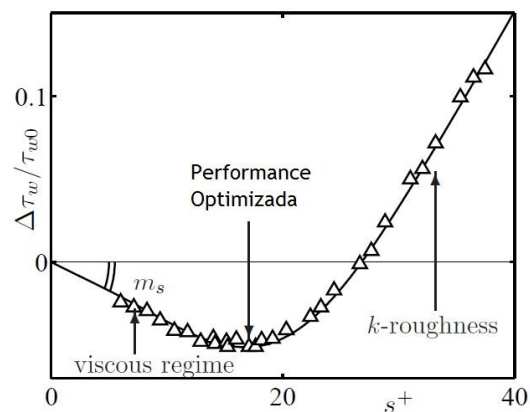


Figura 2.8 - Efeitos de distância entre cristas ( $s^+$ ) na tensão superficial de *Riblets* triangulares com ângulo de  $60^\circ$  (adaptado de [9]).

Em escoamento laminar, ao calcular a velocidade média do escoamento no sentido da corrente (*stream-wise velocities*) na parte mais alta da superfície dos *Riblets* e comparando com as velocidades médias (no ponto mais alto, sobre uma placa plana), encontra-se a altura efetiva da protrusão do escoamento laminar no sentido da corrente. Similarmente, a altura efetiva da protrusão na corrente transversal é encontrada ao comparar a diferença entre as alturas verticais desde a origem entre as velocidades do fluxo no sentido da corrente e a velocidade do fluxo no sentido transversal (*cross-stream velocities*) para qualquer geometria de *Riblets*. Esta tem sido a forma de cálculo proposta para definir um grau da redução da translação de vórtices para baixo número de Re [9].

O segundo mecanismo de redução de resistência aerodinâmica que os *Riblets* incitam à redução da transferência de momento em sentido diferente do escoamento, causando a redução da translação transversal dos vórtices presentes na subcamada viscosa, diminuindo a transferência de momento transversal e, conseqüentemente, reduzindo a resistência aerodinâmica de atrito experimentado pelo corpo [45]. Os mecanismos não são completamente compreendidos, mas de facto o momento transportado pelos vórtices e em sentido diferente do escoamento é um puro desperdício [9]. Ao reduzir estes eventos, pode-se aumentar a eficiência energética.

Alguns aspetos continuam a gerar controvérsia, tem-se demonstrado que os *Riblets* causam o atraso na transição da camada laminar (*visous sub-layer*) para a camada turbulenta [46]. Para além disso alguns estudos estão focados no modo como a resistência aerodinâmica é reduzido através de uma região viscosa na base dos vales dos *Riblets* onde a tensão de corte na parede é bastante baixa, ou seja a taxa de crescimento da espessura de momento durante este estado não linear de transição sobre uma superfície lisa, é maior do que sobre uma superfície com *Riblets*, adicionalmente a intensidade turbulenta é reduzida pelos *Riblets*, visto que a transição turbulenta terá sido reduzida [47]. A primeira hipótese apresentada no ano de 1937 proposta por Kramer [48], não foi satisfatoriamente explicada a influência causada pelos *Riblets* na redução de resistência aerodinâmica [49]. Poucas são as teorias referidas na literatura que se debruçam sobre a performance dos *Riblets* em detrimento das teorias que se focam no comportamento do fluxo no sentido transversal. A primeira teoria sugere que com a geração de vórtices secundários e a existência dos vales dos *Riblets*, enfraquece a vorticidade no sentido da corrente imediatamente acima da crista dos *Riblets* [50]. Uma diferente teoria descrita por Robinson [51], Smith et al. [52], estabelece a interação entre o escoamento a baixas velocidades e os *Riblets* na parede, o que diferentes investigadores como Choi [53] confirmam a redução de fricção superficial e a resistência aerodinâmica por impedir a formação de vórtices longitudinais ao longo do escoamento. Karniadakis em conjunto com Choi, no ano de 2003 [35], concluíram que os vórtices sobre a superfície dos *Riblets* tende a ser menor comparando com uma superfície lisa, para além do espaçamento ente o escoamento ao longo do corpo ser mais largo, sustentando a descoberta que a tensão superficial é reduzida. Em 1989, Bechert e Bartenwerfer [54] determinaram uma localização eficaz para a origem do perfil de velocidade e uma "altura de protrusão", que é a distância entre a origem deste perfil de velocidade picos dos *Riblets*, como mostra a Figura 2.9.

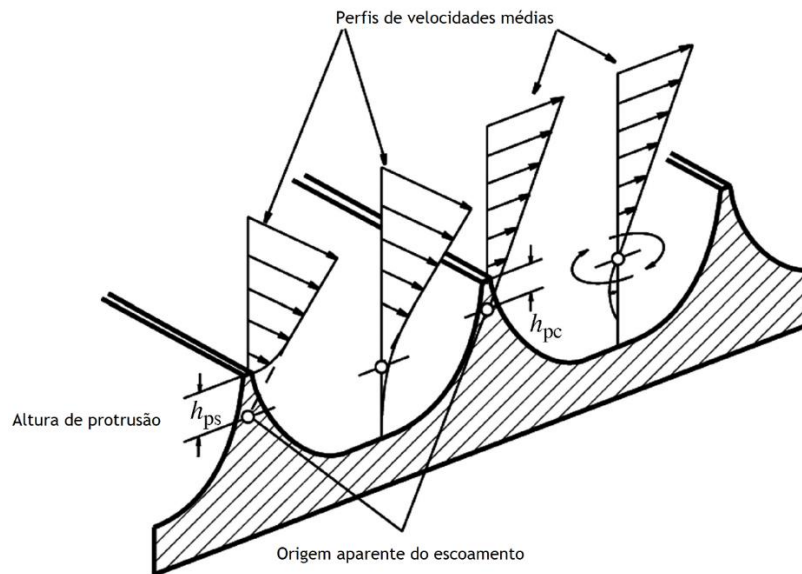


Figura 2.9 - Origem aparente de superfície com *Riblets* (adaptado de [54]).

Esta técnica proporciona a distribuição da tensão de corte na parede, através da média do valor de tensão de corte, mas não sendo possível obter qualquer previsão de redução de resistência aerodinâmica. Com esta técnica, Bechert et al. [9] concluíram que a componente de fluxo cruzado flutuante é reduzida, contribuindo para a redução da transferência de quantidade de movimento turbulento concluindo assim que a tensão de corte será diminuída.

Os trabalhos de Bechert e Batenwerfer [54] tem sido continuados e elaborados por um grupo de investigadores da Universidade de Milão [55], [56] e [57] propondo que a redução de resistência aerodinâmica pode ser otimizado por maximizar a diferença entre a altura da protrusão para o escoamento longitudinal e para o escoamento transversal. Adicionalmente, Luchini [86] estudou a inerência do efeito dos *Riblets* sobre a estabilidade da camada limite usando o método  $e^N$ . Esta investigação demonstrou que as *ondas Tollmien-Schlichting (T-S)* sobre *Riblets* triangulares, permitiram descobrir que estas são excitadas a um baixo número de Reynolds. Um outro grupo que seguiu os trabalhos de Bechert e Batenwerfer, definiu que o conceito de redução de resistência aerodinâmica utilizando *Riblets* pode ser relacionado entre a diferença da altura de protrusão no sentido do escoamento com a altura da protrusão do sentido transversal [58].

Mais recentemente, em 2012, García-Mayoral e Jiménez [59] sugeriram uma nova escala de comprimento baseado na área das ranhuras do que com os espaçamentos ou profundidades dos *Riblets*, tendo como suporte atividades experimentais existentes, como está presente na Figura 2.10.

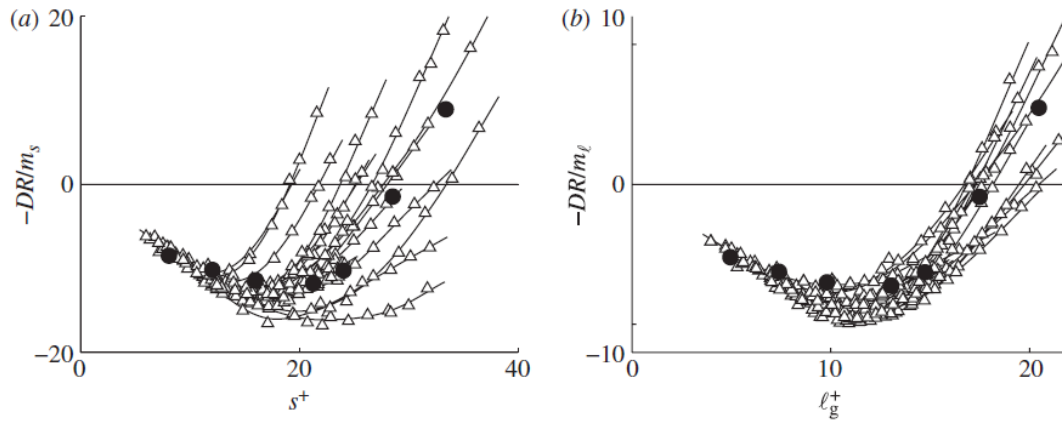


Figura 2.10 - Curvas de redução de resistência aerodinâmica em vários *Riblets* para inclinação viscosa comum. Redução de resistência aerodinâmica (a) em função do espaçamento  $s^+$  e (b) em função da raiz quadrada da secção de corte,  $L_g^+ = A_g^{+1/2}$ . Triângulos não preenchidos - resultados obtidos de experiências de Bechert [9]. Círculos preenchidos - são resultados obtidos por DNS de García-Mayoral & Jiménez [60].

Afirmando que “a degradação para grandes *Riblets* no regime linear de redução de resistência aerodinâmica não está ligada com a desagregação do comportamento de Stokes na velocidade longitudinal do escoamento ao longo das ranhuras dos *Riblets*”. Esta técnica não fornece argumentos físicos convincentes quando ocorre uma perturbação de fluxo tridimensional, numa altura acima da superfície, onde as tensões de corte no sentido do escoamento e no escoamento transversal, onde as direções são diferentes [60].

#### 2.2.4 Investigação Experimental em *Riblets*

São utilizados vários métodos para as técnicas de medições experimentais que são utilizadas nos escoamentos sobre *Riblets*. São estas Fio Quente, VITA e visualização. Há várias vantagens na utilização de *Riblets* em variadas áreas da engenharia, como por exemplo nos testes de voo pela Boeing [61] pela Airbus [62] e pela NASA [63], conduzidos estes últimos Walsh no ano de 1989, os resultados destas experiências demonstraram a importância dos efeitos dos *Riblets*. Robert [64] em 1992 estudou alguns trabalhos realizados em perfis alares, efetuados por investigadores como Szodruch [65], que estimou uma redução de resistência aerodinâmica em 2% durante os testes de voo num avião comercial, Airbus 320, estando este revestido de *Riblets* em 70% da superfície da sua fuselagem e asas. Em 2012, Sareen [66] empregou tamanhos diferentes em *Riblets* tipo dentes de serra aplicadas ao perfil alar DU 96- W-180 para o túnel de vento, obtendo uma redução média de 2-4% de resistência aerodinâmica analisando para tal uma variação de  $Re$  e de tamanhos dos *Riblets*. A geometria ótima em forma de entalhe em V (ver Figura 2.11) foi apontada para ter um tamanho de 62  $\mu\text{m}$  como mostra a Tabela 2.1. Além disso Lee e Jang [67], em 2005, relataram uma redução geral de resistência aerodinâmica em

perfis alares utilizando *Riblets* com um espaçamento ótimo entre 30 a 70  $\mu\text{m}$ , estes resultados são similares aos obtidos experimentalmente num avião por Viswanath [68], em 2002.

Tabela 2.1 - Percentagem de redução de resistência aerodinâmica utilizando *Riblets* em perfis alares DU 96-W-180.

Re	Dimensões dos <i>Riblets</i> ( $\mu\text{m}$ )			
	44	62	100	150
$1 \times 10^6$	0-1%	2-4%	2-4%	+
$1,5 \times 10^6$	1-2%	4-5%	2-4%	++
$1,85 \times 10^6$	0-1%	1-2%	++	++

Nota: o símbolo “+” indica que há um aumento de resistência abaixo dos 4% e o símbolo “++” indica que há um aumento de resistência acima dos 4%.

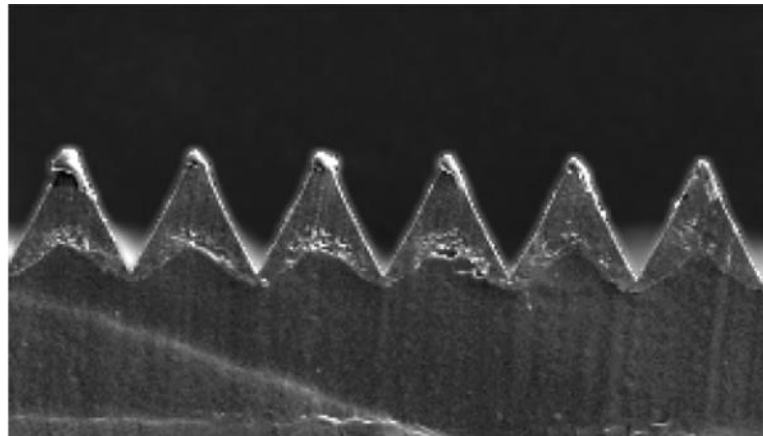


Figura 2.11 - *Riblets* de 62  $\mu\text{m}$ .

A Figura 2.12 apresenta diversas configurações de *Riblets* que foram testados pela NASA e as respectivas dimensões. Por sua vez, na Tabela 2.2 encontram-se as configurações alternativas das geometrias também testadas pela NASA [69].

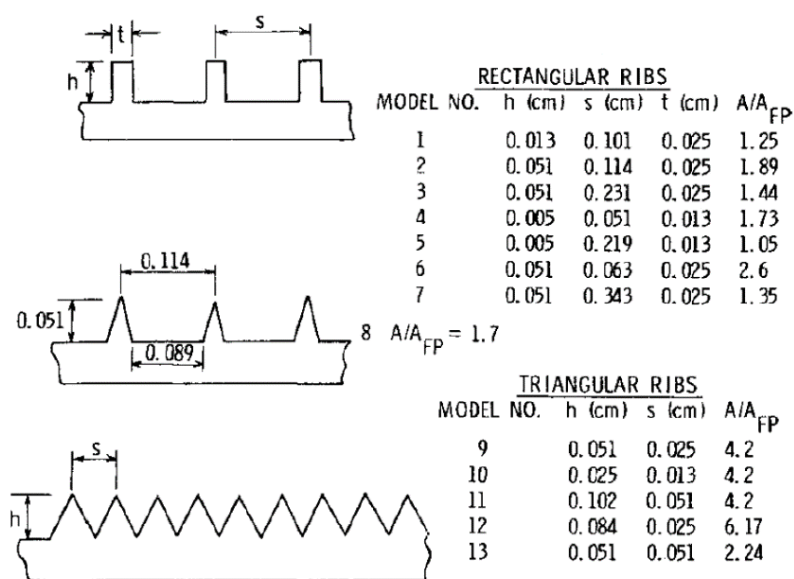


Figura 2.12 - Riblets Triangulares e Retangulares testados [69].

Tabela 2.2 - Modelos de riblets testados pela NASA (adaptado de [69]).

Modelo	Descrição
	Entalhe em V simétrico
	Retangular
	Triangular espaçado
	Triângulos retos
	Curvatura máxima
	Curvatura em vale
	Curvatura com picos e vales
	Curvatura com Picos em Serra
	Entalhe em V com espaçamento
	Entalhe assimétrico
	Entalhe em V oblíquo

Não é apenas na indústria aeronáutica onde são aplicados os Riblets, também outras áreas da indústria tem mostrado interesse na utilização desta tecnologia, como por exemplo em comboios de alta velocidade [70].

Uma ampla revisão dos efeitos aerodinâmicos sobre várias geometrias dos *Riblets* estudados em túnel de vento foi realizada por Walsh e Lindemann [71] em 1984, Walsh em 1990 [72], Vukoslavcevic [73] em 1992, Park e Wallace [74] em 1994, Choi em 1999 [75], Lee e Lee em 2001 [43] e Bushnell [76] no ano de 2003.

Os estudos iniciais da redução de atrito através de *Riblets* foram feitos por Walsh e Weinstein [77] em 1978 e Walsh [78] ao abrigo da agência NASA. Usaram um contrapeso diretamente no túnel de vento para averiguar a redução de arrasto e o comportamento em variadas geometrias de *Riblets* com tamanhos de aproximadamente  $s^+$ ,  $h^+ = 10 - 15$ . Tendo condições para atingir reduções de atrito aerodinâmico entre 7 a 8 % para *Riblets* com geometrias e forma de V U e L, que parecem ser as geometrias mais eficazes.

O espaçamento entre as rugosidades e a sua profundidade expressas em unidades de parede tem sido consideradas as escalas de *Riblets*, no entanto em 1997 Dubief et al. [79], mediu estatisticamente  $\partial u / \partial y$  sobre uma placa plana e sobre uma placa de *Riblets* utilizando fios quentes paralelos, concluindo com as suas observações que  $\partial u / \partial y$  é o maior contribuinte para a vorticidade ao longo do escoamento.

Além destes tipos de medições foram realizadas por Benhalilou et al. medições utilizando um velocímetro de laser de Doppler [80].

Uma das técnicas padrão utilizadas na investigação da camada limite sobre placas planas e placas com *Riblets* é o método Variável Interna de Tempo Médio (*Variable Internal Time Averaging*) VITA. Neste método, num curto intervalo de tempo, um valor obtido pela média da raiz quadrada é comparado com um valor da média da raiz quadrada de todo o espaço de tempo, onde tipicamente são utilizados valores da velocidade do escoamento no sentido da corrente medida num ponto fixo [81].

Uma outra maneira de estudar os efeitos das ações dos *Riblets* sobre os escoamentos é investigando o varrimento (*sweep*) e efeitos de ejeção (*ejection*) usando a técnica de detecção de quadrante [82] e [83]. Bogard e Tiederman demonstraram que a frequência de ejeções diminui na presença de *Riblets*, mas pelo contrário o varrimento aumenta [84].

A visualização do escoamento também é uma técnica que tem sido usada para medir o escoamento em *Riblets* com particular atenção ao comportamento do fluxo nos interstícios das geometrias. Gallager e Thomas [85] em 1984 e Bacher e Smith [50] em 1985 notaram que havia um “repouso geral” a baixas velocidades do escoamento nos sulcos de entalhe em V com dimensões de  $h^+ = s^+ = 15$  que estavam marcados com tinta. Foram observados resultados semelhantes no fumo traçador em escoamentos de ar sobre *Riblets* com dimensões de  $2h^+ = s^+ = 30$  por Hooshmand et al. em 1983 [86].

## 2.2.5 Síntese de resultados experimentais em *Riblets*

Encontram-se na literatura alguns estudos que demonstram testes físicos em três ambientes distintos: água (Tabela 2.3); ar (Tabela 2.4) e óleo (Tabela 2.5). Estes comprovam que na maioria dos trabalhos experimentais, existe uma redução do atrito aerodinâmico (*drag*) quando é aplicado a tecnologia de *Riblets*, comparativamente a superfícies lisas.

Tabela 2.3 - Estudos experimentais em canal de água com placas planas de diferentes tipos de *Riblets* [69].

Autores Originais	Ano	Tipo de riblet	Dimensão dos <i>riblets</i>	Redução de Atrito aerodinâmico (%)
Gallagher and Thomas [87]	1984	Entalhe em V	$h^+ = 15$ $h = s = 1650 \mu\text{m}$	Sem redução
Bacher and Smith [88]	1986	Entalhe em V	$h^+ = s^+ = 15$	Sem redução
Reidy [88]	1987	Entalhe em V	$s^+ = 13.1$	8.1 %
Reidy and Anderson [89]	1988		$h = s = 76.2 \mu\text{m}$	
Djenidi et al. [90]	1989	Entalhe em V	$h^+ = s^+ = 15$ $s = h = 2000 \mu\text{m}$	4 %
Pulles et al. [91]	1989	Triangular	$h = 2500 \mu\text{m}$	10.6 %
Walsh [72]	1990	Entalhe em V	$h = 35.56 \mu\text{m}$ $s = 40.89 \mu\text{m}$	6 %
Liu [92]	1990	Entalhe em V	$s^+ = 13$	7 %
Neumann and Dinkelacker [93]	1991	Triangular	$h^+ = s^+ = 10 - 15$ $s = h = 152 \mu\text{m}$	13 %
Rohr et al. [94]	1992	Entalhe em V	$h^+ = s^+ = 12.2$ $s = h = 72.6 \mu\text{m}$	9%
Parker and Sayers [95]	1999	Entalhe em V	$h/s=0.22-1$	6.83 %
Wang et al. [96]	2000	Trapezoidal	$h = 1000 \mu\text{m}$ $h/s=0.22-1$	–
Dean and Bhushan [97]	2012	Entalhe em V	$h = 1000 \mu\text{m}$ $h/s=0.22-1$	–

Tabela 2.4 - Estudos experimentais realizados em túnel de vento com placas planas de diferentes tipos de *Riblets* [69].

Autores Originais	Ano	Tipo de <i>Riblet</i>	Dimensão dos <i>riblets</i>	Redução de Resistência aerodinâmica (%)
Liu [98]	1966	Quadrada	$h^+ = 45-110$ $s^+ = 190-370$	3%
Furuya et al. [99]	1977	Retangular	$h = 60\ 000\ \mu\text{m}$ $s = 20\ 000\ \mu\text{m}$	Sem redução
Walsh and Weinstein [77]	1979	Entalhe em V	$h^+ = 25, s^+ = 20$ $h = 510\ \mu\text{m}, s = 250\ \mu\text{m}$	2 a 4 %
Walsh [78]	1983	Entalhe em V	$h^+ = 10$ $s^+ = 15$	8 %
Walsh and Lindman [71]	1984	Entalhe em V	$h^+ = 13$ $s^+ = 15$	7 a 8 %
Enyutin et al. [100]	1987	Triangular	$h = 170\ \mu\text{m}$ $s = 250\ \mu\text{m}$	7 a 8 %
		Retangular	$h = 215\ \mu\text{m}$ $s = 260\ \mu\text{m}$	7 a 9 %
Wilkinson and Lazos [101]	1988	Retangular	$h^+ = 8$ $s^+ = 10$	8.5%
Choi [102]	1988	Entalhe Trapezoidal	$h^+ = 12, s^+ = 20$ $h = 1500\ \text{mm}$ $s = 2500\ \text{mm}$ $t = 200\ \text{mm}$	4 %
Nguyen et al. [103]	1990	Entalhe em V	$h^+ = 8, s^+ = 20$ $h = 200\ \mu\text{m}$ $s = 500\ \mu\text{m}$	5 %
Enyutin et al. [104]	1991	Entalhe em V	$h = 500\ \mu\text{m}$ $s = 260\ \mu\text{m}$ $h/s = 0.3$	8 a 10 %
Baron and Quadrio [58]	1993	Entalhe em V	$h^+ = s^+ = 12$ $h = s = 700\ \mu\text{m}$	6%
Nieuwstadt et al. [105]	1993	Entalhe em V	$h^+ = s^+ = 13$ $h = s = 640$	5%
Park and Wallace [106]	1994	Entalhe em V	$h^+ = 14$ $s^+ = 28$	4%
Gudilin et al. [107]	1995	Entalhe em V	$s^+ = 12-15$ $a = 53$ $h = 140\ \text{mm}$ $s = 320\ \text{mm}$	8 a 9 %
Choi and Orchard [108]	1997	Entalhe em V	$h = s = 730\ 1830\ \text{mm}$	6%
Bechert et al. [109]	2000	Entalhe Trapezoidal	$s^+ = 16, a = 45$	6,85%
Lee and Lee [43]	2001	Semicircular	$s^+ = 25.2$	Sem redução
Frohnapfel et al. [110]	2007	Entalhe Trapezoidal	$h = 150\ \text{mm}$ $s = 2h$	25%
Lee and Choi [111]	2008	Entalhe em V	$s^+ = 10.4$ $h = 178.6\ \text{mm}$ $s = 300\ \text{mm}$	4%

Tabela 2.5 - Estudos experimentais em canal de óleo em placas com diferentes tipos de *Riblets* [69].

Autores Originais	Ano	Tipo de Riblet	Dimensão dos <i>riblets</i>	Redução de Atrito aerodinâmico (%)
Bechert et al. [9]	1997	Riblet em Lâmina	$h = 0.5s$	9.9 %
Bechert et al. [109]	2000	Trapezoidal tridimensional	$s^+ = 16$ $h/s = 0.85$	7.3 %
Grüneberger and Hage [112]	2011	Entalhe tridimensional	$H^+ = 8.5$ $s^+ = 17$	7.6 %
Büttner and Schulz [112]	2011	Riblet em Lâmina	$s^+ = 20.5$	4.9 %

### 2.2.6 Estrutura dos *Riblets*

A pele de tubarão é composta por dentículos dérmicos grosseiros, assemelhando-se ao grão da folha de lixa com sulcos em formas de telhas como se pode observar na Figura 2.13.

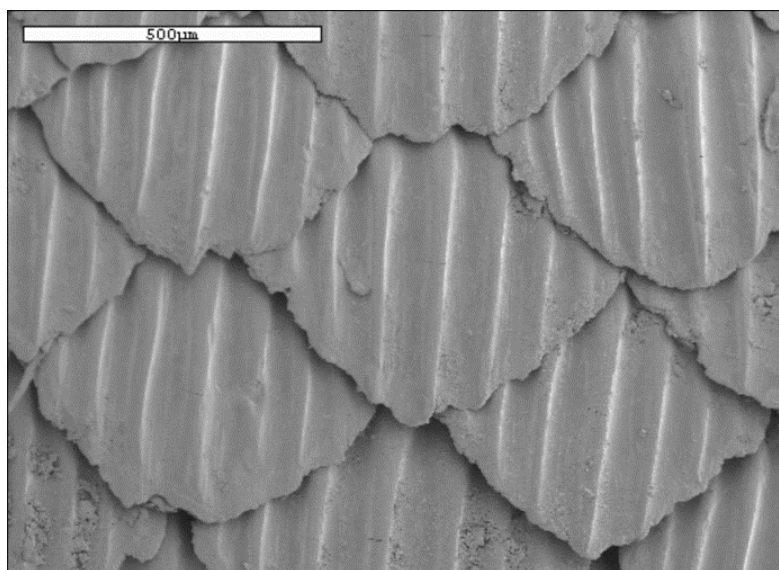


Figura 2.13 - Amostra de pele de tubarão.

Estas protuberâncias na pele de tubarão vão-se diferenciando ao longo do seu corpo, desde a cabeça até à cauda, auxiliando no movimento da propulsão do corpo enquanto nada, a Figura 2.14 representa as diferenças do grão da pele do tubarão entre diferentes espécies.

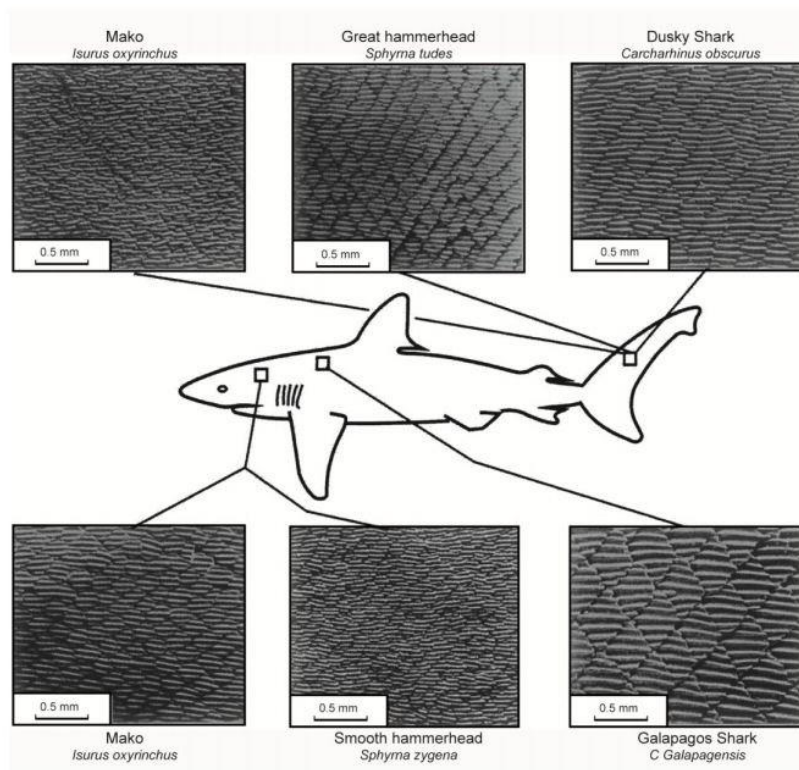


Figura 2.14 - Diferenças entre o grão da pele de tubarão dependendo da zona do corpo e da espécie (adaptado de [109]).

As aplicações desta maravilha biológica a superfícies rígidas requerem diversas modificações mas o conceito básico permanece. As protuberâncias servem para alterar a maneira como o vórtice é formado e distribuído, bem como o fluido atravessa a superfície. As diferenças de umas investigações para outras variam primeiramente com as dimensões (altura dos *Riblets*, espaçamento, ângulo de inclinação, periodicidade do espaçamento, etc.) para além das formas derivadas destas. Existe um número significativo de investigações experimentais e numéricas indicando que a altura e o espaçamento lateral das protuberâncias são determinísticas para o grau de redução de atrito aerodinâmico atingível.

Não existe uma linearidade no mecanismo de funcionamento dos *Riblets*, pois estes são dependentes de vários fatores que influenciam a sua performance, assim sendo, não é qualquer corpo nem em todos os tipos de escoamentos de fluidos que se verifica a eficácia dos *Riblets* na redução do atrito aerodinâmico, sendo assim muito minuciosa a forma como são projetados para alcançar o objetivo pretendido.

As estruturas atuam na zona da subcamada viscosa, onde as tensões de corte são bastante significantes. A literatura refere igualmente que as rugosidades completamente imersas na subcamada linear, não afetam significativamente o escoamento, pelo que este se comporta como se desenvolvesse ao longo de uma superfície lisa. Deste modo é possível definir um intervalo de operação assinalado a tracejado na Figura 2.15:

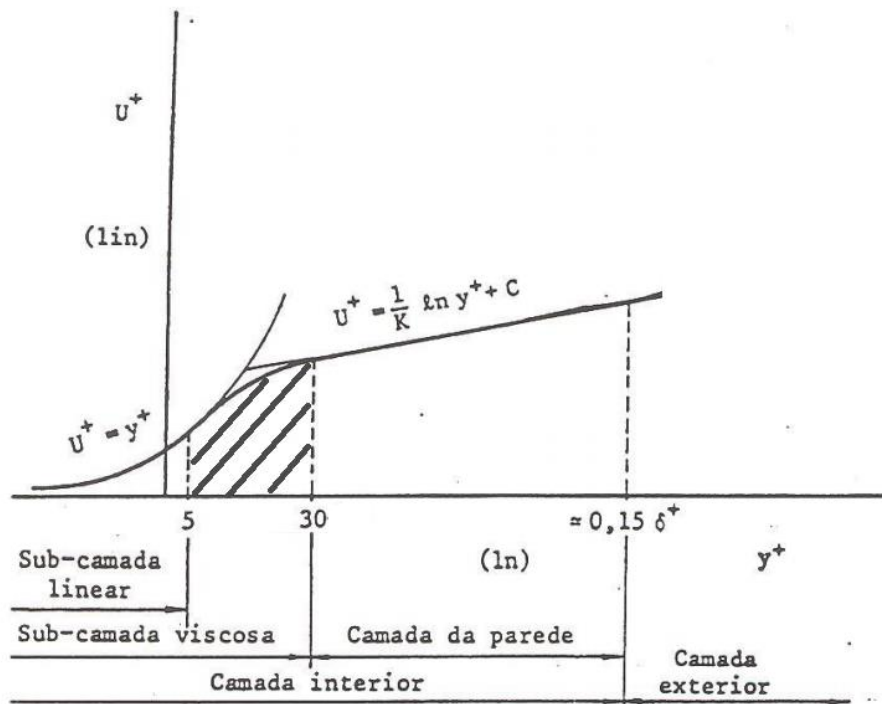


Figura 2.15 - Intervalo de projeto da altura de *Riblets* (adaptado de [113]).

A zona a tracejado corresponde à área onde os *Riblets* devem ser projetados para uma altura adimensional  $h^+$  de 5 a 30 unidades de parede [9].

$$5 < h^+ = \frac{hu_\tau}{\vartheta} < 30 \quad 2.36$$

Em que:  $h$  é a altura do topo do *Riblet*,  $\vartheta$  é a viscosidade dinâmica e  $u_\tau$  a velocidade de fricção.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad 2.37$$

Para que se garanta que o deslocamento dos vórtices acima dos *Riblets* não se instale nas concavidades projeta-se a largura entre *Riblets*,  $s$ , inferior ao diâmetro característico dos vórtices [9].

$$s^+ = \frac{s \cdot u_\tau}{\vartheta} < d^+ \sim 30 \quad 2.38$$

Após impostos as limitações geométricas quer para largura e a altura, têm de se obter uma relação  $h/s$  que proporcionem a melhor performance, estando relacionado com a altura de deslocamento e a área molhada como mostra a Figura 2.16 para três diferentes tipos de geometrias [9].

Existem vários *designs* para os *Riblets* mas os mais comuns são em “entalhe em V” (dentes de serra ou triangulares), em “forma de U” (parabólicos) e “protuberância em L” (retangular ou lâminas).

Como se apresenta na Figura 2.16, para cada uma das geometrias, está representada a diferença  $\Delta h_p / s$  entre a altura de deslocamento do escoamento longitudinal ( $h_{pl}$ ) e a altura de deslocamento do escoamento transversal ( $h_{pc}$ ) adimensionalizada pela largura do *Riblet* [9].

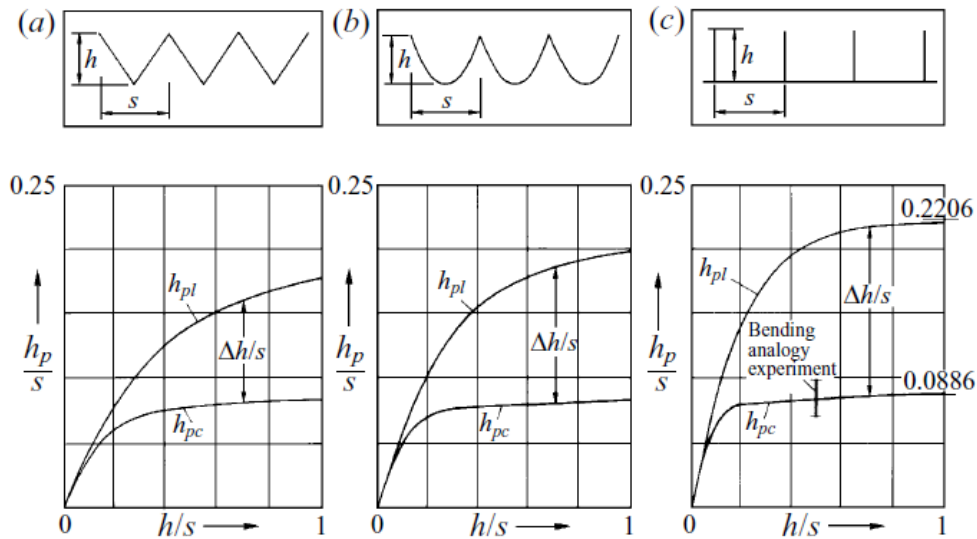


Figura 2.16 - Variação da altura efetiva da protrusão em escoamento no sentido da corrente e escoamento transversal para *Riblets*: a) triangulares, b) parabólicos, c) rectangulares (adaptado de [9]).

Na Figura 2.16 Dependendo de cada geometria das rugosidades pode observar-se que nas zonas dos gráficos onde  $\Delta h_p/s$  são máximos, , para o cálculo das rugosidades é feito conforme as seguintes equações:

$s^+$  - Espaçamento adimensional;

$h^+$  - altura adimensional;

$t^+$  - espessura adimensionalizada.

Estes parâmetros são definidos na equação onde  $\nu$  é a viscosidade e  $u_t$  é a velocidade de tensão na parede [9], [109] e [114].

A partir da energia cinética, a velocidade de tenção na parede pode ser calculada usando a equação onde  $\tau_w$  é a tensão de corte na parede:

$$s^+ = \frac{su_\tau}{\vartheta}, h^+ = \frac{hu_\tau}{\vartheta}, t^+ = \frac{tu_\tau}{\vartheta} \quad 2.39$$

O coeficiente de tensão de corte superficial ( $C_f$ ) pode ser descrito pelo coeficiente de atrito superficial exato (laminar, exata de Blasius):

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad 2.40$$

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho U^2} \quad 2.41$$

Combinando as equações 2.39 e 2.41, é resolvida a equação resultante para os parâmetros adimensionais dos *Riblets* provenientes da equação 2.42 [94] e [78]. Disto resulta o valor de  $C_f$  e a equação 2.42 para adimensionalizar os parâmetros (espaçamento -  $s^+$ , altura -  $h^+$  e espessura -  $t^+$ ).

$$s^+ = \frac{s \cdot u_\tau}{\vartheta} < d^+ \sim 30 \quad 2.42$$

$$s^+ = \sqrt{\frac{C_f sU}{2 \vartheta}}, \quad h^+ = \sqrt{\frac{C_f hU}{2 \vartheta}}, \quad t^+ = \sqrt{\frac{C_f tU}{2 \vartheta}} \quad 2.43$$

### 2.2.7 Construção de Superfícies com *Riblets*

Os *Riblets* usados na indústria necessitam de ter dimensões inferiores a 1 mm. Em diversos estudos recolhidos da literatura, investigadores têm utilizado a fresagem tradicional ou métodos de moldagem para produção das micro estruturas, em vez de técnicas de micro fabricação. As pequenas dimensões características dos *Riblets* fazem com que a sua construção seja desafiante. Por outro lado, devem ser feitas considerações muito assertivas durante o conceber do design e a respetiva construção. Diferentes métodos como corte a laser [115], EDM [116], micro desbaste e micro esmeriladoras [117], têm vindo a implementadas para obter estruturas de *Riblets* com dimensões de 20  $\mu\text{m}$ . Estes processos são também aplicados em micromaquinação [118].

Em 2007, Klocke e Feldhaus desenvolveram um processo de produção industrial de *Riblets* utilizando para o efeito um rolo, ver Figura 2.17. Esta investigação provou ser possível a produção de estruturas desta natureza em materiais como Ti-6Al-4V [119].

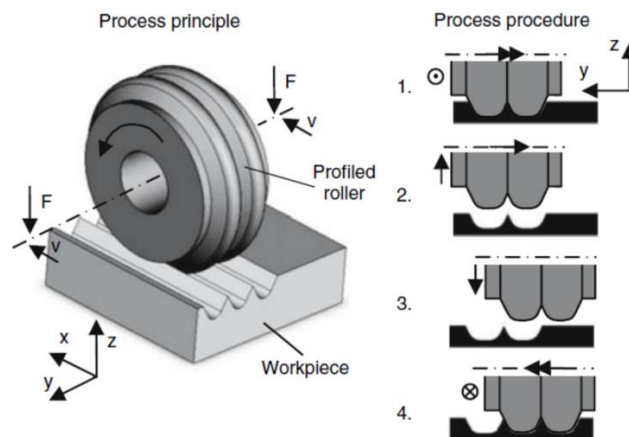


Figura 2.17 - Processo de produção de estruturas de *Riblets* utilizando um rolo [119].

Lee e Jang [67] construíram *Riblets* de acordo com o processo descrito por Han et al. [120]. Para isso utilizaram uma técnica de ataque químico anisotrópico, tendo produzido nervuras em V.

Num outro processo em que foram utilizadas tintas, obtiveram-se espaçamentos entre *Riblets* de  $s = 0.15 \text{ mm}$ , como está visível na Figura 2.18.

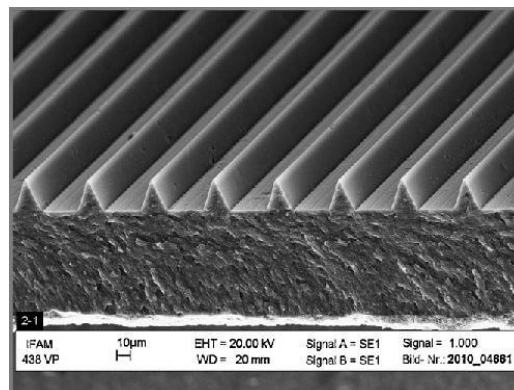


Figura 2.18 - Exemplo de tintas para redução de atrito aerodinâmico com  $s=15$  [121].

Esta técnica de pintura que foi desenvolvida pelo instituto *Fraunhofer* derivou da pesquisa em Manufatura Tecnologia e Aplicação de Materiais (IFAM), decorrida em Bremen, Alemanha. Foram produzidos *Riblets* numa placa de alumínio para testes experimentais em canal de óleo. O material da tinta consiste em dois componentes de poliuretano com uma resina que cura à luz UV. A técnica de aplicação desta tinta tem uma grande vantagem, devido às propriedades da faixa de silicone e dos rolos que aplicam a tinta, que sendo flexíveis permitem

a aplicação em superfícies irregulares. Na Figura 2.19 apresenta-se o esquema de aplicação da pintura.

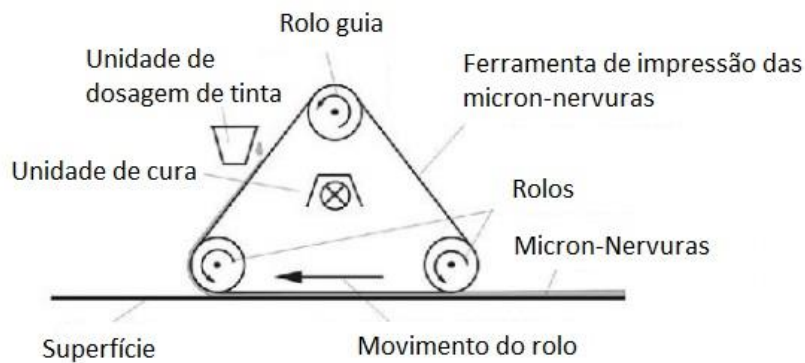


Figura 2.19 - Esquema de aplicação da pintura [121].

Em 2012, Similarly Zhaoa et al. replicaram a pele de tubarão usando um método de molde por vácuo. Para isso, utilizaram como molde a própria pele de tubarão e resina de poliéster em multicamadas de fibra de vidro. Na Figura 2.20 encontra-se a sequência de passos seguidos para a produção do molde.

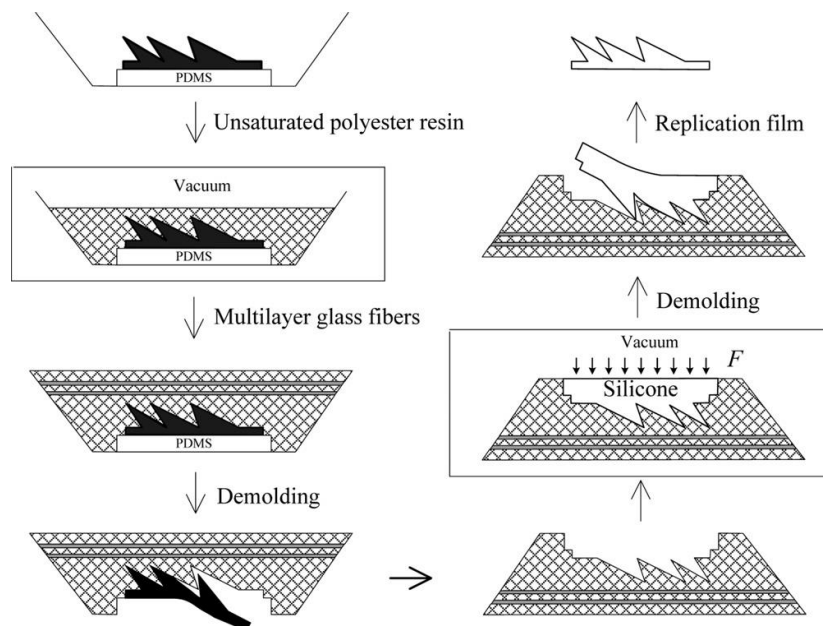


Figura 2.20 - Sequência de produção de réplicas de micro-Riblets [122].

# 3 Modelação Computacional

Dada a sua natureza aleatória, torna-se por vezes impossível caracterizar analiticamente o escoamento. Para tentar contornar esta dificuldade são realizadas aproximações do fenómeno, sendo estas obtidas através de resoluções numéricas cujo refinamento se encontra dependente dos requisitos computacionais.

Para o cálculo numérico dos escoamentos turbulentos são usados modelos de turbulência baseados em métodos como LES (*Large Eddy Simulation*) e RaNS (*Reynolds averaged Navier-Stokes*), uma vez que se tornam mais simples em comparação com as equações governativas baseadas em métodos de simulação direta (DNS) [123].

À semelhança da maioria das simulações de escoamentos turbulentos, pode-se classificar a simulação CFD sobre *Riblets* em três grupos:

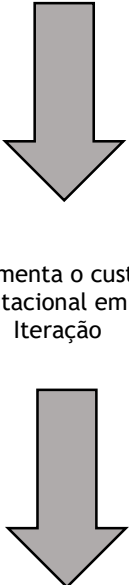
*Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) - Este método resolve as equações através das equações de transporte de Reynolds, em conjunto com uma equação para taxa de dissipação. Uma equação de transporte contém termos que representem o transporte advectivo da entidade através do escoamento médio, representem o transporte difusivo pelo movimento turbulento, permitam reproduzir a geração de turbulência devido aos gradientes de velocidade média (tensão de corte) ou de densidade e representem a dissipação (destruição) da entidade turbulenta nas pequenas escalas [124].

*Large Eddy Simulation* (LES) - Este método resolve as grandes escalas de turbulência (grandes vórtices) com alta precisão, aproximando depois os efeitos das pequenas escalas de forma fidedigna, permitindo uma minimização do custo computacional [123].

*Direct Numerical Simulation* (DNS) - Resolve diretamente as equações de Navier-Stokes. É uma ferramenta bastante poderosa que permite resolver todas as flutuações no escoamento, no entanto é um método que requer um enorme esforço computacional impedindo que este seja realizado em qualquer computador [123].

Na Tabela 3.1 Modelos de turbulencia disponíveis no Ansys Fluent é demonstrada a exigência computacional de cada um dos métodos numéricos referidos.

Tabela 3.1 Modelos de turbulencia disponíveis no Ansys Fluent

Modelo de uma equação	Spalart-Allmaras	 <p>Aumenta o custo computacional em cada iteração</p>
Modelo de duas equações	Standard k- $\epsilon$	
	RNG k- $\epsilon$ Realizable k- $\epsilon$	
	Standard k- $\omega$ SST k- $\omega$	
Modelo de 4 equações	Reynolds Stress Model k-kl- $\omega$ Transition Model SST Transition Model	
LES	Detached Eddy Simulation Large Eddy Simulation	
DNS	Direct Numerical Simulation	

### 3.1 Método dos volumes finitos

No método dos volumes finitos o domínio é dividido num número de volumes de controlo, ou células, onde a variável em estudo está localizada no centróide do volume de controlo. Posteriormente, as equações governativas são integradas na forma diferencial ao longo de cada volume de controlo recorrendo para o efeito ao Teorema de Gauss. Desta forma na equação resultante as derivadas e os fluxos são determinados segundo formas de interpolação assumidas, resultando numa equação que envolve as variáveis nos centróides das células. Designa-se esta equação, da discretização, expressando lei governativa para a variável dentro do volume de controlo.

### 3.2 Equações de Navier-Stokes

As equações que governam o movimento de um fluido viscoso turbulento são as equações de Navier-Stokes. Estas equações representam as leis de conservação de massa, da

quantidade de movimento linear, da quantidade de movimento angular e da energia, e as leis de propriedade de um fluido newtoniano.

### 3.2.1 Equações de conservação de massa

A equação da continuidade é a forma matemática da conservação da massa, aplicada a uma partícula de fluido num escoamento, sendo descrita pela equação seguinte:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad 3.1$$

Em que:  $\rho$  é a massa volúmica e  $U$  a velocidade. Assim, expandindo e usando um sistema de coordenadas características, a equação vem:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 3.2$$

### 3.2.2 Equação da quantidade de movimento

A segunda lei de Newton, escrita para uma partícula de fluido (na forma diferencial), relaciona o conjunto de forças externas com as grandezas de massa e de aceleração do seu movimento. Ao substituir o tensor das tensões viscosas pela relação constitutiva entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos Newtonianos e isotrópicos (propriedades físicas independentes da direção considerada), a equação de Navier-Stokes para um fluido de viscosidade  $\mu$  pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad 3.3$$

Desenvolvendo a equação 3.3, obtém-se a equação segundo as três componentes:

Em  $x$ ,

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 3.4$$

Em  $y$ ,

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad 3.5$$

Em  $z$ ,

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad 3.6$$

Esta equação é válida em qualquer escoamento de fluido Newtoniano e traduz um balanço entre o produto da massa pela correspondente aceleração (ou seja, a taxa de variação da quantidade de movimento) e o conjunto das forças (gravíticas, de pressão e de atrito viscoso) a que a mesma se encontra sujeita.

### 3.3 Lei universal da parede

A presença de um contorno sólido (parede) afeta fortemente o escoamento turbulento. Nestas regiões (junto à parede) ocorre um decréscimo na transferência de quantidade de movimento entre as camadas do fluido, devido à ação das forças viscosas bem como flutuações da velocidade normal que são reduzidas através da ação das forças de inércia, levando assim à diminuição da escala de comprimento dos vórtices que inibem ou até suprimem a turbulência. Prandtl, observando que o comprimento de mistura diminuía à medida que a proximidade da parede aumentava, formulou a hipótese de que o comprimento de mistura nesta região é proporcional da distância à parede, como mostra a equação:

$$l_m = k \cdot y \quad 3.7$$

Onde  $y$  é a distância perpendicular à parede e  $k$  é a constante de von Karman, igual a 0.4. A equação 3.7 mostra que o tamanho característico dos vórtices tem um crescimento proporcional ao aumento da distância da parede tendendo para uma dimensão característica do escoamento ou para um valor limite até onde a parede deixa de ter qualquer influência sobre a turbulência local.

Na Figura 3.1 é apresentada a camada limite sobre uma placa plana, onde  $U_\infty$  é a velocidade da corrente livre e  $\delta$  é a dimensão característica do escoamento nesta região, que representa a camada limite que é composta por duas regiões. A primeira, que adere à parede é denominada de subcamada laminar, onde predominam os efeitos viscosos. A segunda (denominada subcamada turbulenta) estende-se até à fronteira da camada limite, predominando nesta os efeitos turbulentos [19].

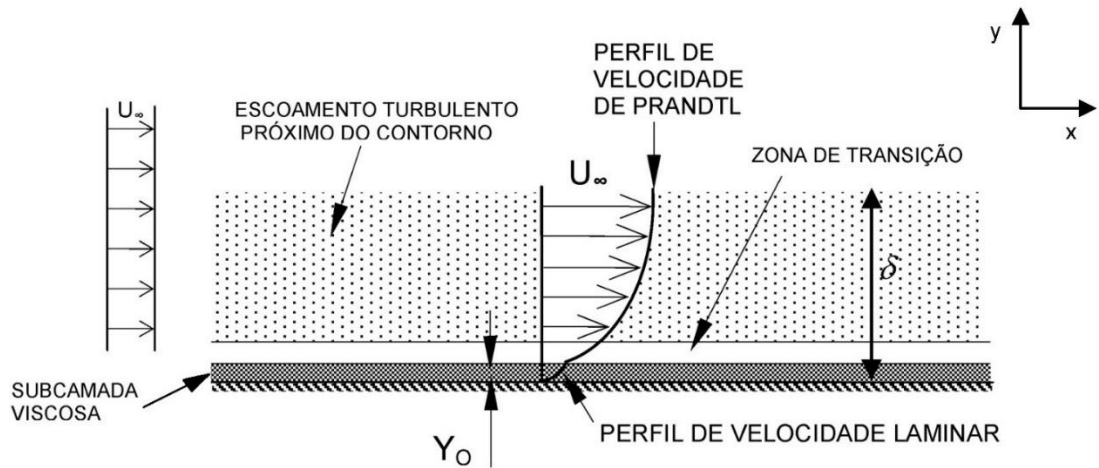


Figura 3.1 - Subcamadas laminar, turbulenta e zona de ajuste entre os perfis de velocidade (adaptado de [19]).

Como consequência de não escorregamento, o fluido é estacionário junto à parede sólida. De acordo com a lei da Viscosidade de Newton, a tensão de corte na parede  $\tau_w$  é expressa pela equação:

$$\tau_w = \rho \nu \frac{du}{dy} \quad 3.8$$

Visto que esta camada é muito fina, supõe-se que a tensão de corte permanece constante ao longo de toda a sua espessura ao integrar a equação 3.8 ao longo da espessura, resulta uma equação que governa a velocidade  $u$  na subcamada viscosa:

$$u = \frac{\tau_0}{\rho \nu} y \quad 3.9$$

Para obter esta equação linear foi considerada uma velocidade  $u$  nula em  $y = 0$  (condição de não escorregamento). Uma relação importante no estudo da camada limite é a chamada velocidade de atrito, expressa por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad 3.10$$

Dividindo a equação 3.10 por  $u_*$ , obtém-se uma relação adimensional para a velocidade e para a distância normal à parede:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{\sqrt{\tau_w/\rho}}{\vartheta} y \quad 3.11$$

Onde:

$$y^+ = \left(\sqrt{\tau_w/\rho/\nu}\right) y \equiv \frac{y \cdot u_*}{\vartheta} \quad 3.12$$

Estas equações definem, respetivamente, a velocidade e a distância em termos adimensionais.

Como podemos verificar na Figura 3.2, a camada mais interna onde os efeitos viscosos são dominantes é chamada de subcamada viscosa (*viscous* ou *wall sublayer*). O perfil de velocidades nesta camada é quase linear, verificando-se que da equação 3.12,  $u^+ \equiv y^+$ . Esta estende-se desde a superfície da parede até  $y^+ = 5$  [25]. Após a subcamada viscosa, encontra-se a camada de transição  $5 < y^+ < 30$ , na qual os efeitos turbulentos se tornam significativos. Porém, o escoamento é ainda dominado pelos efeitos viscosos. Nesta região, também caracterizada por ser considerada de ajuste entre os dois perfis, a tensão de corte  $\tau$  varia suavemente com a distância à parede, fazendo com que a forma do perfil de velocidade mude em relação àquele da subcamada viscosa. A camada externa (*outer* ou *turbulent layer*) é a parte restante do escoamento, na qual os efeitos de difusão molecular (efeitos viscosos) e a distância à parede tornam-se irrelevantes.

A equação do perfil de velocidade para a subcamada turbulenta é dada por:

$$\frac{u}{u^+} = \frac{1}{k} \ln y^+ + C \quad 3.13$$

Onde a constante de von Karman é  $k = 0,41$  e  $C = 5$  representa uma constante de integração, cujo valor é obtido experimentalmente [25]. Com estes valores a equação 3.13 pode ser transformada em:

$$\frac{u}{u^+} = 2.5 \ln \frac{u_* y}{\nu} + 5 \quad 3.14$$

As equações 3.11 e 3.14, as quais descrevem os dois perfis de velocidade nas regiões viscosas e turbulenta, respetivamente, são representadas na Figura 3.2. Para cada uma das zonas identificadas existem leis (de tipo semi empírico) que representam o escoamento médio com grande simplicidade e grau de precisão muito satisfatório. Estas leis, designadas por leis de parede, foram propostas com base em técnicas simples como a análise adimensional e ajustadas de modo a respeitar todo o conjunto de medições experimentais e modelos de turbulência.

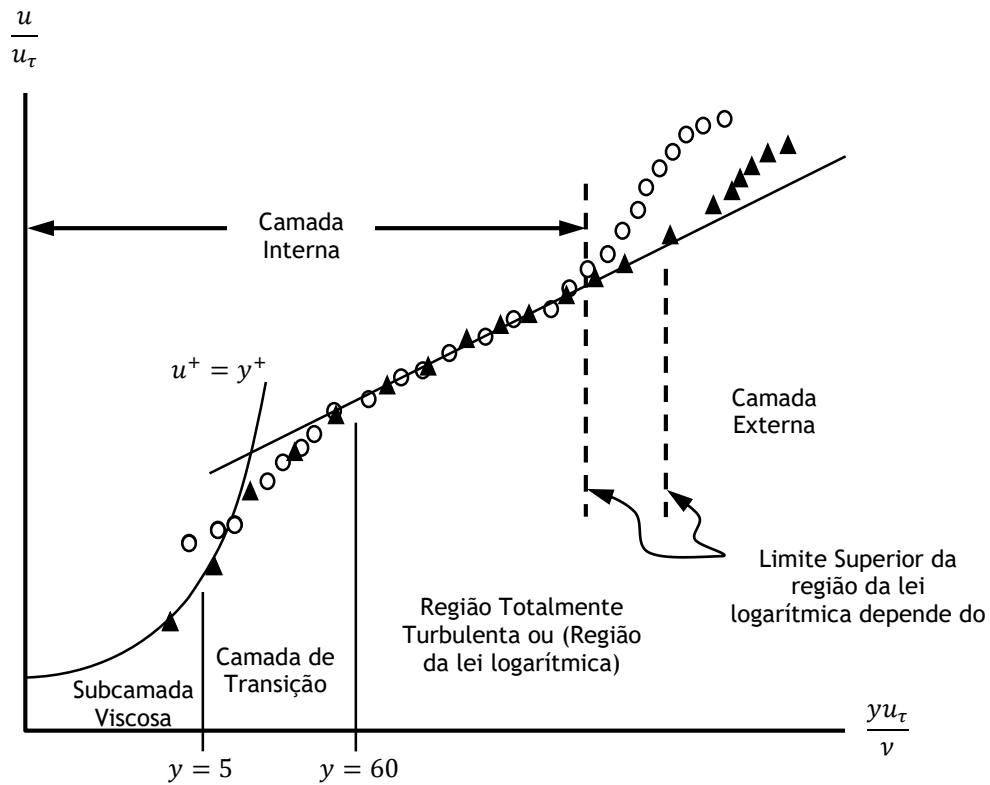


Figura 3.2 - Perfil de velocidade junto a uma superfície sólida (adaptado de [21]).

Onde:  $y$  é a distância normal à parede;  $y^+$  e  $u^+$  as equações que definem a distância e a velocidade adimensionais, respetivamente:

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad 3.15$$

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad 3.16$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}} \quad 3.17$$

A distância à parede é o meio de caracterizar a divisão da região de escoamento turbulento sobre uma placa plana. Através da análise desta é possível classificar o escoamento em quatro zonas distintas: subcamada viscosa; camada de mistura; camada de transição (ou subcamada inercial) e a camada externa. De modo a utilizar este modelo eficientemente é necessário adotar uma malha adequada a número de Reynolds baixos que garanta a distância adimensional entre a parede e o primeiro nó, ou seja que  $y^+ \leq 1$  para garantir que a solução seja validada [123].

### 3.4 Modelo de Turbulência

Neste trabalho foi escolhido de entre todos os modelos disponíveis no *software ANSYS Fluent*, o modelo de turbulência *k- $\omega$  SST*. Este modelo de turbulência é uma junção da formulação declaradamente robusta e precisa do modelo *Standard k- $\omega$* , na zona junto à parede, e do modelo *Standard k- $\epsilon$*  na zona mais afastada da parede onde este apresenta melhor comportamento. O modelo *k- $\omega$  SST* é, segundo alguns autores, mais preciso e fiável. Isto para uma classe de escoamentos mais vasta do que o *Standard k- $\omega$* , incluindo escoamentos com gradientes de pressão adversos [123].

No modelo de turbulência *k- $\omega$  SST*, a equação de transporte modelam para *k* idêntica à do modelo *Standard k- $\omega$* , contudo a equação de transporte para  $\omega$  difere ligeiramente pela inclusão de um termo de difusão cruzada [21].

Foi escolhido este modelo porque geralmente apresenta previsões exata do início e do tamanho de separação sob gradiente de pressão adverso e como explicita a Tabela 3.1 este modelo de turbulência não é tão exigente computacionalmente como por exemplo o modelo de turbulência Reynolds Stress Model (RSM) [21].

Utilizando uma função de mistura de transição gradual do modelo K- $\omega$  padrão perto da parede, para o modelo K- $\epsilon$  na parte exterior da camada limite, (*Blended law of the wall*) como mostra a Figura 3.3. Contém uma formulação de viscosidade turbulenta modificada para contabilizar os efeitos de transporte da tensão de corte turbulenta. [21]

As equações resultantes da equação da mistura é apresentada de seguida:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad 3.18$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\vartheta_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad 3.19$$

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2, \quad \phi = \beta, \sigma_k, \sigma_\omega, \gamma \quad 3.20$$

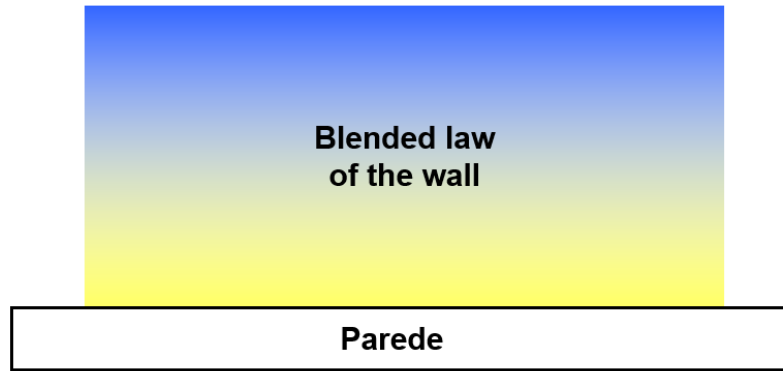


Figura 3.3 - Lei da mistura do modelo de turbulência modelo K- $\omega$  SST ( adaptado de [21])

As constantes utilizadas por defeito nas equações que governam o modelo K- $\omega$  SST estão presentes na tabela abaixo

Tabela 3.2 - Constantes do modelo k-  $\omega$  SST

$\alpha_\infty^*$	$\alpha_\infty$	$\beta_\infty^*$	$\zeta^*$	$M_{t0}$	$a_1$	$\beta_\infty^{in}$	$\beta_\infty^{out}$	$t_{ke}^{in}$	$t_{ke}^{out}$	$SDR^{in}$	$SDR^{out}$
1	0.52	0.09	1.5	0.25	0.31	0.075	0.0828	1.176	1	2	1.168

### 3.5 Domínio de Cálculo

O volume de controlo foi realizado através do software SolidWorks, sendo igual à estrutura que foi utilizada para a geometria dos *Riblets* estudados como para a placa de plana que serviu de referência. O volume de controlo apresenta-se na Figura 3.4 sendo constituído por:

- Uma parede formada por 2 *Riblets*
- Uma fronteira do lado oposto aos *Riblets*
- Duas fronteiras laterais
- Uma fronteira no topo da geometria

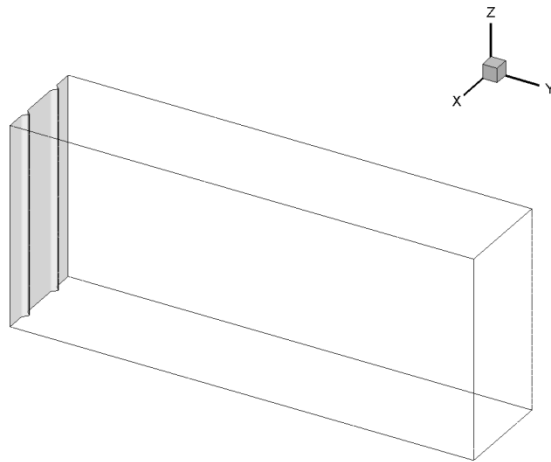


Figura 3.4 Volume de Controlo

As dimensões do volume de controlo estão presentes na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dimensões do volume de controlo

x	y	z
[m]	[m]	[m]
0.01	0.046	0.517

### 3.6 Condições de Fronteira

As condições de fronteira são associadas ao volume de controle, assim a parede (*wall*) no domínio onde se encontram as *riblets*, ou no caso de referência, a placa plana, os domínios laterais tem condições de simetria (*symmetry*) a entrada e o topo são entradas de velocidade (*velocity inlet*) que estão orientadas segundo o eixo *z* em sentido negativo, por fim fronteira da saída do escoamento (*outflow*).

As propriedades e as condições de entrada do escoamento que foram utilizados na simulação computacional estão descritos nas tabelas Tabela 3.4 e na Tabela 3.5 respectivamente.

Tabela 3.4 - Propriedades do fluido.

Fluido	Ar
Densidade	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura	288,16 K
Viscosidade Dinâmica	1,7894 E-5 Kg/m.s
Razão dos Calores específicos	1,4

Tabela 3.5 Condições de entrada

Velocidade, <i>U</i>	[m/s]	[km/h]
1	40,11	144,396
2	80,22	288,792
3	160,44	577,584

#### 3.6.1 Geometria dos *Riblets* estudados

A geometria estudada foi escolhida de acordo com o gráfico representado na Figura 3.5. Como se pode observar as geometrias que maior redução de arrasto apresentam são as geometrias em forma de lâmina, que chegam perto dos 10 % na redução de arrasto, e por isso deveria ser esta a escolhida para que o desempenho em termos de redução de arrasto fosse máximo. No entanto esta geometria apresenta um problema de na sua constituição, são mais frágeis do ponto de vista físico, e como o intuito é de aplicar estas geometrias a uma ambiente sujeito a erosão e desgaste, estas devem ter em conta esse requisito, assim se escolheu uma geometria trapezoidal com inclinação de 45° sendo esta a que apresenta a melhor relação redução de atrito/robustez. Para produzir esta geometria foi utilizado o programa SolidWorks version 2012.

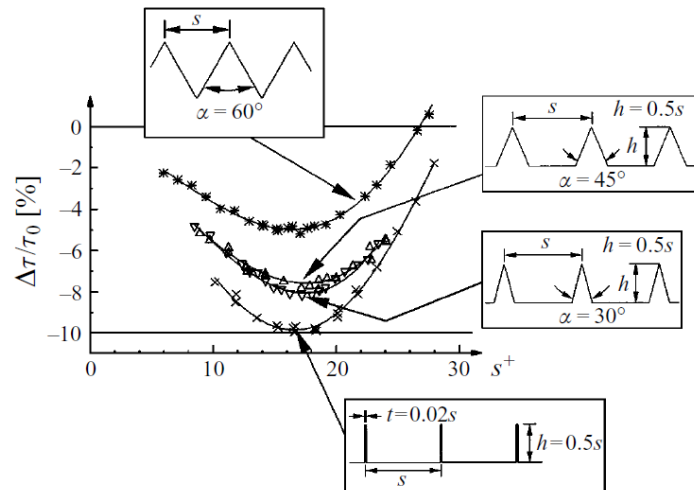


Figura 3.5 - *Riblets* trapezoidais em comparação com outras geometrias

Sendo que as condições na entrada do volume do controlo são especificadas na referir que a velocidade de entrada uma vez que faz-se variar a velocidade de entrada de modo a obter diferentes valores de necessários para construir a curva de desempenho da redução do arrasto de fricção no escoamento em *riblets*.

### 3.7 Malha

A malha foi criada no programa computacional PointWise V17.1 R3 com o intuito de criar uma estrutura adequada ao cálculo computacional no software ANSYS Fluent.

Como mostra a Figura 3.6 a malha foi criada através de blocos, este método foi adotado devido à gestão de memória RAM que o computador tinha disponível. Assim um bloco, junto à parede de menor dimensão, mas com um número elevado de pontos para acompanhar as linhas dos *Riblets*, como mostra a Figura 3.7 e garantir um número de pontos suficientes para que o valor de  $y^+$  seja o mais próximo de 1 para assim garantir a validade do caso.

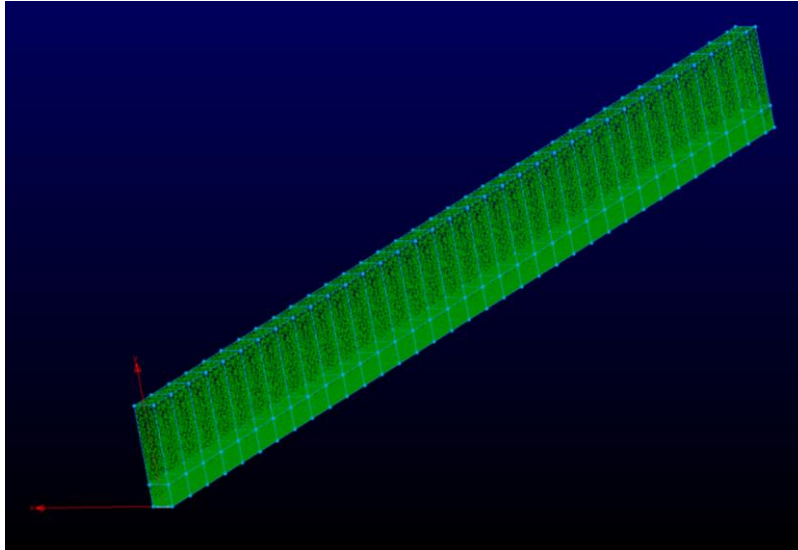


Figura 3.6 - Malha constituída por blocos.

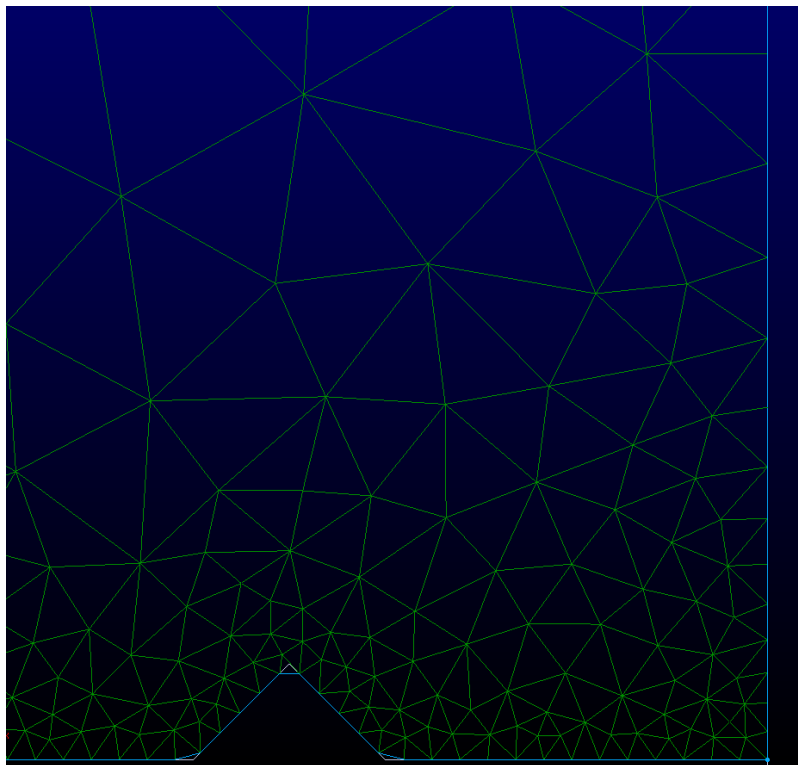


Figura 3.7 - Detalhe da malha não estruturada junto aos *Riblets*.

Para além disso esta malha é híbrida, ou seja é constituída por malhas não estruturadas, e estruturadas. No caso dos domínios constituídas por não estruturadas, as células podem ser melhor aproximadas no caso junto à parede onde o cálculo tem de ser mais preciso, ou pelo

contrário as células melhor adaptam-se quando a malha é mais grosseira a Figura 3.7 demonstra este fenómeno com bastante intuição.

As malhas estruturadas estão presentes nas fronteiras de parede (wall), como se pode ver nas Figura 3.8 e em detalhe na Figura 3.9 esta estratégia serve para dar um maior rigor, pois assim as células mantêm melhor o rácio do domínio desta zona, e tornando-o mais fiável o cálculo computacional, visto que esta zona é a mais importante de estudar.

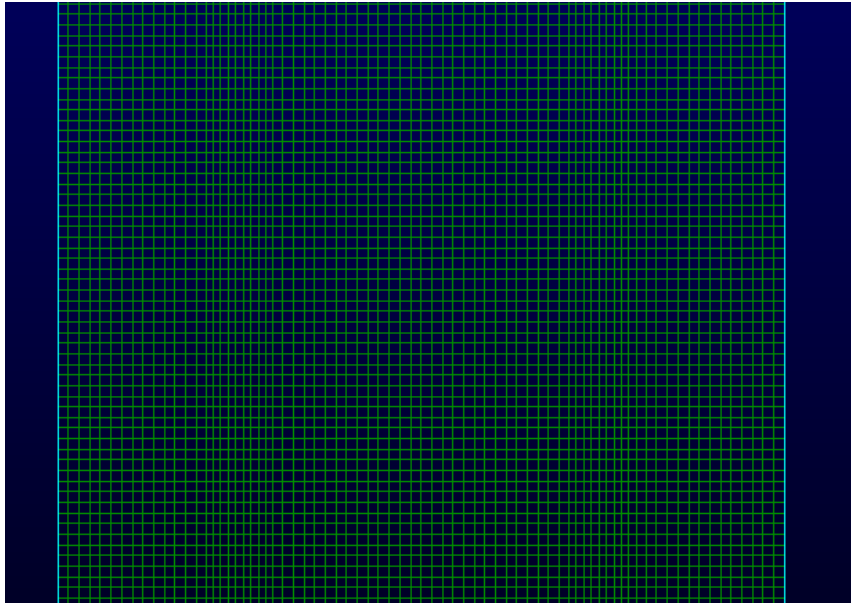


Figura 3.8 - Malha estruturada na parede

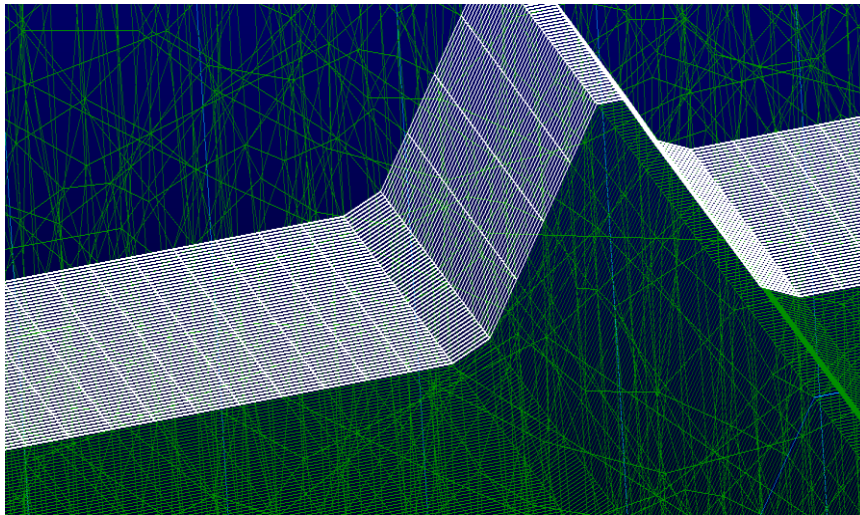


Figura 3.9 - Detalhe de malha estruturada a acompanhar os *Riblets*.

## 4 Resultados numéricos

A modelação foi realizada para averiguar a redução do atrito aerodinâmico causada pelos *Riblets*, com o intuito de descobrir qual o efeito que estes causam no escoamento sendo os *Riblets* simulados utilizando a modelação numérica baseada no método dos volumes finitos, no sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z).

A da ferramenta computacional ANSYS Fluent versão 14 foi utilizada como CFD Solver para as simulações computacionais, tendo sido desenvolvido um modelo numérico tridimensional.

A simulação numérica consistiu na criação da geometria, especificação da região, geração da malha, criação dos domínios, atribuição das condições fronteira e soluções para as equações correspondentes ao modelo (SST k- $\omega$ ).

O ar foi utilizado como fluido de trabalho, tendo o comportamento deste definido como um fluido Newtoniano, assim como incompressível e o escoamento está em regime turbulento.

A Figura 4.1 mostra que o escoamento está bem colocado no domínio de cálculo, o posicionamento dos vetores indicam que o escoamento é axial à superfície e não sofreu nenhuma perturbação nem mudança de direção. No plano criado na simetria do domínio de cálculo pode-se dizer que o escoamento não está completamente desenvolvido, o que pode ser prejudicial para a previsão dos resultados.

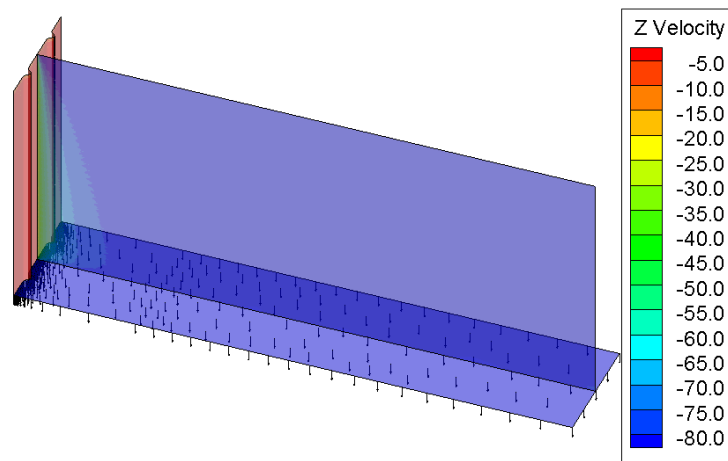


Figura 4.1 - Visualização do campo de velocidade axial na parede nervurada, na saída e num plano a meio do domínio de cálculo. Resultados para um escoamento de aproximação de 80.22 m/s. As velocidades estão impostas segundo a direção negativa ao eixo dos Zs.

Os valores de  $y^+$  apresentados na escala de valores da Figura 4.2 mostra que o seu valor encontra-se perto de 3, e sendo ainda menor nas zonas dos *Riblets* do que nas zonas das placas onde estas são lisas. Apesar de o escoamento não estar completamente desenvolvido os valores de  $y^+$  são uniformes no resto da placa que é um aspeto positivo para a validade dos resultados.

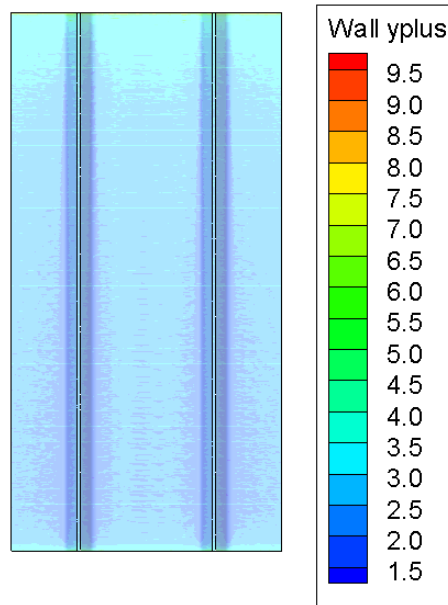


Figura 4.2 Representação do  $y^+$  junto da parede nervurada. Resultado obtido para uma velocidade de escoamento imposto de 80.22 m/s

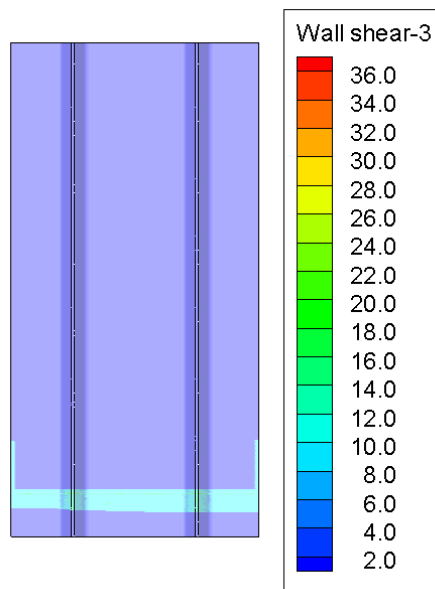


Figura 4.3 Distribuição da tensão de parede ao longo da placa nervurada. Resultado obtido para uma velocidade de escoamento imposto de 80.22 m/s

A Figura 4.3 mostra que na zona dos *Riblets* a tensão de corte na parede,  $\tau_w$ , é mais baixo que na zona junto à placa, o que justifica que numa placa totalmente plana o somatório da tensão de corte na parede na direção do eixo z,  $\tau_{wz}$ , é maior que numa placa com *Riblets*.

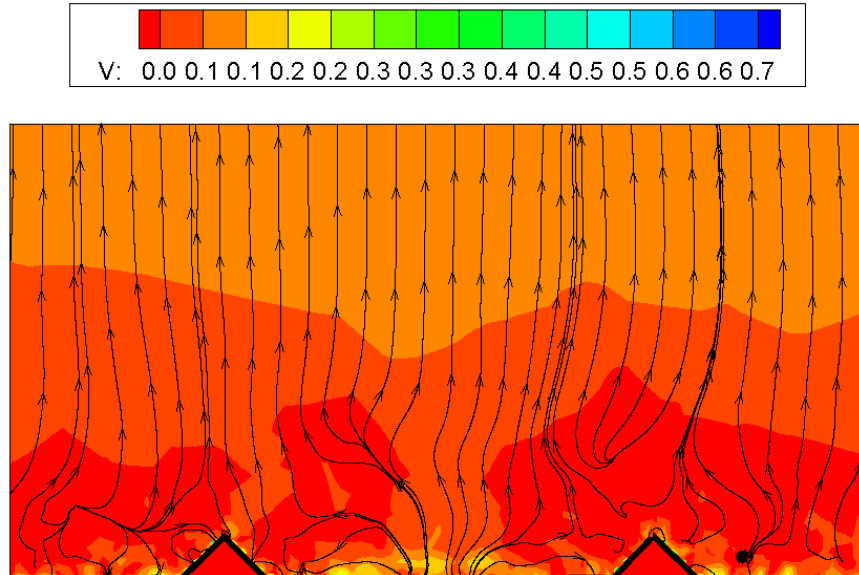


Figura 4.4 - Visualização das linhas de corrente e velocidade média num plano transversal a meio do comprimento da placa nervurada.

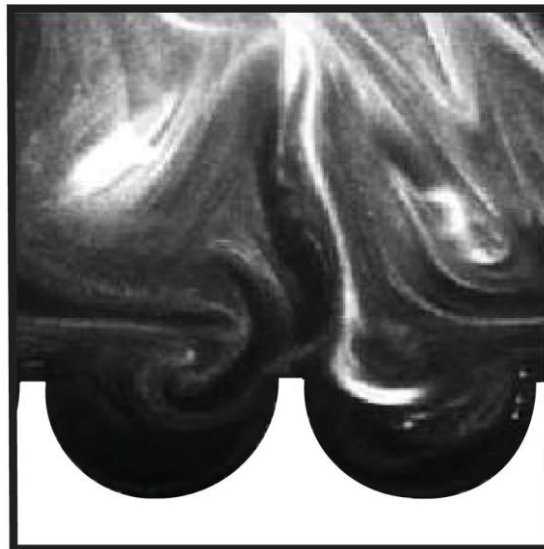


Figura 4.5 - Imagem de escoamento sobre *Riblet* demonstrando o efeito de redução de Atrito aerodinâmico causado por *Riblets* (adaptado de [43])

Ao comparar as Figura 4.4 e Figura 4.5 observam-se semelhanças entre os escoamentos. A simulação computacional consegue captar e prever o que sucedeu na zona junto aos *Riblets*

tal como é apresentada na Figura 4.5 que representa um caso experimental. Pode-se afirmar assim que o método numérico conseguiu prever os efeitos causados pelos *Riblets*, ou seja, verifica-se o surgimento de vórtices ao longo do escoamento (Streamwise vorticity) que sendo perpendiculares ao escoamento diminuem o atrito aerodinâmico.

A tabela abaixo é referente aos resultados obtidos das forças viscosas totais das placas com *Riblets* (placa nervurada) e na placa lisa em função das velocidades.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos numericamente para a força de resistência viscosa total na placa nervurada, na direção do escoamento.

Velocidade m/s	Força viscosa (nervurada)	Força viscosa (plana)
40.11	0.010252179	0.0159258
80.22	0.064277499	0.124968
160.44	0.37470164	0.4556861

A Figura 4.6 apresenta os resultados em forma de gráfico de modo a ter-se uma melhor percepção dos resultados.

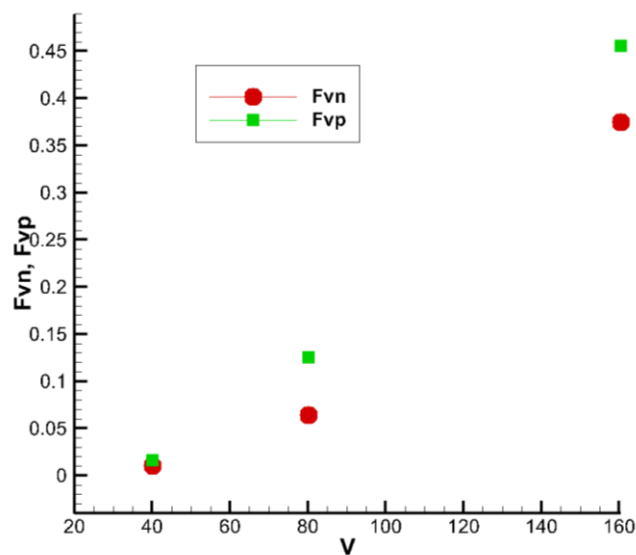


Figura 4.6 - Apresentação gráfica da evolução da força de resistência viscosa total em função das diferentes velocidades. As condições do escoamento são  $Re=2.8 \times 10^6$ , com base no comprimento da placa.

Tabela 4.2 - Redução de arrasto comparativamente com os valores de placa plana

Velocidade em Km/h	Velocidade m/s	Cálculo de redução de atrito aerodinâmico %
144,396	40,11	-35,62534378
288,792	80,22	-48,5648334
577,584	160,44	-17,77198383

Nesta tabela acima estão apresentados percentualmente a redução de atrito aerodinâmico em comparação com a placa lisa de referência e em função das três diferentes velocidades simuladas numericamente.



# 5 Conclusão

Este trabalho permitiu investigar áreas além da engenharia clássica, pois para o estudo de bio mimetismo foram revistos alguns conceitos de áreas tão diversas como a biologia, ecologia, desporto e *design*. Na formação académica de hoje em dia deve ser multifacetado, não fosse este um trabalho universitário que tem como grande vantagem a oportunidade de fácil acesso a várias fontes de conhecimento, enriquecendo assim a formação pessoal e profissional da comunidade académica.

Assumindo a variedade de áreas e tecnologias onde os *Riblets* são utilizados, verificou-se que estes apresentam imensas aplicações desde as áreas da medicina passando pela ecologia e desporto, e claro está transportes e energia. Para além de efeitos na aerodinâmica, os *Riblets* também tem outras propriedades que podem ser vantajosas para as áreas anteriormente referidas.

Com a análise dos métodos de redução de atrito aerodinâmico causado pelos *Riblets* verificou-se que este método é eficaz, embora a sua técnica e domínio sejam ainda bastante difíceis de manipular. Prova disso, é a falta de um consenso quanto ao funcionamento destes mecanismos, havendo mesmo grupos de investigadores que divergem quanto à explicação deste fenómeno.

Este assunto já não é recente, pois na década de 80 já havia muito trabalho e investigação sobre a redução de atrito aerodinâmico sobre *Riblets*. Hoje em dia há um revivalismo deste assunto muito devido às preocupações ambientais e económicas, que estão intimamente ligados à poupança de recursos. Aleado a estas preocupações, a tecnologia sofreu avanços colossais e hoje é mais simples protótipo e construir as micro-nervuras que são constituintes do *Riblets*.

## 5.1 Conclusões da simulação numérica

Os resultados obtidos permitem concluir que a geometria estudada neste trabalho é capaz de reduzir o atrito aerodinâmico em automóveis. À velocidade de 144 km/h, há uma redução de 35,6%.

Para velocidades superiores também se verifica uma redução de atrito aerodinâmico, sendo mínimo para uma velocidade de 288 km/h, onde a redução atinge os 48%. Aos 577 km/h a redução é de 17,7 %, contudo estas reduções ocorrem em velocidades que saem fora da gama de velocidades da indústria automóvel.

Pode-se afirmar no entanto que esta tecnologia tem vantagens do ponto de vista energético. Mesmo em velocidades mais reduzidas a diminuição do atrito aerodinâmico, ainda que menor, terá uma consequência direta na redução do consumo energético dos veículos.

Embora o estudo computacional não tenha sido muito exaustivo, nem mesmo tenha havido uma validação para as simulações numéricas, é denotar que os resultados, os aspetos do escoamento e os fenómenos físicos obtidos, têm correspondência e semelhança com literatura. Sente-se algumas lacunas nesta parte do trabalho muito devido às limitações computacionais, pois os modelos de estudo de *Riblets* necessitam de uma grande capacidade de processamento exigindo utilização de uma grande parcela de memória RAM, devido à complexidade da sua malha para a simulação numérica.

Mesmo assim estes tipos de trabalhos são úteis para o desenvolvimento tecnológico e da ciência. Considerando que se pode ultrapassar as dificuldades acima referidas com equipamentos com maiores capacidades.

# Bibliografia

- [1] United Nations, “Kyoto protocol to the united Nations Framework,” Kioto, 1998.
- [2] European Commission, “European Commission, Climate Action,” European Commission, 2012. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm). [Acedido em 12 3 2014].
- [3] D. Bechert e G. Hoppe, “On the drag reduction of the shark skin,” em *AIAA Shear Flow Control Conference*, Boulder, Colorado, 1985.
- [4] C. Darwin, A origem das espécies, Ruas das Caramelitas- Porto: Lello & Irmão- Editores.
- [5] National Geographic News, “<http://news.nationalgeographic.com/>,” 14 01 2009. [Online]. Available: <http://news.nationalgeographic.com/news/2009/01/090114-oldest-shark-braincase.html>. [Acedido em 29 06 2015].
- [6] N. Geographic, “<http://news.nationalgeographic.com/>,” 17 4 2014. [Online]. Available: <http://news.nationalgeographic.com/news/2014/04/140416-early-shark-fossil-jaws-ocean-paleontology-science/>. [Acedido em 29 06 2015].
- [7] R. W. Fox, P. J. Pritchard e A. T. McDonald, Introdução à mecânica dos fluidos - 7ª edição, Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 2010.
- [8] Y. D. Silva, “Natural History Museum,” 15 08 2008. [Online]. Available: <http://www.nhm.ac.uk/about-us/news/2008/august/olympic-swimsuit-mimics-shark-skin18219.html>. [Acedido em 20 06 2015].
- [9] D. W. BECHERT, M. BRUSE, W. HAGE, J. G. T. V. D. HOEVEN e G. HOPPE, “Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 338, pp. 59- 87, 1997.
- [10] The Effect of Shark Skin Inspired Riblet Geometries on Drag in Rectangular Duct Flow.
- [11] M. Lee, “Shark Skin: Taking a Bite Out of Bacteria,” in *Remarkable Natural Material Surfaces and Their Engineering Potential*, Switzerland, Springer International Publishing, 2014.
- [12] SCIENCE IN THE NEWS, “[ww.scienceinthenews.org.uk](http://www.scienceinthenews.org.uk/),” [Online]. Available: <http://www.scienceinthenews.org.uk/contents/?article=8>. [Acedido em 22 06 2015].
- [13] TIME, “<http://content.time.com/>,” time.com, 2008. [Online]. Available: [http://content.time.com/time/specials/packages/article/0,28804,1852747\\_1854195\\_1854154,00.html](http://content.time.com/time/specials/packages/article/0,28804,1852747_1854195_1854154,00.html). [Acedido em 22 06 2015].
- [14] AIRBUS, “<http://www.airbus.com/>,” AIRBUS NEWS & EVENTS, 1981. [Online]. Available: <http://www.airbus.com/newsevents/news-events-single/detail/riblets-to-be-evaluated-on-the-a310/>. [Acedido em 22 06 2015].

- [15] J. Palma Ferreira, “<http://expresso.sapo.pt/economia/2015-06-21-Primeiro-aviao-novo-da-TAP-e-um-A330-e-chega-em-2017>,” *Expresso*, 21 junho 2015. [Online]. Available: <http://expresso.sapo.pt/economia/2015-06-21-Primeiro-aviao-novo-da-TAP-e-um-A330-e-chega-em-2017>. [Acedido em 21/06/2015 junho 2015].
- [16] B. Miracle, “floridatrend.com,” 01 10 2008. [Online]. Available: <http://www.floridatrend.com/article/6817/sharkskin-technology-inhibits-germ-growth?page=2>. [Acedido em 20 06 2015].
- [17] K. A. Dafforn, J. A. Lewis e E. L. Johnston, “Antifouling strategies: History and regulation, ecological impacts and mitigation,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, n° 3, pp. 463-465, 03 2011.
- [18] C. M. Magin, S. P. Cooper e A. B. Brennan, “Non-toxic antifouling strategies,” *Materialstoday*, vol. 13, n° 4, pp. 36-44, 2010.
- [19] J. F. A. d. Souza, L. R. d. Oliveira, J. L. L. d. Azevedo, I. D. Soares e M. M. Mata, “UMA REVISÃO SOBRE A TURBULÊNCIA E SUA MODELAGEM,” *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 29, n° 1, 2011.
- [20] S. S. Saravi, *An Investigation on Design and Analysis of Micro-Structured Surfaces with Application to Friction Reduction*, England, Londres: School of Engineering and Design, Brunel University, 2014.
- [21] ANSYS, Inc., *Introductory FLUENT Training*, ANSYS, 2009.
- [22] U.S. Naval Oceanographic Office, “Full text of “Glossary of oceanographic terms”,” 08 1966. [Online]. Available: [https://archive.org/stream/glossaryofoceano00unit/glossaryofoceano00unit\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/glossaryofoceano00unit/glossaryofoceano00unit_djvu.txt). [Acedido em 26 06 2015].
- [23] R. E. H. Boston, “Glossary of meteorology,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 86, n° 369, 1960.
- [24] S. Eiger, “Modelos de Escoamentos Turbulentos,” *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, vol. 1, n° 2, pp. 84-155, 1989.
- [25] P. K. Kundu, I. M. Cohen e D. R. Dowling, *Fluid Mechanics*, 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2012.
- [26] H. Lumley e J. L. Tennekes, *A First Course in Turbulence*, United States of America: The Massachusetts Institute of Technology, 1972.
- [27] H. Tennekes e J. Lumley, *A First Course in Turbulence*, United States of America: MIT Press Design Department, 1972.
- [28] J. Schiwind, *Geophysical Fluid Dynamics for Oceanographers*, Prentice-Hall Inc., 1980.
- [29] R. PCC, “Modelos de Circulação em Corpos d’Água Rasos,” *Coleção de ABRH- Associação Brasileira de recursos Hídricos*, vol. 1, n° Métodos Numéricos em Recursos Hídricos, p. 156-221, 1989.

- [30] T. D. J., "Physical fluid dynamics," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 103, p. 827, 1977.
- [31] S. IH, *Mecânica dos Fluidos - Análise de escoamentos*, Ed. Edgard Blucher Ltda, 1973.
- [32] L. A. Oliveira e A. G. Lopes, *Mecânica dos Fluidos*, Mafra: ETEP- Edições técnicas e profissionais, 2010.
- [33] E. O. Doebelin, *Measurement Systems*, 4th ed, New York: McGraw-Hill, 1990.
- [34] S. W. W. Lu, "Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 60, p. 481-511, 1973.
- [35] G. Karniadakis e K.-S. Choi, "Mechanisms on Transverse Motions in Turbulent Wall Flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 35, pp. 45-62, 2003.
- [36] W. SCHOPPA e F. HUSSAIN, "Coherent structure generation in near-wall turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 453, pp. 57-108, 2002.
- [37] J. M. E. a. K. J. Sheng, "Buffer layer structures associated with extreme wall stress events in a smooth wall turbulent boundary layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 633, pp. 17-60, 2009.
- [38] A. E. Perry, W. H. Schofield e P. W. H. Joubert, "Rough wall turbulent boundary layers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 37, pp. 383-413, 1969.
- [39] O. G. Akinlade, *Effects of surface roughness on the flow characteristics* in, Canada: University of Saskatchewan, 2005.
- [40] H. Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, U.S.A, New York: McGraw-Hill, 1968.
- [41] J. Nikuradse, *Stromungsgesetze in rauhen rohen*. ForschHft Ver, Dt. Ing, 1932.
- [42] I. Tani, "Drag reduction by riblet viewed as a roughness problem," *Proceedings of Japan Academy*, vol. 64, n° 2, pp. 21-24, 1988.
- [43] S. J. Lee e S. H. Lee, "Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface," *Experiments in Fluids*, vol. 30, pp. 153-166, 2001.
- [44] B. D. Dean, *The effect of shark skin inspired riblet geometries on drag* in, USA: The Ohio State University, 2011.
- [45] B. & D. B. Bhushan, "Shark-Skin surfaces fluid-drag reduction on turbulent flow: A Review," *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 368, p. 4775-4806, October 2010.
- [46] I. Starling e K. S. Choi, *Non-linear laminar-turbulent transition over riblets*. Proceedings of the Laminar Flow Workshop, London: Queen Mary and Westfield, 1997.
- [47] S. W. J. Tullis, *Modelling the time dependent flow over riblets in the near wall region*, Canada: Department of Mechanical Engineering, Queen's University at Kingston, 1992.
- [48] M. O. Kramer, "Einrichtung zur Verminderung des Reibungswiderstandes". Germany Patente Patentschrift 669897, 17 March 1937.

- [49] H. Granola, H. Murcsy-Milian e F. Tamasch, “Errors, truncation and other deleterious effects in fluid dynamical research,” *Proceeding Conference of Loss Mechanisms in Aeronautics*, 1991.
- [50] E. V. a. S. Bacher, “A combined visualisation-anemometry study of the turbulent drag reduction mechanisms of triangular micro-groove surface modifications,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, vol. 1, 1985.
- [51] S. K. Robinson, “Effects of riblets on turbulence in a supersonic boundary layer,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1988.
- [52] C. R. Smits, J. D. Walker, H. A. H. A. e B. K. Taylor, “Hairpin vortices in turbulent boundary layers: the implications for reducing surface drag,” em *On Structure of Turbulent and Drag Reduction*, Zurich, Springer-Verlag, 1989, pp. 51-58.
- [53] K. S. Choi, “On physical mechanisms of turbulent drag reduction using riblets,” em *In Transport Phenomena in Turbulent Flows*, New York, Hemisphere, 1987.
- [54] D. W. a. B. M. Bechert, “The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 206, pp. 105-129, 1989.
- [55] P. M. F. a. P. A. Luchini, “Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross-flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 228, pp. 87-109, 1991.
- [56] P. a. P. A. Luchini, “Computation of three-dimensional stokes flow over complicated surfaces (3d riblets) using a boundary-independent grid and local corrections,” em *10th European Drag Reduction Meeting*, Berlin, 1997.
- [57] P. M. F. a. P. A. Luchini, “Viscous eddies over a grooved surface computed by a Gaussian-integration Galerkin boundary-element method,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal.*, vol. 30, pp. 2168-2170, 1992.
- [58] A. Baron e M. Quadrio, “Some preliminary results on the influence of riblets on the structure of a turbulent boundary layer,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 14, 1993.
- [59] R. Garcia-Mayoral, The interaction of riblets with wall-bounded turbulence, USA: Stanford University, 2011.
- [60] R. a. J. J. García-Mayoral, “Drag reduction by riblets,” *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 369, pp. 1412-1427, 2012.
- [61] J. D. G.-F. D. N. a. S. P. McLean, “Flight test of turbulent skin friction reduction by riblets,” em *Conference on turbulent drag reduction by passive*, 1987.
- [62] E. a. S. A. M. Coustols, “Turbulent skin-friction drag reduction by active and passive means: Part I. In Skin friction drag reduction,” *Advisory Grow for Aerospace Research and Development (AGARD Rep.)*, vol. 786, p. 8.1-8.53, 1992.
- [63] M. J. Walsh, Sellers e a. M. C. B. W. L., “Riblets drag at flight conditions,” *Journal of Aircraft*, vol. 26, pp. 570-575, 1989.

- [64] J. F. Robert, "Drag reduction: an industrial challenge in Skin friction drag," *AGARD Rep*, vol. 786, pp. 2.1-2.15, 1992.
- [65] J. Szodruch, "Viscous drag reduction on transport aircraft," *American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA*, p. 91, 1991.
- [66] A. Sareen, Drag reduction using riblet film applied to airfoils for wind turbines, USA: PhD Thesis, University of Illinois, 2012.
- [67] S. J. a. J. Y. G. Lee, "Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 20, p. 659-672, 2005.
- [68] P. R. Viswanath, "Aircraft viscous drag reduction using riblets," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, pp. 571-600, 2002.
- [69] H. A. Abdulbari, H. D. Mahammed e Z. B. Y. Hassan, "Bio-Inspired Passive Drag Reduction Techniques: A Review," *ChemBioEng Reviews*, vol. 3, n° Chemical Engineering & Technology, p. 20, 24 1 2015.
- [70] GEC Alstom, "Industrial applications of drag reduction to the French high speed trains (TGV)," em *6th European drag reduction meeting*, Eindhoven, 1991.
- [71] A. L. M. Walsh, "Optimization and Application of Riblets for Turbulent Drag Reduction," in *22nd Aerospace Sciences Meeting*, Washington, DC, USA, 1984.
- [72] M. J. Walsh, "Effect of detailed surface geometry on riblet drag reduction performance," *Journal of Aircraft*, vol. 27, n° 6, pp. 572-573, 1990.
- [73] P. W. J. M. a. B. J. L. Vukoslavcevic, "Viscous drag reduction using stream-wise aligned riblets," *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal*, vol. 30, pp. 1119-1122, 1992.
- [74] S. R. a. W. J. M. Park, "Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer," *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal*, vol. 32, pp. 31-38, 1994.
- [75] K. S. Choi, "European drag-reduction research - recent developments and current status," *Fluid Dynamics Research*, vol. 26, pp. 325-335, 1999.
- [76] D. M. Bushnell, "Aircraft drag reduction - A review," *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers, part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 217, pp. 1-18, 2003.
- [77] M. J. Walsh and L. M. Weinstein, "Drag and Heat-Transfer Characteristics of Small Longitudinally Ribbed Surfaces," *AIAA Journal*, Vol. 17, No. 7, p. 2, 1979.
- [78] M. J. Walsh, "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 4, p. 2, Abril 1983.
- [79] Y. Dubief, L. Djenidi e R. A. Antonia, "The measurement of  $du/dy$  in a turbulent boundary layer over a riblet surface," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 18, pp. 183-187, 1997.

- [80] M. Benhalilou, F. Anselmet, J. Liandart e L. Fulachier, "Experimental and numerical investigation of a turbulent boundary layer over riblets," em *Proceeding of the 8th Symp. on Turbulent Shear Flows*, Munich, 1991.
- [81] R. F. a. K. R. E. Blackwelder, "On the wall structure of turbulent boundary layers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 776, pp. 89-112, 1976.
- [82] G. Comte-Bellot e J. a. S. I. Sabot, "Detection of intermittent events maintaining Reynolds stress," em *Proceedings of the Dynamic Flow Conference*, Marseille, 1978.
- [83] A. D. Schwarz-van Manen, R. Hoogsteen, J. C. Stouthart, K. Krishna Prasad e F. T. M. Nieuwstadt, "Coherent structures over drag reduction surfaces," em *Proc. 12 Symp. On Turbulence*, University of Missouri, Rolla, 1990.
- [84] D. G. a. T. W. G. Bogard, "Burst detection with single-point," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 162, pp. 389-413, 1986.
- [85] J. A. a. T. A. S. W. Gallager, "Turbulent boundary layer characteristics over stream-wise grooves," *American Institute of Aeronautics and*, 1984.
- [86] A. Hooshmand, R. A. Youngs e J. M. a. B. J. L. Wallace, "An experimental study of changes in the structure of a turbulent boundary layer due to surface geometry changes," *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, 1983.
- [87] L. W. Redy, "Flat Plate Drag Reduction in a Water Tunnel Using Riblets," Naval Ocean Systems Center, San Diego, 1987.
- [88] E. V. Bacher e C. R. Smith, "Turbulent Boundary-Layer Modification by Surface Riblets," *AIAA Journal*, vol. 24, 1986.
- [89] L. Reidy e G. Anderson, "Drag reduction for external and internal boundary layers using riblets and polymers," *26th Aerospace Sciences Meeting*, 11-14 1 1988.
- [90] L. Djenidi, J. Liandrat, F. Anselmet e L. Fulachier, "Numerical and experimental investigation of the laminar boundary layer over riblets," *Applied Scientific Research*, 03 1989.
- [91] K. K. P. F. T. M. N. C. J. A. Pulles, "Turbulence measurements over longitudinal micro-grooved surfaces," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 46, n° 3, pp. 197-208, 1989.
- [92] K. N. Liu, C. Christodoulou, O. Riccius e D. D. Joseph, *Structure of Turbulence and Drag Reduction*, Berlin: Springer, 1990.
- [93] A. D. D. Neumann, "Drag measurements on V-grooved surfaces on a body of revolution in axial flow," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 48, n° 1, pp. 105-114, 1991.
- [94] J. J. Rohr, G. W. Andersen, L. W. Reidy e E. W. Hendricks, "A comparison of the drag-reducing benefits of riblets in internal and external flows," *Experiment in Fluids*, vol. 13, n° 6, pp. 361-368, 10 1992.
- [95] K. Parker e A. T. Sayers, "The effect of longitudinal microstriations and their profiles on the drag of flat plates," *Mechanical Engineering Science*, vol. 213, n° 8, 1999.

- [96] J.-j. Wang, S.-l. Lan e G. Chen, "Experimental study on the turbulent boundary layer flow over riblets surface," *Fluid Dynamics Research*, vol. 27, n° 4, 2000.
- [97] B. Dean e B. Bhushan, "The effect of riblets in rectangular duct flow," *Applied Surface Science*, vol. 258, n° 8, p. 3936-3947, 2012.
- [98] P. T. S. U. C. C. K. Liu, Ph.D. Thesis, California: Stanford University, 1966.
- [99] I. N. M. M. Y. Y. Yoshimasa FURUYA, "Turbulent Boundary-Layer along a Streamwise Bar of a Rectangular Cross Section Placed on a Flat Plate," *Bulletin of JSME Vol.20 No.141 P 315-322*, Março 1977.
- [100] G. V. Enyutin, Y. A. Lashkov, N. V. Samoilova, I. V. Fadeev and E. A. Shumilkina, "Experimental investigation of the effect of longitudinal riblets on the friction drag of a flat plate," *Fluid Dynamics, Volume 22, Issue 2*, Março - Abril 1987.
- [101] B. S. L. S. P. Wilkinson, "Turbulence Management and Relaminarisation," em *Turbulence Management and Relaminarisation*, Berlin, Germany, Springer, 1988, p. 121-131.
- [102] P. R. N. Prof. H. W. Liepmann, "Turbulence Management and Relaminarisation," em *Turbulence Management and Relaminarisation*, Berlin. Germany, Springer, 1988, p. 149-160.
- [103] V. D. Nguyen, J. Dickinson, Y. Jean, Y. Chalifour, A. Smaili, A. Page e F. Paquet, "Turbulence Control by Passive Means," em *Turbulence Control by Passive Means*, Berlin, Germany, Springer, 1990, p. 159-172.
- [104] G. F. Naterer, P. S. Glockner, D. Thiele, S. Chomokovski, G. Venn and G. Richardson, "Surface micro-grooves for near-wall exergy and flow control: application to aircraft intake de-icing," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, 2005.
- [105] F. T. M. Nieuwstadt, W. Wolthers, H. Leijdens, K. Krishna Prasad e A. Schwarz-van Manen, "The reduction of skin friction by riblets under the influence of an adverse pressure gradient," *Nationallizenz*, vol. 15, n° Electronic Resource, 1993.
- [106] Wallace, S.-R. Park e J. M., "Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer," *AIAA Journal*, vol. 32, 1994.
- [107] I. V. Gudilin, Y. A. Lashkov e V. G. Shumilkin, "Combined Effect Of Longitudinal Riblets And Lebu-Devices On Turbulent Friction On A Plate," *Fluid Dynamics*, vol. 30, 1995.
- [108] D. O. K.-S Choi, "Turbulence management using riblets for heat and momentum transfer," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 15, 1997.
- [109] D. W. Bechert, M. Bruse and W. Hage, "Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin," *Experiments in Fluids*, vol. 28, 2000.
- [110] B. Frohnäpfel, J. Jovanović e A. Delgado, "Experimental investigations of turbulent drag reduction by surface-embedded grooves," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 590, n° Fluid Mechanics, 15 October 2007.

- [111] S.-J. L. Choi e Yong-Seok, "Decrement of spanwise vortices by a drag-reducing riblet surface," *Journal of Turbulence*, vol. 9, n° Drag reduction, 2008.
- [112] C. C. B. a. U. Schulz, "Shark skin inspired riblet structures as aerodynamically optimized high temperature coatings for blades of aeroengines," *Smart Materials and Structures*, vol. 20, p. 10, 2011.
- [113] Instituto Superior Técnico, "Escoamento em Regime Turbulento," em *Aerodinâmica I*, Lisboa, pp. 1-25.
- [114] S. e. a. Kline, "The structure of turbulent boundary layers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 30, n° 4, pp. 741-773, 1967.
- [115] Siegel, F. Klug, U. Kling e R. O. A., "Extensive micro-structuring of metals using picosecond pulses—ablation behavior and industrial relevance," em *Proceedings of the LPM 2008, 9th International Symposium on Laser Precision*, Quebec, Canada, 2008.
- [116] E. Uhlmann, S. Piltz e U. Doll, "Funkenerosion in der Mikrotechnik. Einsatzgebiete und Verfahrensgrenzen," *Werkstatttechnik wt-online*, vol. 12, p. 733-737, 2004.
- [117] B. K. J. B. D. Wang, "Manufacturing of functional riblet structures by profile grinding," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 3, pp. 14-26, 2010.
- [118] S. Fischer, *Fertigungssysteme zur spanenden Herstellung von Mikrostrukturen*, Aachen: Dr.-Ing. Dissertation, 2000.
- [119] F. a. F. B. Klocke, "Development of an incremental rolling process for the production of defined riblet surface structures," *Sebastian Mader Prod. Eng. Res. Devel*, vol. 1, pp. 233-237, 2007.
- [120] X. W. J. Z. D. Han, "Bio-replicated Forming of the Biomimetic Drag-reducing Surface based on Underwater Low-resistance Scarfskin's," em *Proceedings of the IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation*, China, 2010.
- [121] V. Stenzel, Y. Wilke e W. Hage, "Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping," *Progress in Organic Coatings*, vol. 70, pp. 224-229, 2010.
- [122] D.-Y. Zhao, Z.-P. Huang, M.-J. Wang, T. Wang e Y. Jin, "Vacuum casting replication of micro-riblets on shark skin for drag-reducing applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 198-202, 2012.
- [123] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent User's Guide*, Canonsburg, 2011.
- [124] W. Rodi, *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A state-of-the-art review.*, Netherlands: International Association for Hydraulic Research, 1993.