

Alma Mater Studiorum Università di Bologna

SCUOLA DI INGEGNERIA

Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe L-9

Elaborato finale di laurea in:
Aerodinamica degli aeromobili

Metodi di riduzione della resistenza in natura: effetto della rugosità superficiale

Presentata da:
Lorenzo Proli

Relatore:
Prof. Alessandro Talamelli

Anno accademico
2021-2022

SOMMARIO

La pelle dello squalo è stata validata come un efficace sistema di controllo della resistenza di attrito, privilegiato in regime turbolento. Essa è stata oggetto di numerosi studi al fine di rendere realizzabili repliche quanto più simili possibili alla reale struttura superficiale. In questa trattazione, partendo da una breve digressione storica sull'evoluzione dello studio delle rugosità superficiali, sono state analizzate le principali campagne sperimentali svolte in merito alla replica di superfici con Riblets 2D. Per queste ultime, sono state stimate le prestazioni per sezioni triangolari, smerlate, a lama e, per ciascuna di esse, è stata fornita la rispettiva ottimizzazione dei parametri caratteristici della geometria. Inoltre, è stato presentato uno studio sperimentale, in cui sono state impiegate Riblets 3D a lama trapezoidale, mostrando le criticità rispetto alle Riblets 2D. Successivamente, è stata fornita un'analisi che ha riportato il ruolo dell'orientazione delle superfici Riblet (e delle nervature tridimensionali disposte sopra di esse), rispetto al flusso; in quanto è stato supposto che, nella reale pelle di squalo, ciò avrebbe potuto compensare la perdita di prestazioni rispetto al caso 2D. Infine, sono state discusse le tecniche di fabbricazione delle superfici Riblet tramite micro-goffatura e micro-stampaggio, in quanto sono state considerate le tecniche di fabbricazione più efficaci per la produzione di superfici ad alte prestazioni, commercializzabili in ambito industriale. In particolare, in questa trattazione è stata discussa la produzione di pellicole di rivestimento per la superficie esterna dei velivoli, stimando la riduzione della resistenza su diversi profili alari in differenti regimi di moto, e sono state confrontate le prestazioni delle riblets su tre diversi tessuti impiegati per il nuoto competitivo.

Indice

SOMMARIO.....	3
INTRODUZIONE.....	7
1. EVOLUZIONE DELL'ANALISI DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE	8
2. TEORIA	12
2.1 Definizione e classificazione della resistenza	12
2.2 Grandezze fisiche e proprietà fondamentali del moto turbolento	13
2.3 Sistemi di controllo della resistenza in natura	14
3. EFFETTO DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE SULLE CARATTERISTICHE DEL MOTO TURBOLENTO	20
3.1 Ottimizzazione geometrica delle riblets 2D	24
3.2 Riblets 3D e ruolo dell'orientamento delle squame.....	31
3.3 Contributo dell'orientazione delle nervature all'interno dei placoidi.....	36
4. METODI E PROCEDIMENTI PER LA FABBRICAZIONE DELLE RIBLETS	42
4.1 Materiali e metodi per la realizzazione di superfici scanalate	42
4.2 Impiego di riblets per rivestimenti superficiali in ambito aeronautico	55
4.3 Applicazione di superfici con nervature per tessuti sportivi	70
CONCLUSIONI	79
BIBLIOGRAFIA	82
APPENDICE A: Numero di Reynolds di transizione	84

ELENCO DEI SIMBOLI

SIMBOLO	DEFINIZIONE
τ	Azioni tangenziali
μ	Coefficiente di viscosità dinamica
u	Componente di velocità longitudinale
$\frac{\partial u}{\partial y}$	Gradiente verticale di velocità
L	Lunghezza
ν	Viscosità cinematica
\bar{U}	Velocità media
u'	Fluttuazione di velocità
$\frac{\partial p}{\partial x}$	Gradiente di pressione
Re	Numero di Reynolds
h_{ps}	Altezza di sporgenza effettiva del flusso longitudinale
h_{pc}	Altezza di sporgenza effettiva del flusso trasversale
h	Altezza delle nervature
s	Spaziatura tra le creste delle nervature
ρ	Densità del fluido
τ_w	Sollecitazione di taglio alla parete
s^+	Numero di Reynolds in termini di spaziatura
α	Angolo di apertura delle nervature / angolo di incidenza
τ_0	Sollecitazione di taglio sulla lastra piana
t	Spessore della nervatura
T_{min}	Tempo minimo di indurimento
l	Distanza tra le ruote
V	Velocità di rivestimento
Δp_r	Caduta di pressione sulla superficie piana di riferimento
Δp_t	Caduta di pressione della superficie di rivestimento micro-solcata della pelle di squalo bio-replicata
DR	Riduzione della resistenza
h^+	Altezza della nervatura adimensionalizzata

C_p	Coefficiente di pressione
M	Numero di Mach
C_D	Coefficiente di resistenza
β	Gradiente di pressione secondo Clauser
d	Diametro
S	Superficie
D	Resistenza

INTRODUZIONE

Sono stati impiegati due mesi a tempo pieno, per la stesura della trattazione esposta, al fine di creare un modello in cui siano stati racchiusi i principali risultati, evoluti a partire dal secolo precedente, legati all'analisi e allo sviluppo di nuove tecnologie, ispirate alla natura biologica di alcuni esemplari, capaci di ottimizzare il proprio moto. L'origine di questa categoria di studi è stata motivata dalle specifiche di carattere economico e ambientale, interessate fin dall'inizio del 1900, richieste allo scopo di ridurre le emissioni inquinanti, tipicamente associate a veicoli terrestri e atmosferici per il trasporto di merci e passeggeri. In generale, tale obiettivo è stato tradotto dagli studiosi in meccanismi di controllo della resistenza aerodinamica, al fine dell'ottenimento di una limitazione della spinta necessaria generata dai sistemi propulsivi; in altri termini, garantendo un contenimento delle quantità di combustibile impiegate per completare le tratte. La resistenza aerodinamica è stata suddivisa in due contributi principali, al fine una accurata selezione del sistema di controllo a seconda della tipologia di applicazione in esame, in particolare, uno dovuto alla distribuzione delle pressioni sulla superficie solida, mentre l'altro legato all'attrito viscoso. A sua volta, per quest'ultimo, sono stati distinti sistemi di controllo attivi e passivi. In questo studio, è stata condotta un'analisi approfondita su una particolare tecnologia, inserita nella categoria dei sistemi di controllo passivi della resistenza di attrito e, più precisamente, dello strato limite turbolento, chiamata superficie Riblet, la quale è stata ispirata dalla morfologia della pelle dello squalo. Dopo aver effettuato la classificazione della resistenza e dei sistemi di controllo, l'analisi è stata focalizzata sull'individuazione delle principali geometrie impiegate per la replicazione: per esempio, distinguendo le Riblets bidimensionali da quelle tridimensionali e, in particolare, differenziando le prestazioni per diverse forme della sezione trasversale, il cui obiettivo è stato identificato nella ricerca dei parametri di progetto ottimali che restituissero il massimo valore di riduzione della resistenza aerodinamica maggiormente riconducibile alle prestazioni della pelle vivida. In seguito, sono state discusse le metodologie per la realizzazione delle rugosità superficiali che si mostrassero maggiormente adatte ad applicazioni in ambito aeronautico e nel nuoto competitivo. Approfondendo la tecnica, i materiali e i processi di fabbricazione impiegati, l'obiettivo è stato focalizzato sulla necessità di mantenere un'elevata accuratezza della replicazione, al fine di confermare le performance previste dai risultati teorici e dalle precedenti sperimentazioni.

1. EVOLUZIONE DELL'ANALISI DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE

La natura ha subito un'evoluzione, nell'arco di 3.8 miliardi di anni, da quando è stato stimato che la vita sia apparsa sulla Terra. La natura ha evoluto oggetti ad alte prestazioni, utilizzando materiali di uso comune. Questi hanno funzionato dalla macroscala alla nanoscala. La comprensione delle funzioni fornite da oggetti e processi presenti in natura ha guidato nell'imitazione e produzione di nanomateriali, nanodispositivi e processi. Il design o l'adattamento o la derivazione biologicamente ispirata dalla natura sono stati indicati come "biomimetici". La biomimetica ha avuto origine dalla parola greca biomimesi. La parola fu coniata dal poliedrico Otto Schmitt nel 1957, che, nella sua ricerca di dottorato, ha sviluppato un dispositivo fisico che imitava l'azione elettrica di un nervo.

Il campo della biomimetica è stato considerato altamente interdisciplinare, ha coinvolto le funzioni biologiche, delle strutture e dei principi dei vari oggetti trovati in natura da biologi, fisici, chimici e scienziati dei materiali, e la progettazione e la fabbricazione di vari materiali e dispositivi di commerciale interesse da parte di ingegneri, scienziati dei materiali, chimici e altri. La parola biomimetica è stata coniata per la prima volta nel dizionario Webster nel 1974 ed è stata definita come lo studio della formazione, struttura o funzione di prodotti, materiali, meccanismi e processi biologici soprattutto allo scopo di sintetizzare prodotti simili mediante meccanismi artificiali che hanno imitato quelli naturali.

I materiali biologici sono stati distinti dal molecolare alla nanoscala, microscala e macroscala, spesso in modo gerarchico con una nanoarchitettura intricata che, alla fine, ha costituito una miriade di diversi elementi funzionali. Le proprietà dei materiali e delle superfici sono stati derivati da una complessa interazione tra la struttura della superficie, la morfologia, le proprietà fisiche e chimiche. Molti materiali, superfici e dispositivi hanno fornito, inoltre, multifunzionalità. Superidrofobicità, autopulizia, riduzione della resistenza nel flusso del fluido, conversione e conservazione dell'energia, elevata adesione, adesione reversibile, portanza aerodinamica, materiali e fibre ad alta resistenza meccanica, isolamento termico, autoguarigione e meccanismi di aiuto sensoriale sono stati riportati come alcuni degli esempi presenti in natura che hanno rivestito un interesse commerciale [1].

I primi studi fondamentali sulle Riblets sono stati ricondotti al 1970, effettuati dal NASA Langley Research Center; nello stesso anno sono state realizzate le primissime Riblets su alluminio piatto.

Successivamente, presso lo stesso laboratorio, nel 1983, sono stati condotti degli studi approfonditi, da Walsh e dai suoi collaboratori, legati alle superfici ispirate alla morfologia della pelle dello squalo (Riblet), come metodo biomimetico per il controllo della resistenza di attrito in regime turbolento, a seguito di una forte richiesta rivolta a soddisfare necessità di natura economica e ambientale, in particolare, relative alla riduzione dei consumi ed emissioni da parte delle compagnie aeree. A seguito di questo obiettivo, è stato proposto uno studio sperimentale sullo strato limite turbolento su superfici scanalate longitudinali, i cui risultati ottenuti, con un bilancio della resistenza estremamente accurato, hanno indicato che tali geometrie sono state capaci di produrre riduzioni di resistenza netta fino all'8%, a condizione che l'altezza e la spaziatura delle scanalature siano state selezionate opportunamente. Le variazioni di quantità di moto hanno confermato queste misurazioni di resistenza. I dati campionati hanno indicato che la frequenza di diffusione della vorticità per le riblets è stata approssimativamente la stessa di quella per una piastra piana, ma l'intensità della turbolenza alla parete è stata significativamente ridotta. Sono stati anche discussi i tentativi di ottimizzare la riduzione della resistenza netta variando la geometria della sezione trasversale delle nervature e l'allineamento rispetto al campo di moto fluido. Negli anni successivi, avendo scoperto risultati promettenti nelle sperimentazioni condotte in galleria del vento, essi hanno approfondito le varie tipologie di sezione trasversale di questa categoria di superfici, distinguendo il contributo dei parametri geometrici, quali spaziatura tra le creste delle nervature e altezza di queste ultime, al fine di ottenere un

incremento delle prestazioni in termini di riduzione della resistenza di attrito viscoso rispetto ad una superficie priva di rugosità [2-6].

Nel 1984 3M e il Flight Institute di Seattle hanno intrapreso la prima campagna sperimentale per valutare le prestazioni delle superficie rivestite da Riblets in acqua. Nell'anno successivo, 3M ha offerto disponibilità commerciale per la produzione di Riblets su lamina. I primi benefici in ambito sportivo sono stati osservati nel 1987 grazie alla vittoria all'America's Cup e all'Olympia da parte di uno yacht da regata 'Stars and Stripes' equipaggiato con Riblets fabbricate dalla NASA e 3M.

Dal 1985 al 2000, tale scoperta ha attirato l'attenzione di Bechert e dei suoi collaboratori, che hanno implementato una nuova strategia, conservando le forme delle sezioni trasversali della superficie con nervature bidimensionali, analizzate da Walsh in galleria del vento, riproducendo la campagna sperimentale in una galleria d'acqua, situata a Berlino. Questa scelta ha permesso di migliorare significativamente la qualità delle misurazioni, per mezzo della fabbricazione di superfici di prova in scala maggiore e a geometria variabile, ottenendo un incremento, (rispetto alle misurazioni precedenti), del massimo della riduzione della resistenza, valutato al 9.9%. Successivamente, a seguito di questo risultato promettente, essi hanno condotto studi sulle nervature tridimensionali allo scopo di realizzare una riproduzione maggiormente fedele alla struttura reale della pelle dello squalo rappresentata in Figura 1 [7-10]. Contemporaneamente, molti studiosi sono stati interessati a tale meccanismo di riduzione della resistenza e al fine di sviluppare applicazioni efficaci della pelle dello squalo in diversi campi. Infatti, nel 1989, Aibus ha iniziato a condurre esperimenti con Riblets a lama metallica e, inoltre, Choi insieme ai suoi collaboratori, hanno contribuito a nuovi sviluppi sullo studio di Riblets su una lastra piana in galleria del vento e sugli scafi di navi.

Nel 1991, è stato implementato un modello numerico per l'integrazione delle equazioni del moto per la visualizzazione delle instabilità del flusso a bassa e ad alta velocità. Nello stesso anno, Szodruch ha stimato la riduzione della resistenza aerodinamica sull'Airbus A-320, ricoprendolo di superfici con nervature [38].

Nel 1995, 10 anni dopo l'offerta di 3M, Kourky & Virk hanno fatto i loro primi esperimenti con la lamina 3M su tubi per studi fluidodinamici all'interno di condotti. Inoltre, in tale anno, Goldstein ha realizzato una modellazione numerica del flusso turbolento sul sistema Riblet [26].

Nel 2002, un altro scienziato chiamato Han ha fatto esperimenti con Riblets su ali e fusoliere di aeroplani. Nello stesso anno, l'Office of Naval Research degli Stati Uniti e lo scienziato Brennan hanno sviluppato superfici ispirate alla pelle di squalo per l'antivegetativa su sottomarini e navi.

IFAM, l'Istituto Fraunhofer per l'ingegneria manifatturiera e la scienza dei materiali, nel 2003 ha sviluppato Riblets verniciati e ha depositato una domanda di brevetto per la tecnologia applicativa. Cinque anni dopo, IFAM ha testato tale tecnologia, verniciandola su aeromobili, in operazioni commerciali in termini di stabilità. Nello stesso anno, Lee e Choi hanno studiato la visualizzazione del flusso e un rivestimento Riblet sottile flessibile.

Nel 2009, Bionic Surface Technologies ha condotto il primo esperimento aerodinamico di volo con una completa copertura della superficie del velivolo Zivko Edge 450 V2.

Nell'anno successivo, il BMW Oracle Team ha vinto la 33^a America's Cup con il suo yacht da regata ricoperto da lamina Riblet. Nello stesso anno (2010), Bionic Surface Technologies hanno effettuato il primo test in galleria del vento su scala reale su una vettura GT Race. Inoltre, è stato il primo anno in cui Bionic Surface Technologies ha utilizzato con successo i Riblets in DTM (Deutsche Tourenwagenmeisterschaft). Sfortunatamente, la tecnologia Riblet è stata bandita 3 anni dopo, nel 2013, dal DTM stesso.

La distribuzione del campo di microflusso sulla superficie reale pelle di squalo è stata analizzata sistematicamente in modo completo e approfondito e i risultati hanno mostrato che l'efficienza di riduzione della resistenza potrebbe essere stata incrementata ulteriormente. Amy, Lang e i ricercatori a loro affiliati, nel 2011 hanno scoperto la flessibilità delle squame della pelle di squalo. Pertanto, le squame hanno riportato la capacità di erigersi passivamente e tale meccanismo passivo è stato utilizzato per mantenere l'elevato effetto di riduzione della resistenza aerodinamica [13].

Nel 2012, Koeltzsch e la sua squadra di ricercatori hanno studiato il campo di velocità sulla superficie della pelle di squalo di ispirazione biologica ed è stata riportata un'efficienza di riduzione della resistenza fino a circa il 10% [12]. Sareen ha utilizzato diverse dimensioni di Riblets a dente di sega applicate al profilo alare DU-96-W-180 per turbine eoliche. Nello stesso anno, Bionic Surface Technologies ha condotto i primi test con Riblets su una vettura di Formula 1, mentre IFAM e HSVA hanno testato le Riblets verniciate per applicazioni navali, indicando una riduzione della resistenza aerodinamica compresa nell'intervallo 3,5% - 5%. Contemporaneamente, per la superficie dell'ala di farfalla di ispirazione biologica sono state proposte strutture che hanno combinato l'effetto pelle di squalo e fiore di loto, e hanno mostrato i grandi vantaggi in termini di autopulizia, riduzione della resistenza e enormi potenziali applicazioni nell'ingegneria dei fluidi [14]. Per quanto riguarda la reale pelle di squalo, le prestazioni hanno superato le micro scanalature semplificate e dritte e, tale risultato, è stato validato da diversi ricercatori. Lauder e i suoi collaboratori hanno studiato la velocità di nuoto semovente della pelle di squalo ed è stata restituita un'efficienza media di riduzione della resistenza aerodinamica del 12,3% [20].

Nel 2013 lo Swiss Air Race Team ha vinto il 1° posto alla Reno Air Race. Bionic Surfaces Technologies ha calcolato e applicato le Riblets sull'aereo "Scarlett Screamer" dello Swiss Air Race Teams. IFAM e Lufthansa Technik hanno effettuato i primi test di Riblet verniciati su aerei civili in servizio nello stesso anno.

Dal 2013 al 2016, Yuehao e i suoi colleghi hanno applicato le superfici con scanalature per la riduzione della resistenza di attrito all'interno di un sistema di tubazioni di gas naturale. È stata misurata un'efficienza della riduzione della resistenza pari all'8%, considerando come fluido la miscela tra aria e gas naturale effettivo [15-17].

Nel 2014, Peugeot ha presentato la sua concept car "Peugeot Exalt" al Motorshow di Pechino. L'ala posteriore è stata concepita con una superficie Riblet. Nello stesso anno, Bionic Surface Technologies ha utilizzato Riblets in Bobsleigh ai Giochi Olimpici Invernali di Sochi. In contemporanea, sono stati pubblicati gli studi condotti da Huawei che, insieme ai suoi collaboratori, ha riprodotto la pelle di squalo grazie all'impiego della vernice induribile UV rapida, e la precisione di replicazione della morfologia della superficie è stata convalidata di circa il 97% confrontando la sagoma biologica della pelle di squalo e la morfologia della superficie del rivestimento, inoltre, l'efficienza di riduzione della resistenza aerodinamica è stata di circa il 12% rispetto alla pelle liscia [18]. Inoltre, nello stesso anno sono stati riportati i risultati della campagna sperimentale di Tae che, insieme al suo gruppo di ricerca, ha completato la valutazione dell'idro/oleofobicità per la replica della pelle di squalo con riblets e i risultati hanno mostrato che le proprietà potrebbero essere notevolmente migliorate dalla micro morfologia della pelle di squalo [19].

Nel 2015, Bionic Surface Technologies e Lufthansa hanno effettuato simulazioni con Riblets su un Boeing 747-400. BST ha calcolato un risparmio di carburante del 3%. Il 2015 è stato anche il primo anno in cui un aereo è stato equipaggiato con Riblets da Bionic Surface Technologies alla Red Bull Air Race.

Nel 2018, IFAM e Bionic Surface Technologies hanno eseguito test di Riblets verniciate su turbine eoliche in servizio, indicando un significativo aumento delle prestazioni. Nello stesso anno Bionic Surface Technologies, General Electric, MAN, Lufthansa e altri hanno avviato il progetto ReSiSTant (Large Riblet Surface with Super Hardness, Mechanical and Temperature Resistance by Nano Functionalization), finanziato dall'UE.

Il 2019 è stato l'anno dell'ultima Red Bull Air Race. Il 49% di tutte le posizioni sul podio e il 51% di tutte le vittorie sono state assegnate a velivoli in cui sono state applicate Riblets.

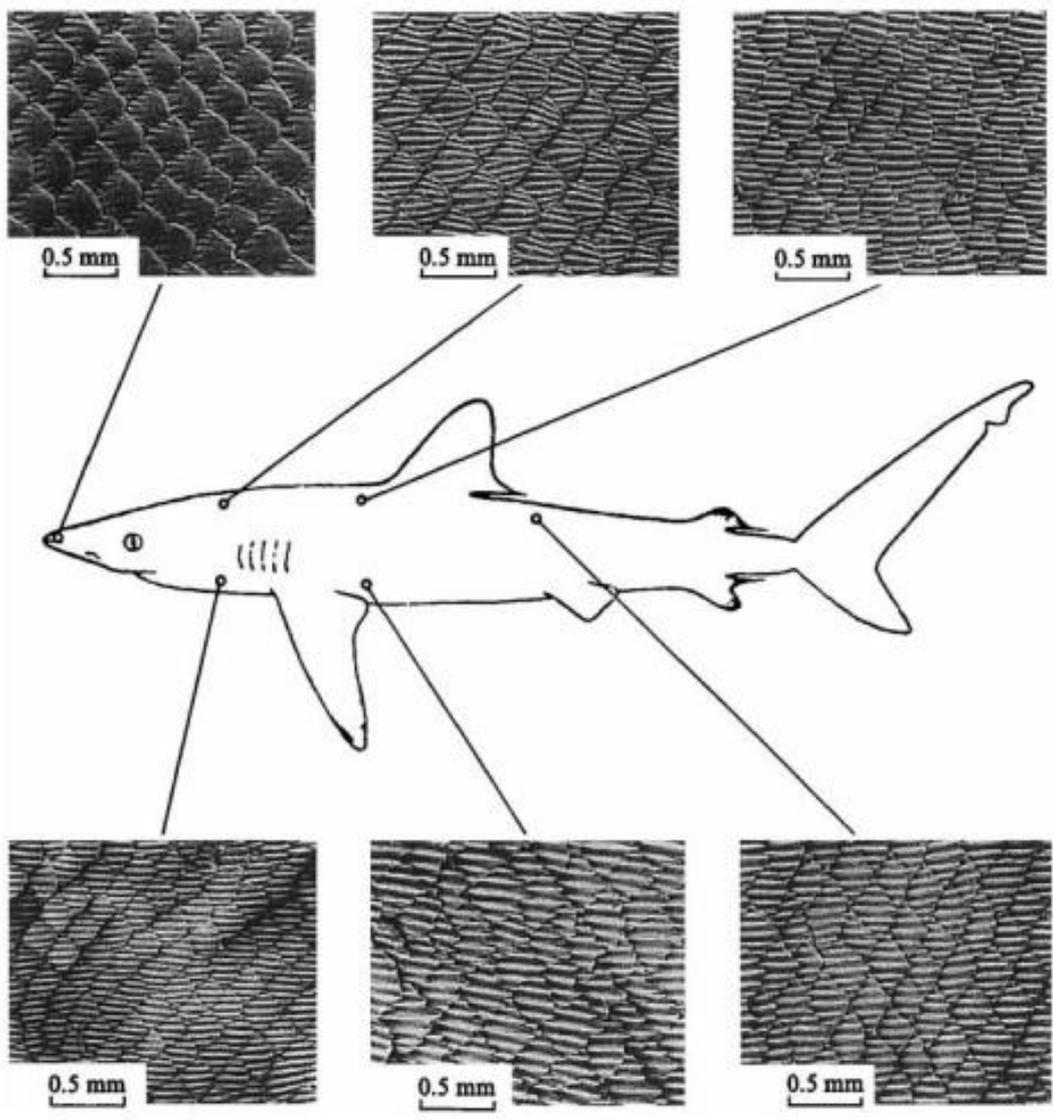


Figura 1: squalo *Carcharhinus falciformis*, 2.27 m di lunghezza; (immagine adattata da [7]).

2. TEORIA

2.1 Definizione e classificazione della resistenza

La resistenza, definita come la componente della forza fluidodinamica parallela alla direzione del moto, è stata classificata, limitando la descrizione al moto subsonico, esplicitando due contributi principali: il contributo legato alla distribuzione delle pressioni e quello associato alle azioni tangenziali.

Il contributo dovuto alla distribuzione delle pressioni è stato suddiviso, a sua volta, in resistenza di forma e resistenza indotta, mentre quello associato alle azioni tangenziali è stato dedicato interamente all'attrito.

La resistenza di forma è stata stimata attraverso una modellazione della scia (prolungamento ideale del corpo), purché essa sia stata considerata sufficientemente piccola. La resistenza generata in tale regione è stata ricondotta a quella sviluppata sul corpo considerato. Inoltre, l'intensità della resistenza di forma e la complessità della sua stima sono state relazionate alla dimensione della scia stessa.

La resistenza indotta, presente unicamente nell'atto di moto tridimensionale, è stata legata alla quantità di vorticità assiale che è stata rilasciata nella scia, di cui quest'ultima ha costituito l'unica componente presente in essa.

L'attrito è stato relazionato al comportamento del fluido all'interno dello strato limite di velocità, ovvero quella regione entro la quale non è stato possibile considerare il moto irrotazionale, a causa della presenza della proprietà fisica della viscosità e, in particolare, è stato definito come quella particolare regione in cui è stata individuata una certa percentuale della vorticità totale.

La generazione della resistenza di attrito è stata legata alle interazioni sviluppate tra le particelle fluide. Esse sono state definite come entità termodinamiche virtuali, la cui forma, dimensione e origine sono state selezionate arbitrariamente, in modo tale che la particella sia stata considerata sufficientemente grande da contenere un numero statisticamente elevato di molecole e, contemporaneamente, sia stata valutata sufficientemente piccola da evitare qualunque variazione macroscopica legata alla natura del problema.

Le particelle considerate, sono state definite come entità capaci di trasferire tra loro quantità di moto. Questo meccanismo fisico è stato consentito da una proprietà fisica del fluido, chiamata viscosità.

Infatti, le particelle aventi velocità differenti lungo la direzione verticale hanno permesso il trasferimento reciproco di molecole e, quindi, quantità di moto. Il gradiente di velocità è stato correlato alla presenza di una parete solida, in quanto la condizione al contorno di slittamento ha imposto che la velocità sia stata considerata nulla. Il gradiente di velocità verticale presente tra la parete e il campo di moto indisturbato è stato responsabile dello sviluppo delle azioni tangenziali in condizioni di moto laminare, definite in Equazione 1.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad [1]$$

La descrizione della resistenza appena redatta ha introdotto l'ipotesi in cui particelle vicine siano state movimentate nella stessa direzione relativa e che il trasferimento di quantità di moto sia stato avvenuto tra strati di fluido con velocità differenti, trascurando, in un'ipotesi di prima approssimazione, il fenomeno fisico del processo di transizione del regime di moto, rappresentato in Figura 2.

Lo stato del regime di moto è stato stimato grazie a un valore adimensionale, chiamato numero di Reynolds, che è stato definito in Equazione 2, il quale ha espresso il rapporto adimensionale tra le forze inerziali e le forze viscosi.

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad [2]$$

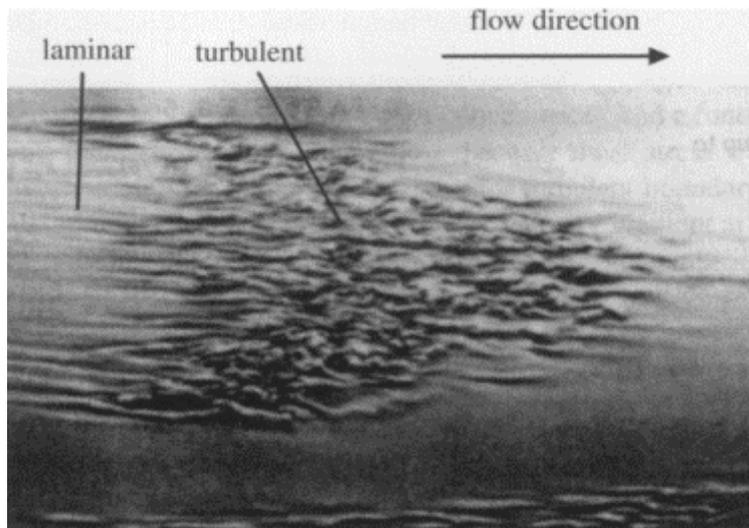


Figura 2: rappresentazione del processo di transizione del regime di moto da laminare a turbolento, (immagine adattata da [21]).

2.2 Grandezze fisiche e proprietà fondamentali del moto turbolento

A seguito degli studi sperimentali effettuati da Reynolds, il cui esperimento è stato approfondito all'interno dell'Appendice A, rivolti allo studio della transizione, il regime di moto è stato definito turbolento se il valore del numero di Reynolds, ha superato il corrispondente valore di transizione (Re_T).

Pertanto, se il moto è stato definito turbolento, esso ha riportato le seguenti caratteristiche:

- Moto tridimensionale casuale, (non prevedibile e non stazionario).
- Moto tridimensionale rotazionale.
- Elevati numeri di Re.
- Multiscala: atto di moto contenente vortici appartenenti a diverse scale.
- Dissipativo: energia immessa nelle grandi scale è stata convertita in calore.
- Diffusivo: meccanismi di trasferimento di massa, quantità di moto ed energia hanno riportato almeno un ordine di grandezza superiore rispetto al moto laminare.

Nel moto turbolento, l'esistenza delle proprietà sopra indicate ha provocato un brusco incremento dei meccanismi di trasferimento della quantità di moto. La completa casualità e la non prevedibilità del moto hanno condotto all'implementazione di un approccio statistico per la rappresentazione dello strato limite di velocità, il quale è stato definito tramite opportune grandezze fisiche riportate in Tabella 1.

GRANDEZZA FISICA	DEFINIZIONE	COMMENTO
Velocità media	$\bar{U} = \int_0^T u(t) dt$	Se il periodo \hat{T} considerato è sufficientemente grande tale che, $\bar{U}(T_1) - U(T_2) < \varepsilon$, con ε piccolo a piacere e T_1 e $T_2 > \hat{T}$, il moto è definito statisticamente stazionario.
Fluttuazione	$u'(t) = u(t) - \bar{U}$	Differenza tra velocità istantanea e il valore di velocità media.

Tabella 1: principali grandezze fisiche utili alla descrizione dell'atto di moto turbolento su una superficie con scanalature.

L'evoluzione del regime di moto da laminare a turbolento ha provocato un incremento di diffusività, derivato dallo scambio particellare che è stato verificato a seguito della transizione, a cui è stato correlato un incremento di energia cinetica in prossimità della parete solida.

Lo scambio particellare ha costituito, infatti, un ciclo energetico in cui l'energia cinetica è stata ceduta nel dominio fluido più vicino alla parete solida e riacquisita nelle regioni più esterne. Questo ha promosso un incremento delle azioni tangenziali di attrito in regime turbolento ma, tuttavia, vi è stato associato un ritardo della separazione dello strato limite.

In questa sede, lo studio è stato incentrato sulla descrizione di un atto di moto turbolento su una superficie con nervature longitudinali, discutendo gli effetti da esse indotti sulle caratteristiche del moto turbolento e, in particolare, rendendo espliciti i meccanismi fisici di riduzione della resistenza di attrito legati a questa categoria di superfici.

Il moto turbolento completamente sviluppato, descritto su una superficie con nervature longitudinali, ha mostrato una completa casualità nella sua distribuzione della velocità. Tuttavia, è stato possibile scorgere regioni distinte all'interno del campo di moto turbolento completamente sviluppato che hanno mostrato modelli e caratteristiche del flusso differenti [22].

Mentre le molecole del fluido sono state visualizzate come entità organizzate nel sottostrato viscoso, (localizzato in prossimità della parete delle scanalature, dove hanno prevalso le forze di natura viscosa), gli strati più esterni sono stati individuati da un moto caotico e fortemente disorganizzato, a causa dell'elevata diffusività generata dal maggior contributo delle forze di natura inerziale. Tali regioni sono state costituite da vortici creati nel sottostrato viscoso, i quali, una volta raggiunta l'estremità delle creste, sono stati espulsi verso gli strati più lontani dalla parete. Quando essi sono stati allontanati, il fenomeno di concatenazione con altri vortici è stato perseguito fino a che i vettori velocità locali non hanno equiparato la direzione del flusso medio. Questi effetti sono stati considerati responsabili del meccanismo di trasferimento della quantità di moto, che è stato opportuno limitare per ottenere superfici più performanti in termini di riduzione della resistenza.

2.3 Sistemi di controllo della resistenza in natura

I design di ispirazione biologica sono stati serviti come una grande ispirazione per gli studi fluidodinamici. Le caratteristiche biologiche di ciascuna specie, rivolte all'ottimizzazione delle prestazioni, sono state evolute attraverso generazioni che hanno svolto un ruolo sostanziale nella loro sopravvivenza finale. Il processo di evoluzione è stato identificato come una funzione iterativa capace di adattarsi alle esigenze

progettuali fondendosi naturalmente con le esigenze operative. Le tecnologie artificiali hanno beneficiato in modo significativo di questi attributi evolutivi, imitando tali caratteristiche ottimali attraverso mezzi artificiali di ingegneria. L'imitazione biologica, associata a una caratteristica particolare di una specie naturale per applicazioni scientifiche, ha introdotto un campo di studio interdisciplinare, che è stato comunemente definito come "Biomimetica". Le soluzioni biomimetiche hanno acquisito maggiore portata, grazie al loro potenziale nell'affrontare le sfide di progettazione esistenti, mostrandosi maggiormente adattabili ed efficienti, rispetto a progetti convenzionali, in un contesto applicativo di riduzione della resistenza, del miglioramento delle caratteristiche portanti e del controllo della separazione.

Dal punto di vista aerodinamico, il comportamento del flusso, studiato per questa categoria di superfici bioispirate, è stato strettamente legato ai meccanismi fisici sviluppati all'interno dello strato limite di velocità. Per questo motivo, le ricerche sono state rivolte a quei fenomeni che hanno contribuito alla generazione delle azioni tangenziali di attrito, al fine di poter progettare efficacemente sistemi di controllo in grado di ridurre gli effetti. I dispositivi che hanno concesso la riduzione della resistenza di attrito, dovuta al contributo delle azioni tangenziali sulla superficie solida, definite in Equazione 1, hanno agito attraverso la:

- Riduzione di μ , dissolvendo polimeri o bolle sulla superficie.
- Riduzione di $\frac{\partial u}{\partial y}$, condizione ottenibile mediante un gradiente di pressione avverso ($\frac{\partial p}{\partial x} > 0$), parametro dipendente dall'assegnazione di una geometria al corpo.

L'avvenimento del fenomeno fisico della transizione ha consentito di effettuare un'ulteriore classificazione dei sistemi di controllo, differenziandoli in due fondamentali categorie:

- Sistemi di controllo attivi: riducendo il gradiente verticale di velocità, modificando la geometria o aspirando i disturbi esterni, hanno permesso la posticipazione della transizione del moto, in quanto lo sforzo di attrito del caso laminare è stato valutato inferiore.
- Sistemi di controllo passivi: hanno consentito la riduzione delle azioni tangenziali dopo che la transizione è già stata compiuta.

L'adattamento è stata considerata una caratteristica unica degli organismi viventi, che ha consentito il cambiamento delle condizioni strutturali, comportamentali o fisiologiche per far fronte agli stimoli esterni. Alcuni sistemi naturali sono stati adattati e migliorati attraverso l'evoluzione per milioni di anni per avere proprietà di attrito ottimali. Ciò ha riguardato principalmente gli animali poiché l'evoluzione ha consentito loro di sopravvivere e operare con successo nel loro habitat naturale.

In Tabella 2, sono stati classificati i principali esemplari presenti in natura, distinguendone lo scopo delle tecniche di ottimizzazione, che hanno presentato molteplici vantaggi per lo sviluppo di repliche artificiali e che consentissero l'implementazione di modelli più efficaci rispetto alla realizzazione di superfici convenzionali [23].

<i>Categoria</i>	<i>Tecnica biomimetica</i>	<i>Specie di ispirazione</i>	<i>Scopo</i>	<i>Regime di moto (Re)</i>	<i>Tipologia sistema di controllo</i>
<i>Insetti</i>	Nervature sporgenti dal bordo di uscita	Libellula	Riduzione della resistenza	$10^4 - 10^5$	Attivo
<i>Volatili</i>	Riblets	Uccello skimmer	Riduzione della resistenza	$9.96 \cdot 10^4$	Passivo
	Alula	Falco pellegrino	Controllo della separazione	$1.35 \cdot 10^5$	Attivo
<i>Animali acquatici</i>	Piume di estremità alare	Poiana di Harris	Riduzione della resistenza indotta	10^5	Passivo
	Squame di pesce	Carpa erbivora	Ritardo della transizione	$5.2 \cdot 10^5$	Attivo
		Spigola europea			
	Morfologia della pelle di squalo	Squalo Mako	Riduzione della resistenza	$3.9 \cdot 10^5$	Passivo
	Morfologia della pelle di delfino	Delfini			$7.7 \cdot 10^6$
Delfino scuro					Attivo
Orca assassina					Attivo

Tabella 2: classificazione dei principali esemplari presenti in natura che hanno mostrato differenti sistemi di controllo per l'ottimizzazione delle performance del moto.

Nella Libellula, fotografata in Figura 3(a), sono state individuate nervature tridimensionali, identificate in Figura 3(b). Queste sporgenze, aventi un angolo di incidenza di circa 5° , hanno permesso di individuare una massima riduzione della resistenza del 10%, rispetto ad una superficie pulita. Da esse è stata ottenuta una posticipazione dell'angolo di incidenza di stallo di circa 4° , la quale è stata tradotta in un miglioramento le capacità portanti e nel ritardo della transizione dello strato limite da laminare a turbolento. Tale tecnologia, in questo caso, ha svolto il ruolo di sistema di controllo attivo della resistenza di attrito ed è stato possibile adattarla a piccoli velivoli operanti in regime di moto pari situato nell'intervallo di $10^4 - 10^5$ o inferiore.

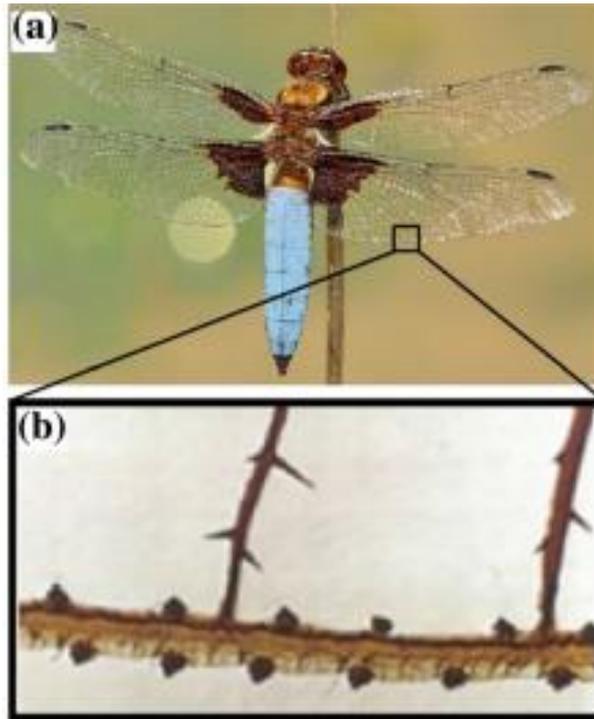


Figura 3: (a) è stata mostrata le superfici alari della Libellula. (b) è stato riposto un ingrandimento del bordo di uscita dove sono state collocate le rispettive sporgenze. (immagine adattata da [23]).

Le squame di pesce hanno mostrato la tendenza a stabilizzare lo strato limite laminare ritardando la transizione, offrendo così il vantaggio di riduzione della resistenza correlata attrito cutaneo. Analizzando il comportamento del flusso sulle strutture sovrapposte dell'insieme di squame di pesce come mostrato in Figura 4(a), è stato osservato un movimento a zig-zag in queste regioni sovrapposte come visualizzato in Figura 4(b). Questo tipo di comportamento del flusso ha provocato le modulazioni di velocità periodiche e la striatura del flusso, eliminando la transizione indotta dalle onde di Tollmien-Schlichting, ovvero una forma di instabilità primaria del flusso, definita in uno scenario classico del processo di transizione, che ha giocato un ruolo significativo nella riduzione della resistenza all'attrito della pelle.

Ulteriori indagini hanno fornito due tipi di formazioni di striature di velocità in direzione del flusso all'interno dello strato limite in base all'intensità della velocità del fluido, comunemente chiamate striature di velocità, definite all'interno di uno scenario by-pass del processo di transizione. In questo caso, sono state originate striature a bassa velocità sulla regione centrale della squama, mentre sono state formate striature ad alta velocità nella regione sovrapposta.

Gli studi, relativi a repliche artificiali della superficie della Spigola europea, in regime $Re = 5.2 \cdot 10^5$, hanno rilevato un ritardo della transizione del regime di moto al 55% della lunghezza del corpo rispetto a casi non controllati.

Oltre alle strutture morfologiche delle squame, la superficie della pelle dei pesci ha mostrato uno strato scivoloso di muco secreto dall'epidermide che ha giocato un ruolo significativo nella riduzione della resistenza. Diversi studi sulla Fluid Structure Interaction (FSI) hanno rivelato che la pelle è stata resa scivolosa dal muco e ciò ha fornito un notevole comportamento idrorepellente. Il muco che ha avvolto il corpo del pesce ha aiutato non solo a ridurre al minimo la resistenza all'attrito, ma anche ha generato un meccanismo naturale per difendere l'animale dai possibili agenti contaminanti. Pertanto, il concetto di strato di muco bio-ispirato è stato efficacemente utilizzato per ottimizzare le caratteristiche di resistenza

all'attrito, attraverso nuove tecniche di rivestimento superficiale. Ad esempio, è stato mantenuto un ruolo fondamentale nella riduzione della resistenza aerodinamica di siluri (missili sottomarini lanciati da velivoli) e applicazioni rivolte a velivoli e anfibi.

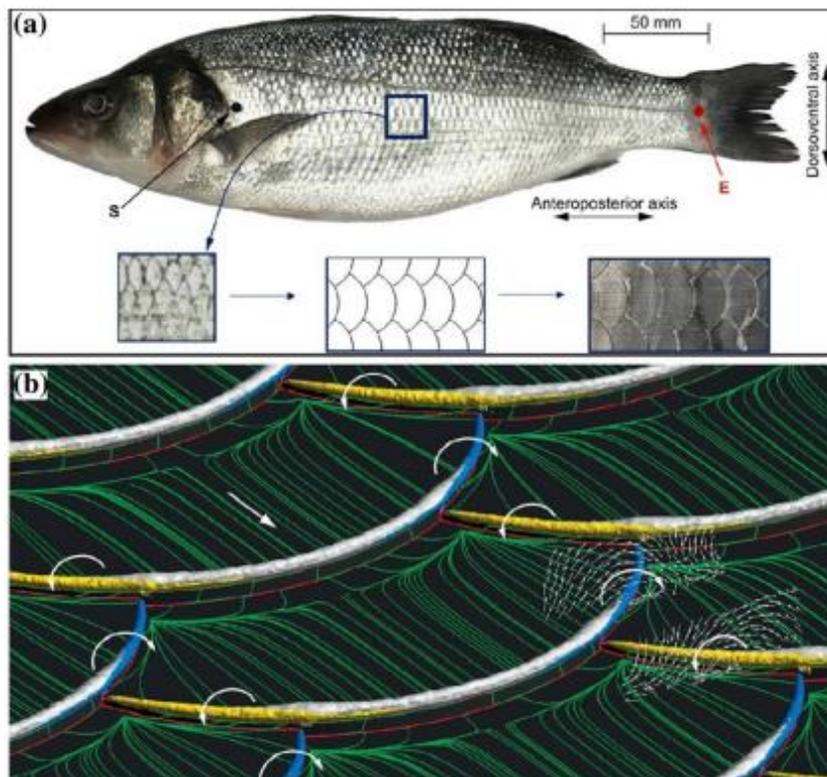


Figura 4: (a) rappresentazione di squame della spigola europea riprodotte mediante stampa 3D. (b) modello di simulazione numerica che ha riportato il campo di velocità e di vorticità sulla superficie delle squame di pesce; (immagine adattata da [23]).

I delfini hanno mostrato diverse qualità in termini di riduzione della resistenza, tra esse sono state distinte: le rugosità cutanee, le secrezioni, le accelerazioni del fluido prodotte nello strato limite di velocità, lo smorzamento viscoso, la deformazione della pelle e i meccanismi comportamentali. Le varie sezioni trasversali del corpo del delfino hanno mostrato forme simili a profili laminari, con relativi vantaggi nella riduzione della resistenza. La morfologia della struttura, in determinate regioni della pelle e la sua cedevolezza, visualizzabili in Figura 5, hanno consentito la possibilità di effettuare una deformazione attiva e uno smorzamento viscoso, consentendo il mantenimento dello strato limite laminare. La coda dell'animale acquatico in esame, oltre all'effetto primario svolto per garantire il sostentamento e la manovrabilità, ha giocato un ruolo fondamentale nell'imprimere accelerazioni al flusso allo scopo di conservare il regime laminare dello strato limite. L'analisi delle caratteristiche naturali, presentate dal cetaceo, ha consentito l'inserimento della tecnica biomimetica, all'interno dei sistemi di controllo della resistenza di attrito di tipologia attiva.

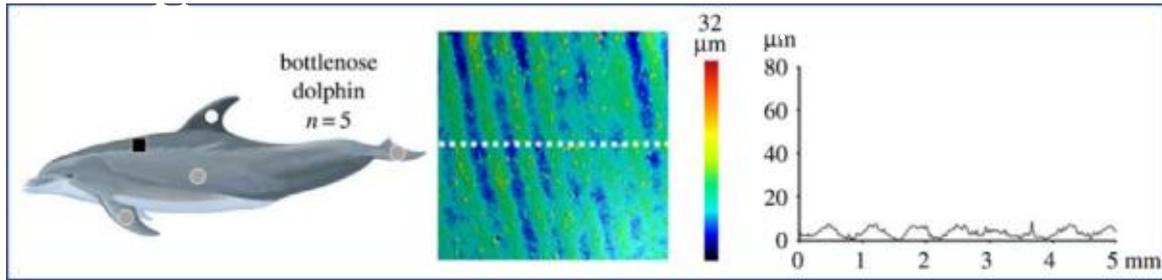


Figura 5: rappresentazione della struttura tridimensionale della pelle del delfino. La colorazione evidenzia la presenza di nervature in cinque posizioni del corpo. (immagine adattata da [24]).

Il capitolo successivo è stato interamente focalizzato sulla descrizione della geometria della superficie della pelle dello squalo. Più precisamente, è stata condotta un'analisi approfondita dei più importanti esperimenti condotti fin dall'inizio del secolo precedente, i quali hanno confermato la possibilità di replicazione della struttura superficiale con ottimi riscontri in termini di prestazioni, classificando tale tipologia di superficie tra i più efficaci sistemi di controllo dello strato limite turbolento presenti in natura.

3. EFFETTO DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE SULLE CARATTERISTICHE DEL MOTO TURBOLENTO

La rugosità superficiale è stata distinta in una rugosità di natura casuale e in una rugosità di natura deterministica. La descrizione della geometria, riportata in seguito, è stata focalizzata su una particolare rugosità, ottenuta realizzando delle nervature longitudinali, allo scopo di replicare gli effetti generati sulla cute della pelle dello squalo.

Una causa, a cui è stato correlato un incremento della resistenza di attrito, è stata associata all'estensione della superficie bagnata rispetto alla superficie pulita. Nel caso esaminato, siccome i vortici hanno separato dalle creste delle nervature, solo questa ristretta zona è stata soggetta a sollecitazioni a taglio elevate. La regione in esame ha mostrato difficoltà nell'indurre un significativo campo di moto in prossimità delle creste, per tale motivo la superficie bagnata è stata significativamente limitata. Per mezzo di questa configurazione, è stato possibile affermare che la fluttuazione di velocità, ovvero la differenza tra la velocità istantanea e il valore della velocità media, dovute ai moti vorticosi trasversali e l'energia cinetica turbolenta, sono stati valutati molto inferiori nelle valli delle nervature rispetto ad una lastra piana priva di rugosità.

La differenza di fluttuazione, definita in Tabella 1, del campo di velocità rispetto alla lastra piana, a patto che la spaziatura tra le nervature è stata imposta sufficientemente piccola da compensare l'incremento di superficie bagnata, ha implicato che le sollecitazioni a taglio sono state misurate molto inferiori. Inoltre, nelle regioni più esterne, rispetto alla parete solida, i valori delle sollecitazioni rilevati sono stati circa ricondotti a quelli della superficie pulita.

Al contrario, se si fosse presentata una spaziatura tra le nervature eccessivamente elevata, la maggior parte dei vortici, che hanno separato dalle creste, si sarebbero localizzati tra le scanalature, provocando una riduzione dello spessore del sottostato viscoso, il che è stato tradotto in un incremento della resistenza di attrito [25]. Le nervature sporgendosi al flusso, hanno garantito un ostacolo alla traslazione dei vortici trasversali e, rispettivamente, l'origine del profilo di velocità effettiva è stata sollevata di una certa quantità. La differenza tra l'altezza della nervatura e l'apparente spostamento verticale dell'origine del campo di moto ha assunto il nome di altezza di sporgenza effettiva.

Confrontando la velocità media del flusso laminare sopra le nervature con quella ad un'altezza equivalente sulla lastra piana, è stata ricavata l'altezza di sporgenza effettiva per il flusso longitudinale, indicata con h_{ps} . Mentre l'altezza di sporgenza effettiva, per il flusso trasversale, che è stata determinata analogamente, ma considerando le velocità trasversali, è stata indicata con h_{pc} .

La differenza di altezza tra le origini dei due campi di moto, $\Delta h = h_{ps} - h_{pc}$, riportata in Figura 5, indipendentemente dalla geometria della nervatura, ha costituito una quantificazione dell'ostacolo posto alla traslazione dei vortici trasversali. Al fine di incrementare ulteriormente le prestazioni e di semplificazione delle campagne sperimentali, è stata discussa la scala con cui la rugosità viene realizzata, mediante l'opzione di modifica dei parametri geometrici durante le prove.

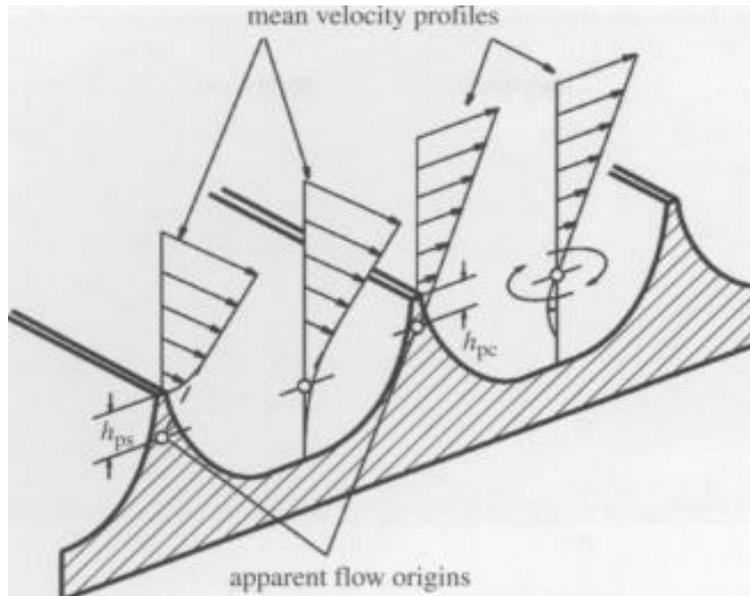


Figura 5: rappresentazione del campo di moto viscoso longitudinale e trasversale, (immagine adattata da [11]).

In merito a ciò, è stato proposto uno studio sperimentale, che ha mostrato una riduzione sensibile della resistenza rispetto ai risultati ottenuti in galleria del vento, in accordo ai meccanismi fisici di riduzione della resistenza in regime turbolento [8]. Il canale dell'olio, schematizzato in Figura 6, nel quale sono state introdotte 4,5 tonnellate di fluido, ha presentato una sezione trasversale rettangolare di dimensioni 25cm x 85cm. Il vantaggio di questa tipologia di struttura è stato dovuto alla possibilità di produzione di un banco di prova, con metodi meccanici convenzionali, che abbia consentito la modifica della geometria delle nervature direttamente durante i test. Grazie alle dimensioni delle strutture superficiali molto maggiori, rispetto ai prototipi realizzati per la galleria del vento, è stata incrementata significativamente la qualità delle misurazioni. In seguito, è riportata una classificazione dei principali risultati ottenuti [8]:

- Misure dello sforzo di taglio su superfici riblets bidimensionali, aventi forma della sezione a dente di sega o semicircolari, necessarie per relazionare i risultati ottenuti con quelli precedenti svolti in galleria del vento: essi hanno indicato una massima riduzione della resistenza del 5%.
- Successivamente, sono state sviluppate superfici con nervature longitudinali e con l'aggiunta di fessure. La profondità e la larghezza delle scanalature hanno permesso la regolazione della geometria durante lo svolgimento della prova. Il risultato associato all'aggiunta delle fessure non ha mostrato alcun contributo nella riduzione della resistenza. Tuttavia, è stato possibile correlare la precedente affermazione con un contributo positivo in termini di riduzione della resistenza parassita ottenibile grazie ad un maggior controllo della separazione. D'altra parte, la chiusura delle fessure ha garantito l'individuazione di una profondità ottimale delle scanalature, ovvero metà della spaziatura laterale. Per questa configurazione è stata rilevata una riduzione dell'attrito cutaneo pari all'8,7%. L'analisi in oggetto ha dimostrato che un'eliminazione accurata degli effetti deleteri dovuti alla presenza di piccoli spazi vuoti ha potuto consentire il raggiungimento della riduzione di attrito cutaneo fino al 9,9%.

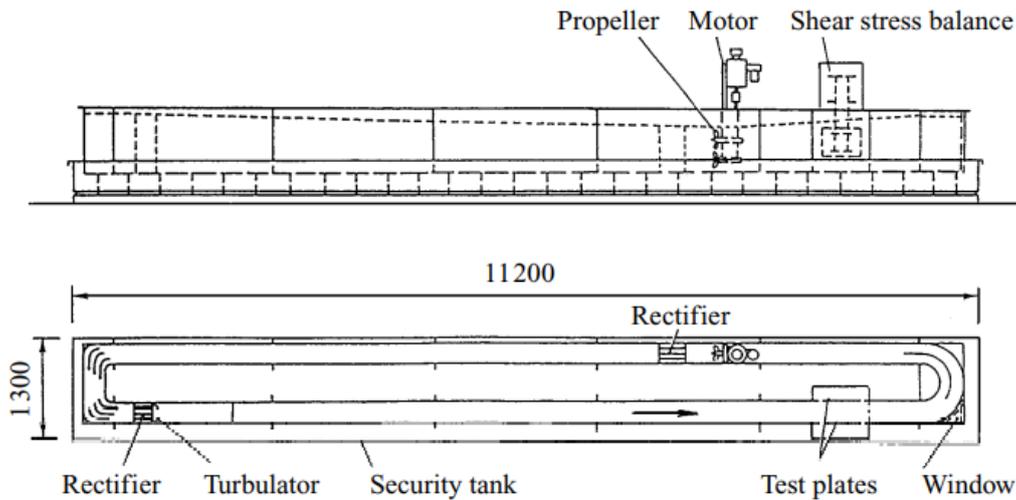


Figura 6: schematizzazione del canale dell'olio di Berlino, dimensioni riportate in mm, (immagine adattata da [8]).

All'aumentare del numero di Reynolds, è stato correlato un incremento dell'influenza del contributo dell'estensione della superficie bagnata sulla resistenza del fluido, pertanto, la teoria di riduzione della resistenza in regime laminare è stata degradata a causa dell'avvenimento del fenomeno fisico della transizione.

L'approccio di simulazione numerica delle superfici virtuali con nervature è stato sviluppato per osservare il comportamento di un flusso completamente turbolento, al fine di esaminare l'effetto di smorzamento del moto traslatorio vorticoso trasversale sulla geometria rappresentato in Figura 7, dove nella Figura 7(b) è stato riposto un ingrandimento dell'immagine in Figura 7(a).

I grafici hanno mostrato le soluzioni, (campo di velocità individuato dalle linee di corrente), della simulazione numerica dell'atto di moto turbolento in un condotto. Le nervature virtuali, di dimensioni $\frac{h}{s} \sim 0.29$, disposte sul fondo, hanno mostrato una sezione in direzione trasversale a dente di sega. Il sistema di riferimento utilizzato ha prediletto l'impiego di coordinate adimensionali z^+ e y^+ che hanno indicato, rispettivamente, la direzione parallela e normale alla superficie. Sono state riportate, inoltre, le regioni di isovelocità caratterizzate dal rapporto adimensionale $\frac{V}{V_\tau}$, dove V ha indicato la velocità del fluido e V_τ è stata denotata come la velocità di sollecitazione alla parete [26], definita in Equazione 4.

$$V_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{0.5} \quad [4]$$

L'analisi dei campi di flusso modellati sulle superfici che hanno presentato riblets sono stati studiati in conformità con le teorie esistenti sui meccanismi di riduzione della resistenza. Infatti, quando sono stati originati vortici sulla superficie, sono stati isolati sopra le punte delle nervature, il che ha dato luogo a un canale di bassa velocità nelle valli di queste ultime. Il canale di bassa velocità, tra le punte delle nervature, ha mostrato un gradiente di velocità inferiore rispetto al flusso su una piastra piana, il che ha ridotto significativamente le sollecitazioni di taglio sulla maggior parte della superficie delle nervature. I gradienti di velocità hanno assunto valori maggiori sulle punte delle nervature e le sollecitazioni di taglio sono state

corrispondentemente più elevate. Il risultato netto di questa distribuzione di azioni tangenziali è stato validato con una diminuzione favorevole della resistenza complessiva.

Inoltre, la traslazione del vortice attraverso la superficie delle nervature durante le animazioni è stata notevolmente smorzata rispetto al flusso su una piastra piana. La traslazione smorzata del vortice è stata considerata funzionale alla sregolarizzazione del vortice stesso, a favore dell'incremento di diffusività (caratteristica imprescindibile del moto turbolento), ovvero, alla limitazione del verificarsi di scoppi di vortici, aggrovigliamenti e turbolenze dello strato esterno.

La replica della morfologia, pertanto, è stata effettuata sulla base della somiglianza con la naturale struttura, semplicità dei processi di fabbricazione e ottimizzazione della riduzione della resistenza in funzione della tipologia di applicazione.

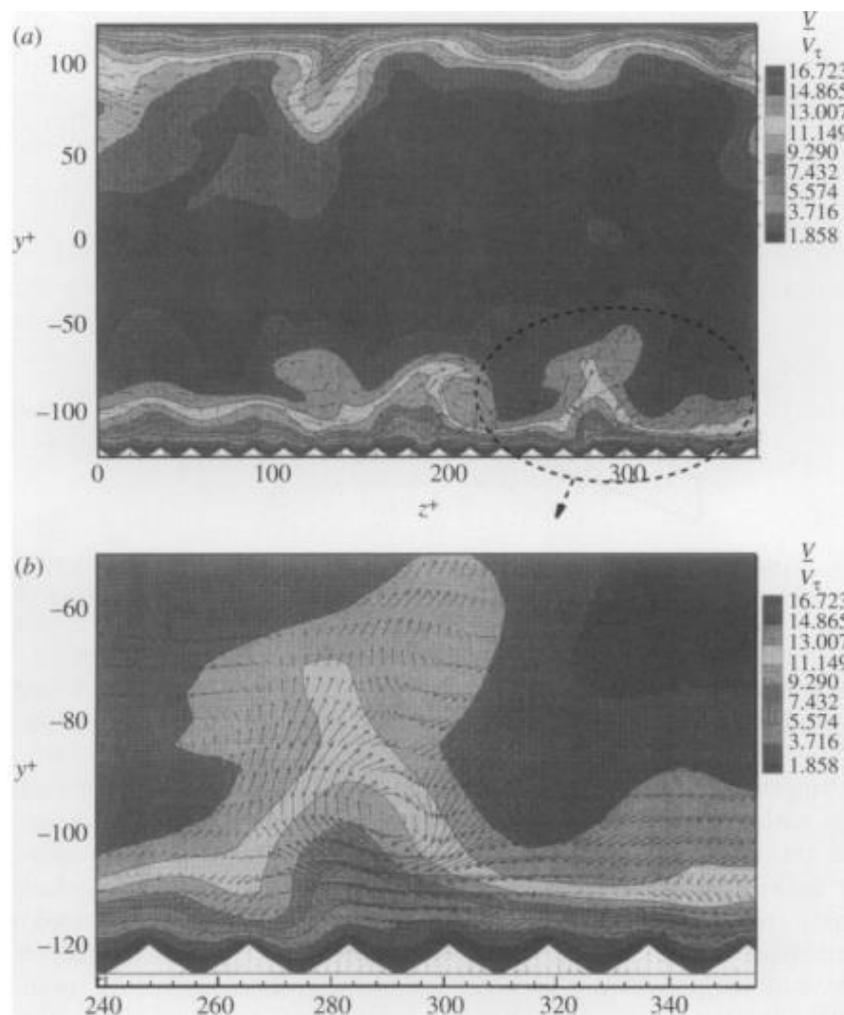


Figura 7: distribuzione della velocità longitudinale in presenza di scanalature longitudinali, (immagine adattata da [26]).

3.1 Ottimizzazione geometrica delle riblets 2D

Le nervature bidimensionali sono state caratterizzate da un'estrusione continua di una semplice sezione trasversale. La caratterizzazione più estensiva è stata apportata in merito alla sezione triangolare, smerlata e a lama segmentata, mostrate in Figura 8 [8].

La scelta di forme alternative e più complesse della sezione trasversale, che ha incluso nervature asimmetriche, gerarchiche e con punte dentellate o arrotondate, sono state ampiamente studiate e non hanno riportato ulteriori vantaggi prestazionali rispetto alle precedenti [3; 5].

Altri tipi di geometrie come le nervature gerarchiche, nelle quali sono state collocate riblets più piccole nella punta di nervature più grandi [27], non hanno mostrato ulteriori incrementi di riduzione della resistenza.

La maggior parte degli studi è stata eseguita modificando il numero di Reynolds adattato alle superfici con nervature, indicato nell'Equazione 5.

$$s^+ = \frac{s}{v} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad [5]$$

La riduzione della resistenza è stata confrontata con i valori ottenuti per la superficie liscia, ottenendo una curva di prestazioni per un insieme specifico di dimensioni caratteristiche. L'introduzione di parametri geometrici adimensionali ha concesso di relazionare i dati ottenuti in diverse condizioni di flusso, permettendo il confronto con ulteriori esperimenti svolti.

Nelle stesse condizioni di flusso adimensionale, i dati acquisiti generano curve di prestazione simili, indipendentemente dal fatto che le nervature siano state realizzate con materiali diversi, testate con fluidi diversi o fabbricate su scala diversa.

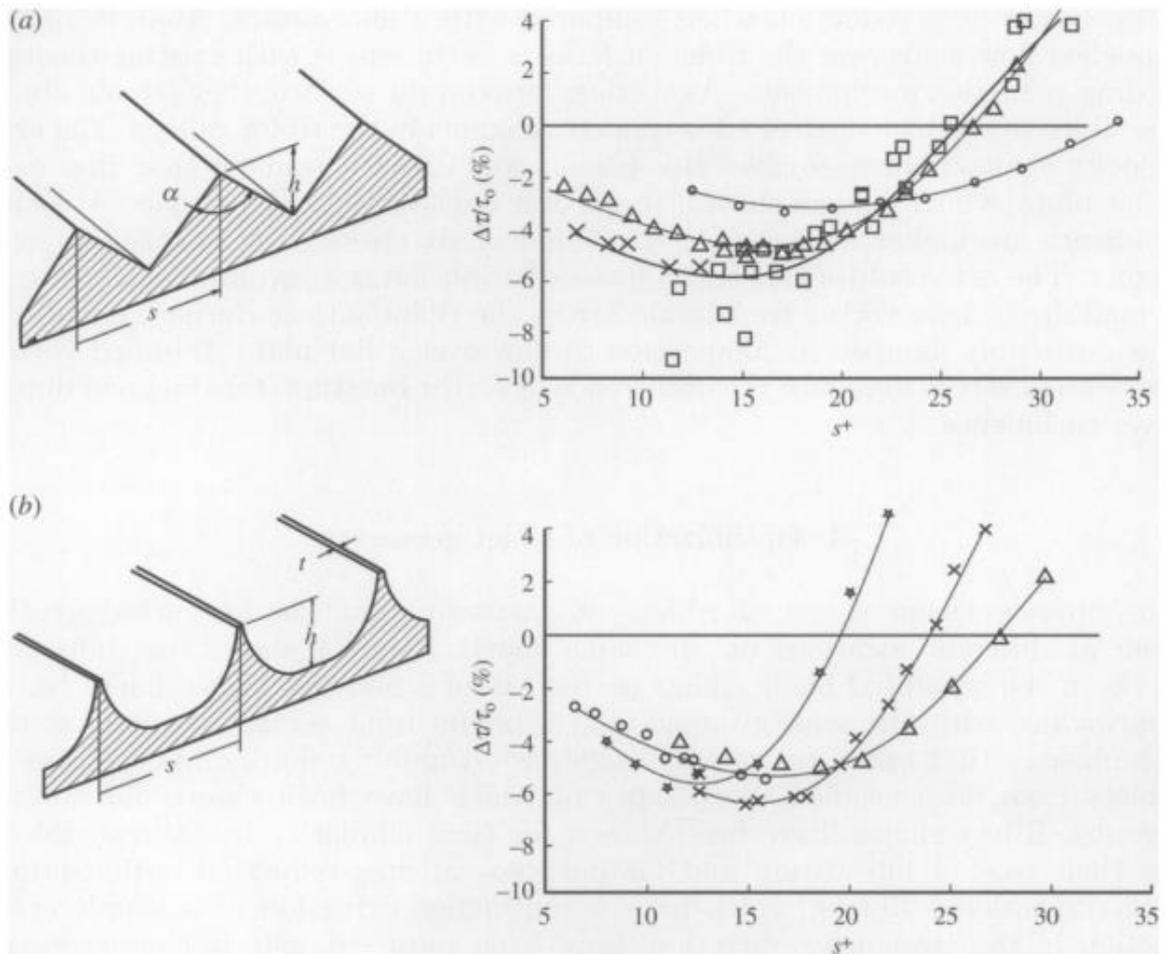


Figura 8: schematizzazione delle nervature bidimensionali e della parametrizzazione della riduzione dello sforzo di taglio rispetto ai parametri caratteristici, (immagini adattate da [11]).

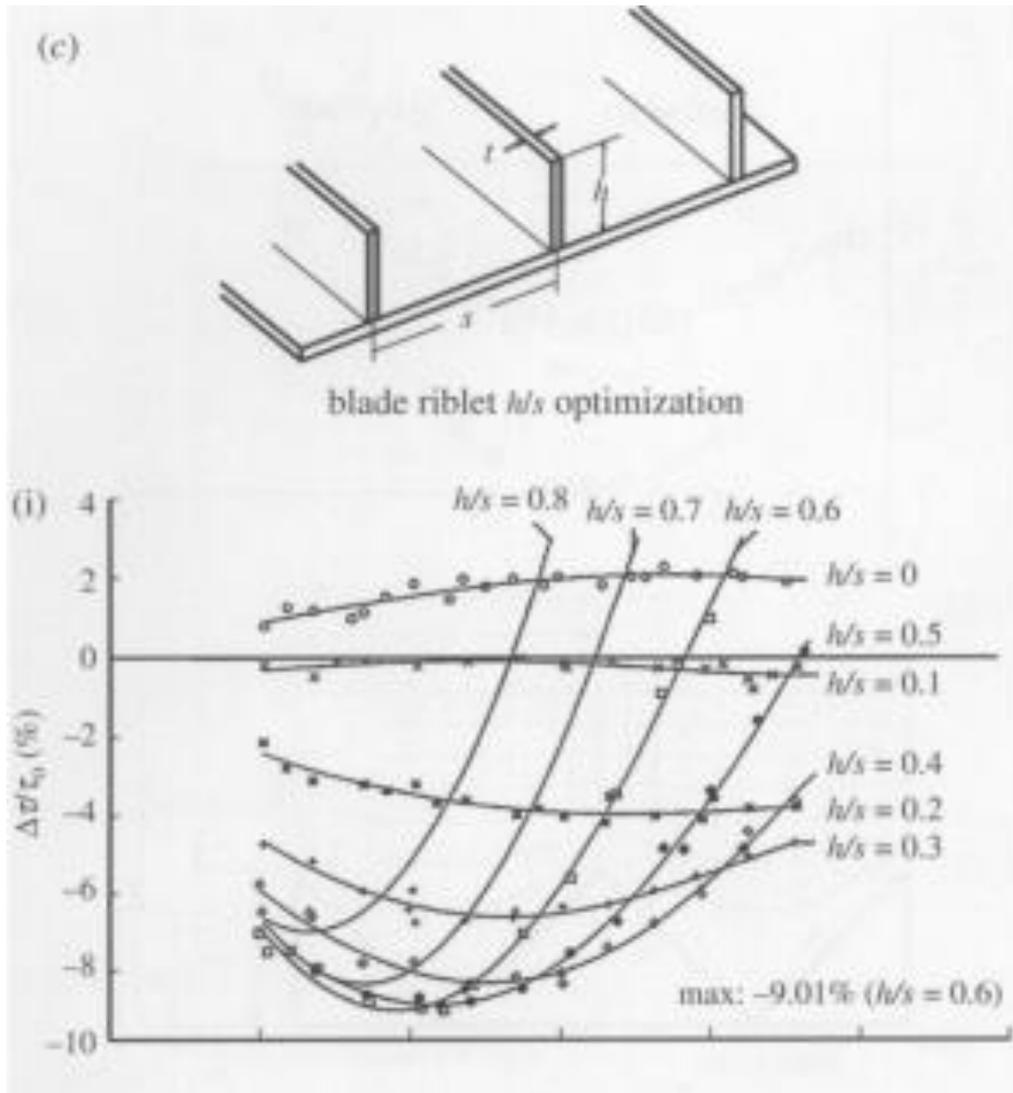


Figura 8: (continua).

La sezione trasversale triangolare è stata quella più comunemente studiata nell'ambito delle nervature bidimensionali, la cui geometria e le prestazioni sono state illustrate in Figura 8(a), dove è stata riposta una schematizzazione delle nervature bidimensionali e la parametrizzazione della riduzione dello sforzo di taglio rispetto all'angolo α per la forma della sezione a dente di sega [8].

La riduzione dello sforzo di taglio nel sottostrato viscoso, inserita nell'asse delle ordinate per tutte tipologie di sezione, è stata indicata con il rapporto adimensionale $\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$, mentre $\Delta\tau = \tau - \tau_0$, dove τ è stato definito in Equazione 1, ha determinato la differenza di sollecitazione tangenziale tra superficie con nervature e la piastra piana. Valori $\frac{\Delta\tau}{\tau_0} < 0$ hanno mostrato un incremento delle performance, al contrario, valori $\frac{\Delta\tau}{\tau_0} > 0$ sono stati correlati ad una riduzione delle prestazioni.

Il numero adimensionale s^+ , esplicitato in Equazione 3, è stato riportato sull'asse delle ascisse.

La curva di prestazione ha concesso la parametrizzazione in funzione dell'angolo di apertura delle nervature, oppure rispetto al rapporto adimensionale tra altezza della nervatura e la spaziatura.

L'ottimizzazione delle performance è stata individuata per $\alpha = 54^\circ$ e ha presentato due insiemi di misurazioni sovrapposti con $\frac{h}{s} = 1$, riportando un massimo $\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = 5\%$ [8].

Per $\alpha = 54^\circ$, la curva di prestazione ottimale ha misurato due insiemi di dati che si sovrappongono, simboleggiati da croci e quadrati; mentre i simboli triangolari hanno presentato $\alpha = 60^\circ$ e, infine, i dati indicati con simboli circolari sono stati relazionati a $\alpha = 90^\circ$, per tutte le curve parametrizzate è stata scelta l'altezza delle nervature analoga alla spaziatura, ovvero $\frac{h}{s} = 1$ [8].

Le nervature con sezione smerlata, rappresentate in Figura 8(b), sono state tendenzialmente parametrizzate rispetto al rapporto h/s . Sebbene non sia stata assegnata alcuna forma convenzionale, la sezione smerlata potrebbe essere generalizzata a una qualsiasi forma concava, senza perdere la veridicità del confronto tra le diverse tipologie di sezione.

La curva di prestazione ha riposto l'ottimizzazione per un valore di $\frac{h}{s} = 0.7$. Anche per questa forma della sezione, una particolare curva di prestazione ha previsto due insiemi di dati sovrapposti, individuati dai simboli circolari e triangolari, in cui $\frac{h}{s} = 0.5$; il simbolo a croce ha raffigurato la parametrizzazione in cui $\frac{h}{s} = 0.7$; mentre il simbolo a stella è stato relazionato a $\frac{h}{s} = 1.0$ [8].

Idealmente la punta delle nervature è stata mostrata sottile e affilata. Tuttavia, la modellazione dello spessore delle punte è stata inserita nella sezione smerlata mostrando risultati benevoli, con una massima riduzione della resistenza di attrito cutaneo fino al 6.5% per $\frac{h}{s} = 0.7$, selezionando uno spessore adimensionale pari a $\frac{t}{s} = 0.015$ [8]. Quest'ultima analisi prestazionale, parametrizzata rispetto allo spessore della sezione semicircolare smerlata, è stata esplicitata in Figura 9.

È stato possibile osservare che, per bassi valori del numero di Reynolds, indipendentemente dalla modellazione dello spessore, le curve di prestazione hanno riportato un comportamento convergente, il quale si traduce in degrado in termini di prestazioni.

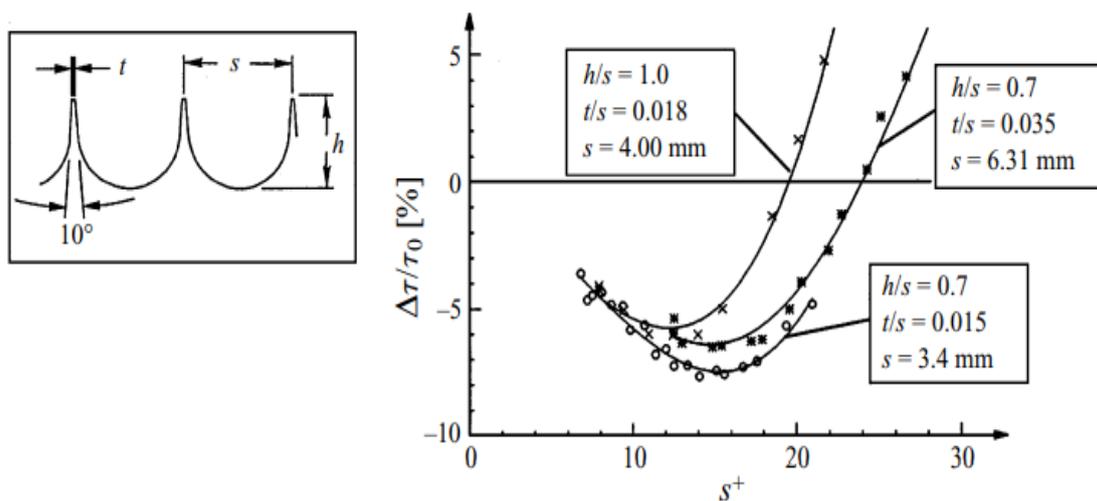


Figura 9: in questa immagine è stato riportato l'andamento di $\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$, parametrizzato rispetto allo spessore delle nervature e fissato un angolo di cresta pari a $\alpha = 10^\circ$, (immagine adattata da [8]).

Le nervature a lama sono state studiate nell'insieme di parametrizzazioni di h/s riportato in Figura 8(c).

Il massimo della riduzione della resistenza è stato individuato per $\frac{h}{s} = 0.5$, gli esperimenti effettuati per tale valore adimensionale hanno dimostrato un miglior comportamento per valori bassi dello spessore. Sostituendo le lame originali, con lame più sottili nella medesima posizione, fissando lo spessore adimensionalizzato $\frac{t}{s} = 0.01$, è stata caratterizzata la riduzione dello sforzo di taglio in funzione dei diversi rapporti $\frac{h}{s}$ [8].

Per mezzo realizzazione di un banco di prova con nervature a lama regolabile è stato rilevato un massimo di riduzione della resistenza pari al 9.9% con dimensioni ottimizzate di $\frac{h}{s} = 0.5$ e $\frac{t}{s} = 0.02$ [8].

A causa della loro struttura debole, la selezione dello spessore ottimale delle punte delle nervature è stata vincolata dalle elevate sollecitazioni localizzate in tale regione. Pertanto, un eccesso di riduzione dello spessore ha implicato un'inefficienza del funzionamento della superficie, in merito all'ostacolo al moto traslatorio dei vortici trasversali. Questo particolare effetto deleterio a cui è stata legata una riduzione delle prestazioni è stato rappresentato in Figura 10.

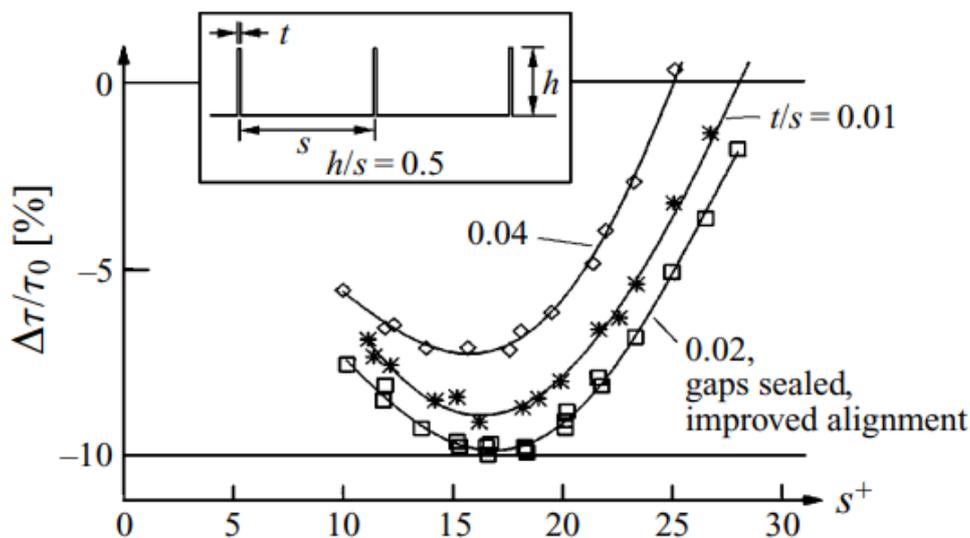


Figura 10: in questo grafico sono state confrontate le diverse curve di prestazione ottenibili per $\frac{h}{s} = 0.5$, inserendo una parametrizzazione dello spessore, (la curva indentificata da $\frac{t}{s} = 0.01$ è analoga a quella inserita in Figura 5c), (immagine adattata da [8]).

Sebbene le tre superfici abbiano mostrato andamenti differenti nella riduzione dello sforzo di taglio, sono stati individuati punti comuni che hanno rispecchiato il meccanismo fisico che descrive il funzionamento di questa categoria di superfici. In particolare, il valore adimensionale della spaziatura, al quale è stato associato il massimo della riduzione della resistenza, è stato collocato nell'intorno di $s^+ \sim 15$, per ciascuna di esse e, allo stesso tempo:

- Per $s^+ \gg 15$, la resistenza è stata aumentata fortemente, in quanto l'eccesso di spaziatura ha provocato una riduzione dello spessore del sottostrato viscoso, permettendo lo scorrimento dei vortici trasversali in una regione più vicina alle scanalature.

- Per $s^+ \ll 15$, è stato indicato, nuovamente, un incremento di resistenza, poiché il discostamento verso valori inferiori da quello ottimale della spaziatura hanno previsto un'azione di ostacolo insufficiente al moto traslatorio dei vortici trasversali.

In Figura 11(a), è stato raffigurato un grafico contenente le curve di riduzione della resistenza per ciascuna delle geometrie indicate in Figura 8, mettendo così in evidenza un confronto diretto, i cui risultati sono stati riassunti in Tabella 2. La sequenza di acquisizione simboleggiata con i quadrati è stata interpolata per la sezione a dente di sega, essa è stata parametrizzata rispetto a $\alpha = 60^\circ$; la curva interpolante i simboli a croce, traslata più in alto, ha indicato la sezione smerlata; infine, quella indicata con le croci, è stata simboleggiata per la superficie con nervature a lama, caratterizzata da $\frac{h}{s} = 0.5$ e $\frac{t}{s} = 0.02$. Sebbene la curva di prestazione relativa ad $\alpha = 54^\circ$ abbia mostrato un comportamento più efficace nel limitare le azioni tangenziali, in Figura 11a è stata inserita la curva corrispondente a $\alpha = 60^\circ$. Quest'ultimo angolo di cresta non ha indotto alterazioni consistenti rispetto ai risultati ottimizzati, tuttavia, ha costituito un compromesso accettabile tra le prestazioni ottenibili e problematiche riscontrabili nell'impiego di macchine per la fresatura [8].

In Figura 11(b) è stato espresso un confronto tra le altezze di sporgenza effettiva effettuato, indicate con h_{ps} , delle nervature a dente di sega, smerlate e a lama, nell'ipotesi di regime laminare. L'altezza di sporgenza effettiva, che ha costituito un parametro favorevole e fondamentale dinnanzi alla riduzione del moto traslatorio dei vortici trasversali, è stata restituita dalla differenza tra l'altezza delle nervature e lo spostamento verso l'alto dell'origine del profilo di velocità (Δ_0), $h_{ps} = h - \Delta_0$. Per trovare lo spostamento verso l'alto dell'origine effettiva, sono state determinate l'altezza e la velocità della linea di corrente indisturbata, a velocità costante, più vicina alla superficie con nervature. Successivamente, è stata determinata l'altezza alla quale il campo di moto al di sopra della lastra piana ha raggiunto la stessa velocità. La differenza tra queste ha costituito l'origine del flusso effettivo. Le nervature a lama, in conformità con il precedente studio riportato, ha mostrato l'altezza di sporgenza effettiva maggiore, seguita, rispettivamente, da nervature smerlate e a dente di sega [8; 9].

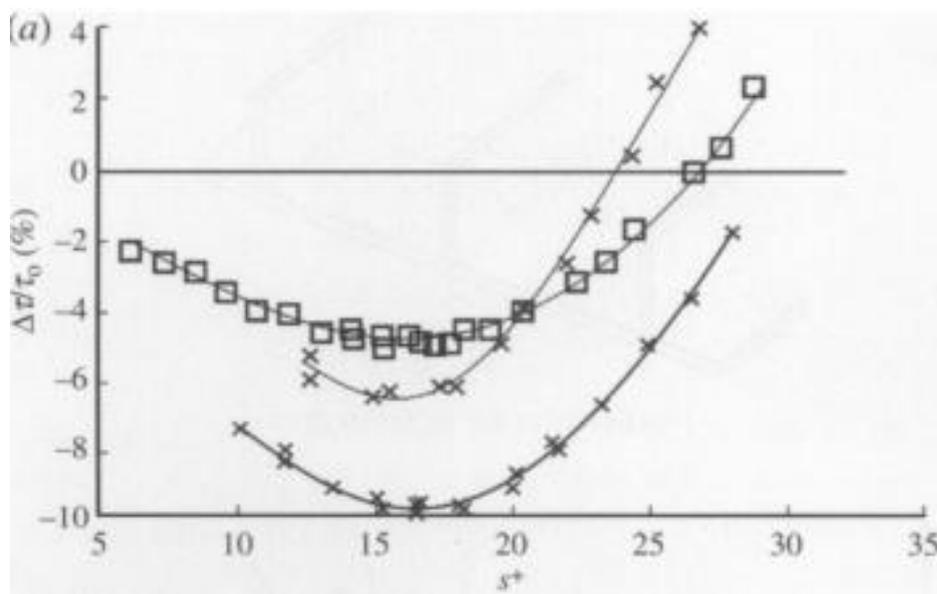


Figura 11: (a) confronto della riduzione della resistenza ottenuta per nervature 2D a dente di sega, smerlate e a lama a parità del rapporto $\frac{h}{s} = 0.5$ [8]. (b) schematizzazione del campo di velocità e di pressione sopra le nervature e confrontate, rispettivamente, con la lastra piana (situata a destra) [9], (Immagini adattate da [11]).

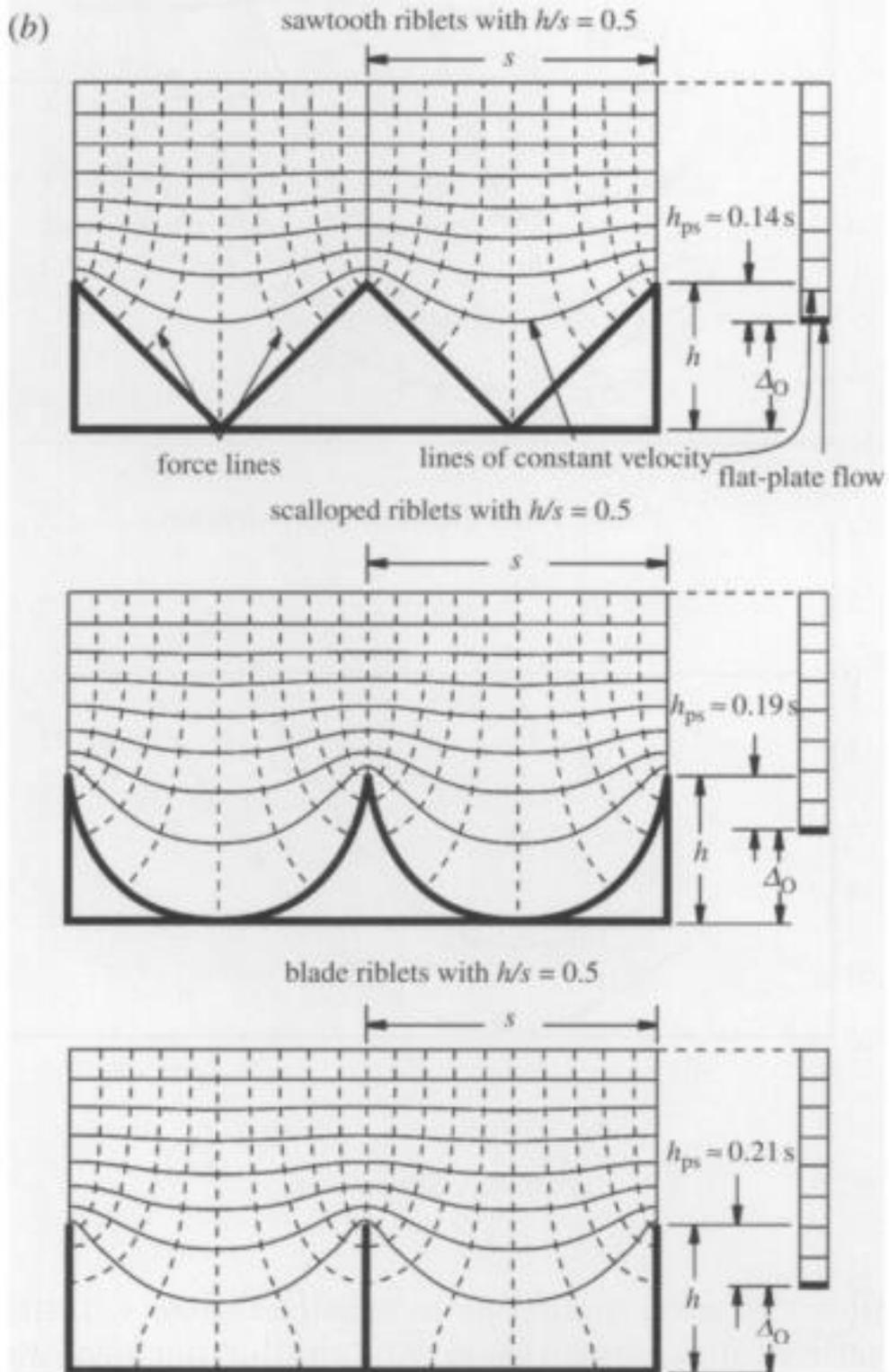


Figura 11: (continua).

TIPOLOGIA SEZIONE 2D	ANGOLO DI CRESTA [°] (α)	PROFONDITÀ DELLA SCANALATURA (h/s)	SPESSORE (t/s)	MASSIMA RIDUZIONE DELLA RESISTENZA (%)	PARAMETRI DI OTTIMIZZAZIONE
Triangolare	54	1	Non modellato	-6	$\alpha = 60^\circ;$ $\frac{h}{s} \sim 1$
	60			-5	
	90			-3	
Smerlata	0	0.5	0	-5	$\alpha = 10^\circ;$ $\frac{h}{s} = 0.7;$ $\frac{t}{s} = 0.015$
	10	0.7	0.015	-7.5	
		1	0.035	-6.5	
Lama	0	0	0.01	2	$\alpha = 0^\circ;$ $\frac{h}{s} = 0.5;$ $\frac{t}{s} = 0.02;$
		0.1		0	
		0.2		-4	
		0.3		-6.5	
		0.4		-8.5	
		0.5	0.01	-8.8	
			0.02	-9.9	
		0.6	0.04	-7.5	
				-9.01	
		0.7	0.01	-8.5	
0.8	-7				

Tabella 3: parametrizzazioni effettuate per le principali sezioni bidimensionali di comune impiego e, per ciascuna di esse è stata riportata la relativa ottimizzazione.

3.2 Riblets 3D e ruolo dell'orientamento delle squame

Il motivo per il quale sono stati condotti studi in merito alle nervature tridimensionali è stato dovuto all'interesse maturato nell'incrementare ulteriormente le prestazioni rispetto alle nervature bidimensionali, al fine di rendere la replica della geometria quanto più simile possibile alla reale pelle di squalo. Le riblets sulla pelle dello squalo, infatti, sono state presentate come segmenti raggruppati, non come strutture continue. È stato, conseguentemente, ipotizzato che una replica della geometria tridimensionale fosse stata in grado di approssimare coerentemente le performance reali.

In questa sede, sono state confrontate le curve rappresentative della riduzione dello sforzo di taglio generato sulle nervature a lama bidimensionali, (descritte precedentemente), con una struttura di nervature tridimensionali [27], costituita da elementi a forma di pinna trapezoidale, dai bordi affilati disposti ad incastro su un supporto piano, rappresentata in Figura 12(a).

Una campagna sperimentale, rivolta allo studio delle nervature tridimensionali, è stata condotta nel 1997 da Bechert e dai suoi collaboratori. Essi hanno disposto le nervature a lama segmentata allineate ad una distanza pari alla spaziatura s , mentre quelle sfalsate ad una distanza pari a $s/2$, essi hanno svolto i primi test all'interno di una galleria del vento, riscontrando, tuttavia, le stesse problematiche dovute alla complessità dei processi di fabbricazione delle riblets continue. Per questo motivo, hanno effettuato delle

misurazioni all'interno del canale petrolifero, schematizzato in Figura 6, permettendo l'ingrandimento delle dimensioni delle nervature di 10 volte rispetto a quelle realizzate per i test in galleria del vento. Come risultato di queste misurazioni è stata affermata una riduzione della resistenza del 7.3%, rispetto ad una piastra di riferimento liscia. Pertanto, dal confronto diretto con le nervature 2D, riportato in Figura 12(b), è stata osservata una riduzione delle prestazioni dell'2.7%, che potrebbe essere stata ridotta grazie ad un'attenta progettazione della pinna, ma probabilmente senza ottenere alcun superamento [5-7].

Una scoperta, che ha destato particolare interesse, è stata incentrata su osservazioni relative all'altezza della nervatura per la quale è stata ottenuta la riduzione della resistenza ottimale. Nel caso di riblets 3D più corte, l'altezza della nervatura, per la quale è stato generato il massimo di riduzione della resistenza, è stata quantificata minore rispetto a riblets 3D di maggior lunghezza che, a sua volta, è stata valutata inferiore rispetto a riblets 2D che hanno un'estrusione infinita. La stessa osservazione è stata correlata a squame di squali di diverse specie aventi diverse lunghezze delle nervature, ma non è stato possibile risalire ad alcuna spiegazione utile [5].

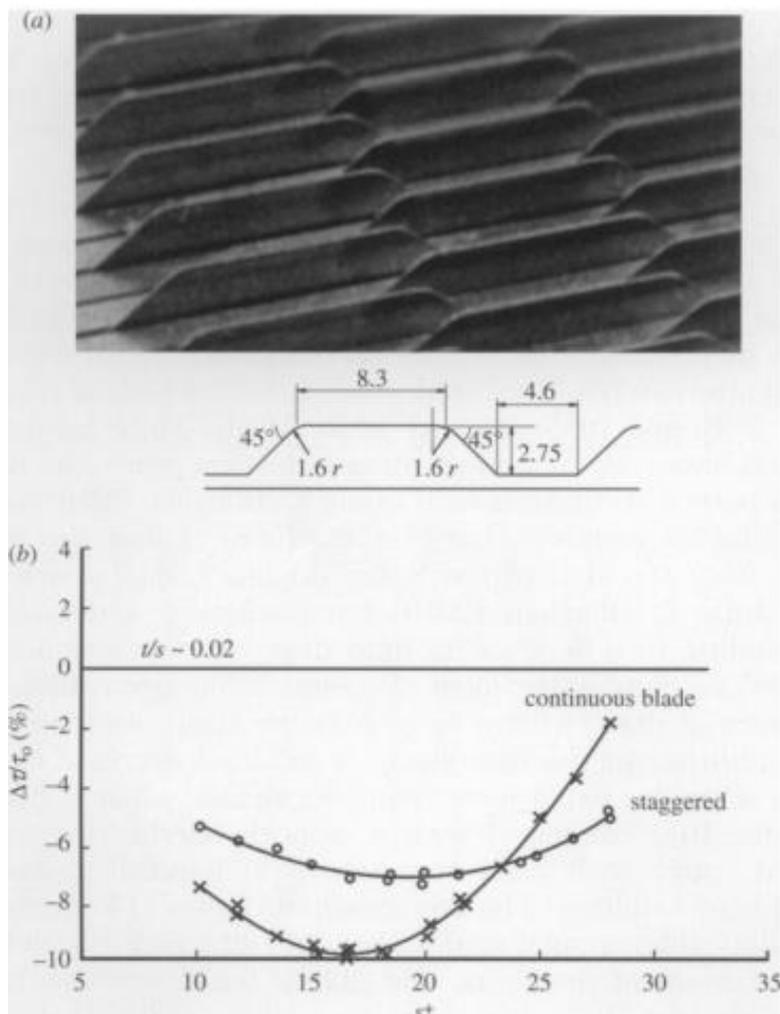


Figura 12: confronto della riduzione della resistenza tra nervature a lama continua ottimizzate e nervature a lama trapezoidale segmentate con geometria ottimizzata, (immagine adattata da [11]).

A seguito di questa analisi, è stato concluso che le squame, dove sono state raggruppate le nervature, hanno contribuito alle prestazioni di alcune varietà di pelle di squalo. L'effetto, da esse generato, è stato descritto attraverso un meccanismo di scambio di pressione al di sotto della superficie scanalata.

Più recentemente, ci sono stati studi che hanno indagato le proprietà di riduzione della resistenza aerodinamica delle squame di squalo considerando la sommità della nervatura sia come struttura statica che come membro flessibile, possibilmente controllabile [13]. Utilizzando le scaglie modellate in resina epossidica dalla pelle dello spinarolo (*Squalus acanthias*), mostrate nella Figura 13(a), dove in (i) è stata riportata la vista dall'alto, in (ii) è stata rappresentata la vista laterale con un angolo di inclinazione di 45° e, infine in (iii, iv) è stata raffigurata la vista dall'alto con angolo di inclinazione di 45° rispetto alla direzione del flusso, Jung e Bhushan, insieme ai loro collaboratori, hanno ottenuto una diminuzione della caduta di pressione, corrispondente a una diminuzione della resistenza del fluido, rispetto a una superficie liscia in un esperimento con cella a flusso rettangolare. Misurando la caduta di pressione dall'ingresso all'uscita di un condotto è stata quantificata la resistenza del fluido. Oltre al primo studio, in un esperimento simile è stata realizzata una diminuzione minima della caduta di pressione utilizzando nervature allineate segmentate fabbricate su acrilico, rappresentate in Figura 13(b), fissate su una sezione di prova in acrilico liscia. I risultati dello studio della scala epossidica stampata sono stati mostrati nella Figura 14(a), confrontando la caduta di pressione nel flusso all'interno di un tubo rettangolare su una superficie piana epossidica con una superficie replicante la pelle di squalo. Invece, i risultati dello studio della costolatura a lama segmentata sono stati visualizzati nella Figura 14(b), dove è stata confrontata la caduta di pressione provocata sulla superficie acrilica piana all'interno di un condotto rettangolare con la superficie dello stesso materiale ma avente nervature a lama segmentata tridimensionali, i dati vengono rapportati alla funzione di caduta di pressione prevista per una superficie idrofila. La linea continua è stata correlata ad una superficie idrofila di riferimento, i simboli interpretati da cerchi sono stati relazionati alla superficie acrilica piana, mentre i quadrati aperti hanno indicato la superficie acrilica con nervature a lama segmentata. È stato notato che alcuni squali hanno presentato squame con la sommità delle nervature attaccata in modo piuttosto flessibile alla superficie sottostante della pelle. Queste scale sono state in grado di cambiare il loro angolo di beccheggio. Quando la pressione sotto gli attacchi della bilancia è stata modificata, l'elemento flessibile, variando la posizione del bordo d'uscita della bilancia, ha potuto sollevarsi [13; 28].

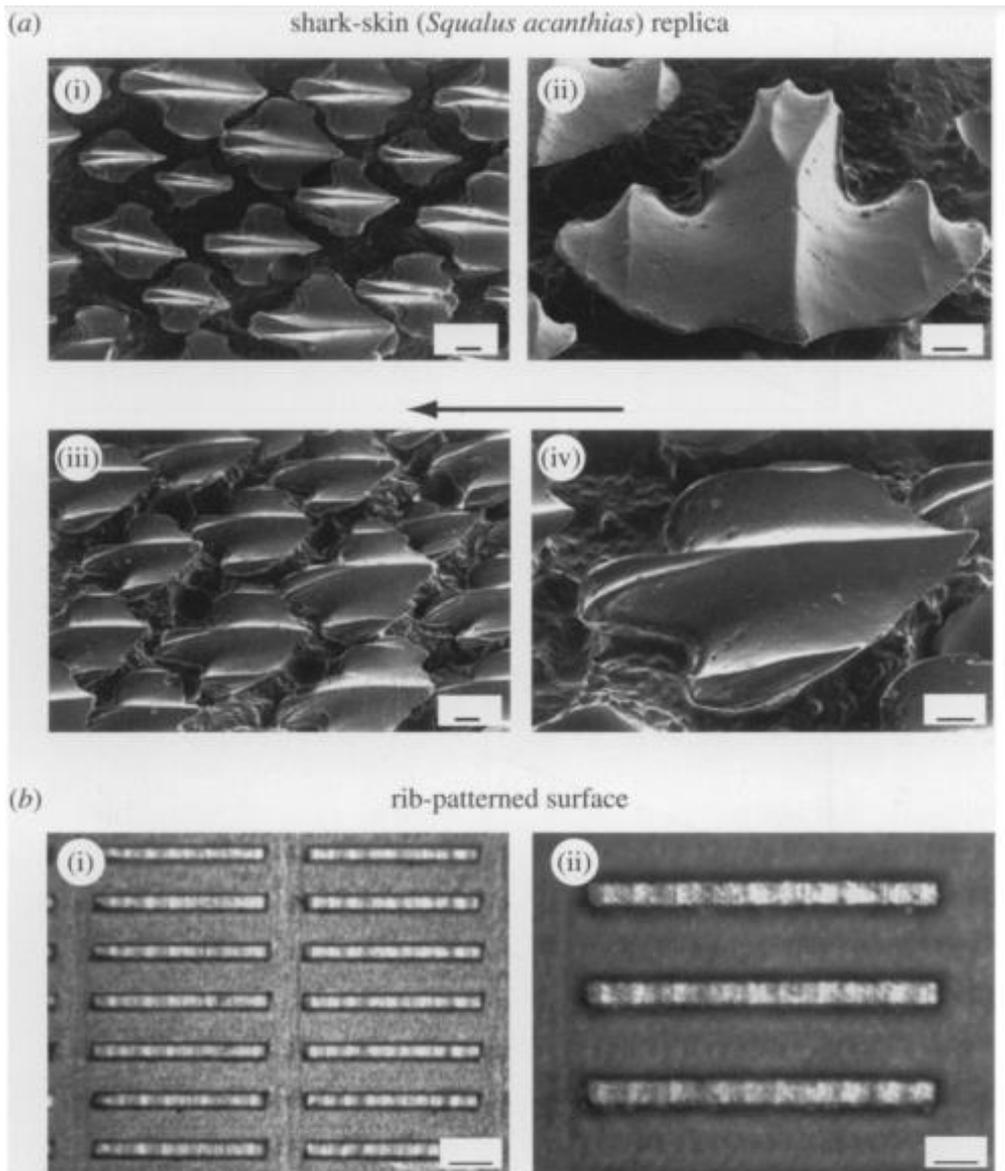


Figura 14: (a) Micrografie, realizzate con microscopio a scansione (SEM), della replica della pelle di squalo modellata in resina epossidica, dimensioni della scala: (i,iii) $100\mu\text{m}$; (ii, iv) $50\mu\text{m}$. (b) Riblets a lama segmentata fabbricate in acrilico, dimensioni della scala: (i) $200\mu\text{m}$; (ii) $100\mu\text{m}$. (immagine adattata da [28]).

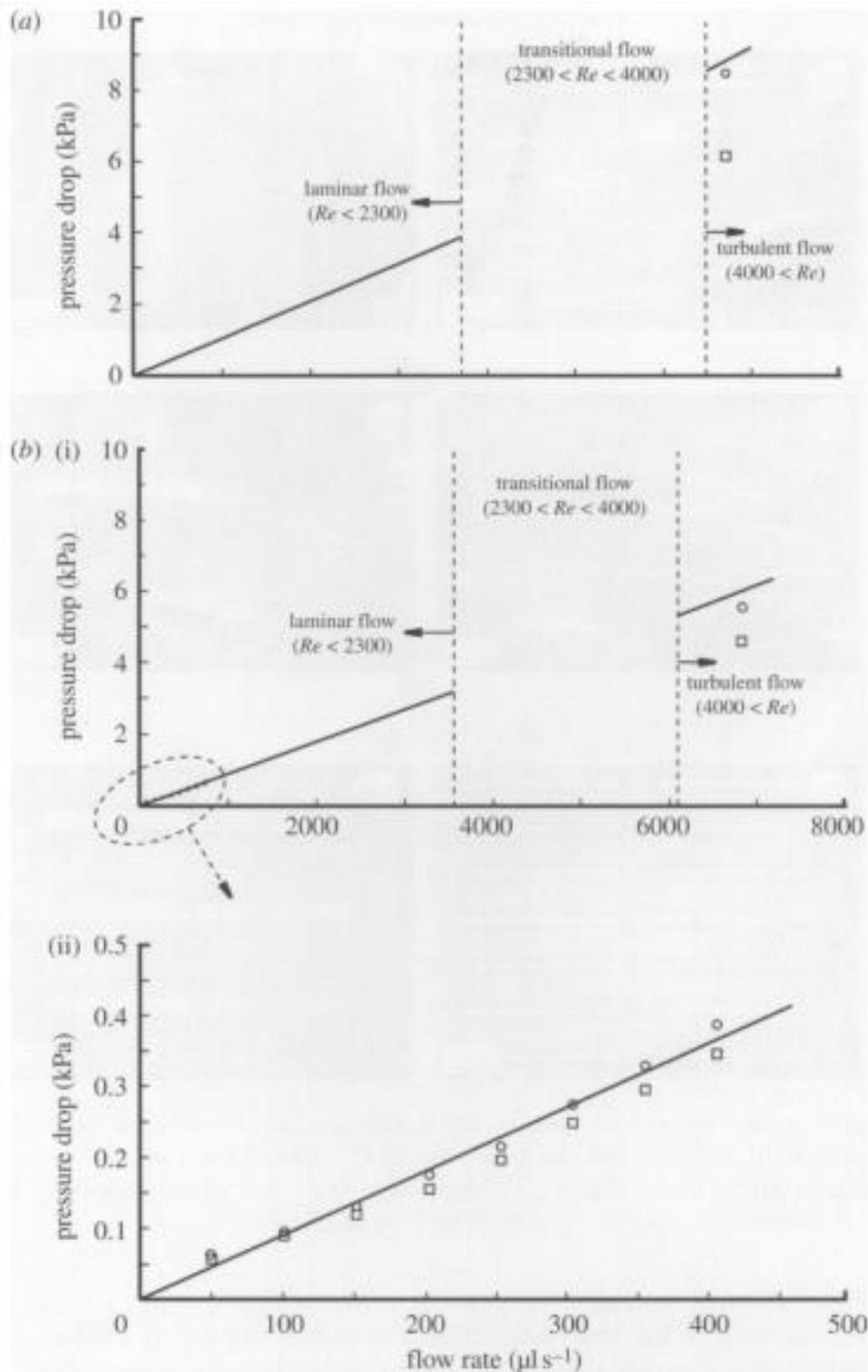


Figura 14: (a) andamento della caduta di pressione in funzione della portata per un flusso in un condotto rettangolare attraverso una superficie in resina epossidica. (b) andamento della caduta di pressione per una superficie in acrilico attraversata da un flusso immerso in un condotto rettangolare. (Immagine adattata da [28]).

3.3 Contributo dell'orientazione delle nervature all'interno dei placoidi

Questo paragrafo è stato dedicato alla ricerca dell'orientazione ottimale delle creste delle nervature all'interno delle squame. La ricerca dell'orientazione ottimale è stata correlata alla capacità della superficie di indurre una riduzione della viscosità mediante un meccanismo fisico chiamato lubrificazione idrodinamica. Dai, Wei e il loro gruppo di ricerca hanno condotto una campagna sperimentale in merito alla lubrificazione idrodinamica, allo scopo di comprendere il meccanismo fisico di riduzione della resistenza ad essa associato [29].

Essi hanno replicato, attraverso la stampa 3D, la struttura superficiale della pelle di squalo, realizzando una serie di scanalature sulla superficie, mostrate in Figura 15, e disponendo diverse orientazioni rispetto alla direzione del campo di moto del fluido. Dopodiché è stata quantificata la performance della superficie grazie all'impiego di nanoparticelle di diamante che, a seconda della loro distribuzione, ha permesso di associare tale fenomeno rispettivamente al gradiente di velocità. È stata resa possibile l'osservazione delle particelle per mezzo delle caratteristiche di fluorescenza delle nanoparticelle, che hanno svolto la funzione di additivi traccianti, ampiamente impiegati nell'ambito dello studio della lubrificazione [29].

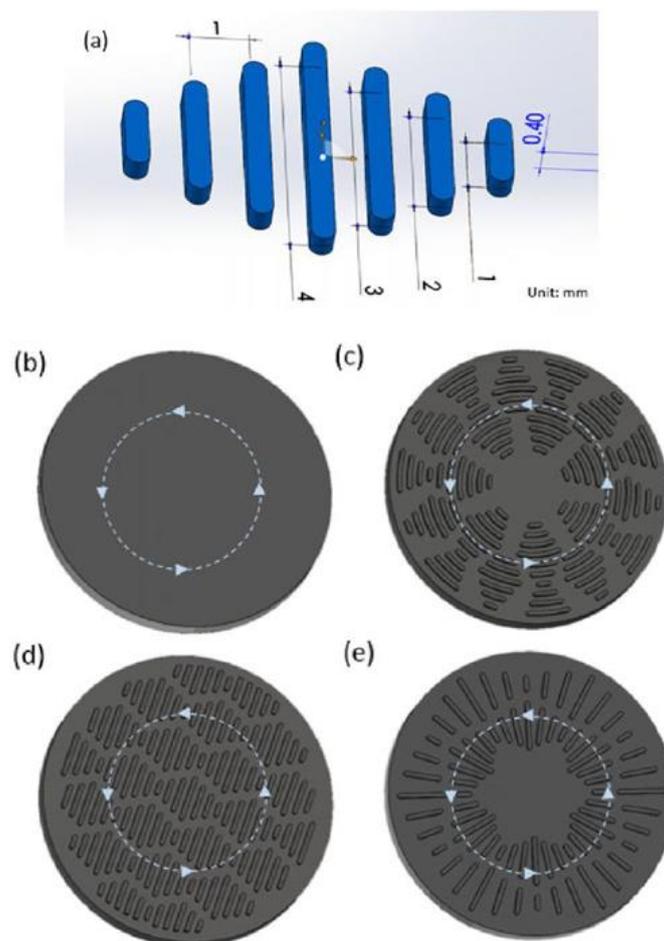


Figura 15: (a) modello semplificato della superficie a pelle di squalo; (b) superficie liscia per il confronto; (c) una superficie strutturata con orientamento parallelo della scala della pelle di squalo (0°); (d) superficie strutturata con orientamento misto a pelle di squalo (45°); (e) superficie strutturata con orientamento perpendicolare della scala della pelle di squalo (90°). (immagine adattata da [29]).

Lo scopo è stato individuato, pertanto, nella stima della riduzione della resistenza provocata dalla superficie al variare della velocità nello spazio, parametrizzando la superficie scanalata rispetto allo spazio che intercorre tra due differenti creste e l'altezza di queste ultime. In generale, tali superfici sono state prodotte con fresatura e saldatura, soprattutto qualora queste ultime siano state strutturate a multistrato. La parte centrale è stata privata di scanalature per evitare errori di misura dello strumento a causa del valore minimo della velocità [29].

La superficie a pelle di squalo stampata con polimeri è stata successivamente immessa all'interno di uno strumento chiamato reometro, illustrato in Figura 16. Esso è stato composto da 2 piattelli, uno fisso, su cui è stata calettata la superficie e, uno rotante, in cui è stata applicata una coppia che ha messo in rotazione il fluido incomprimibile, composto da acqua deionizzata, la quale ha svolto la funzione di separatore delle 2 superfici. Quelli di vecchia generazione, indicati in Figura 16(a), hanno causato inefficienze legate all'espulsione di una porzione di acqua sotto una elevata velocità di taglio. In questo caso, è stato ridotto il volume di acqua e, allo stesso tempo, è stato riempito di un'intercapedine d'aria causando errori non trascurabili nella stima dello sforzo di taglio e della viscosità. Per questo motivo, la configurazione di nuova generazione risulta ottimale, rappresentata Figura 16(b), in quanto è stato introdotto un serbatoio aggiuntivo, al fine di conservare il liquido, per mantenere il volume costante. Ad ogni prova, è stato aggiunto un volume di 10ml nel serbatoio supplementare, per compensare l'intercapedine d'aria generato dalla fuoriuscita [29].

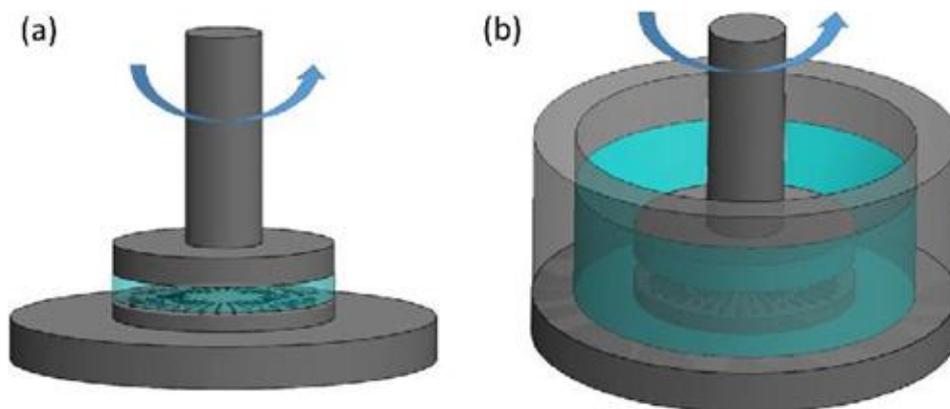


Figura 16: illustrazione schematica della misurazione della viscosità della superficie testurizzata; (a) strumento originale; (b) nuovo design, (immagine adattata da [29]).

La valutazione della viscosità è stata tradotta nel rapporto tra sforzo di taglio e velocità di taglio. Al fine di una miglior visualizzazione della distribuzione delle particelle di diamante è stato impiegato un particolare microscopio a scansione laser, realizzato per scansionare una vasta area senza riduzione delle superfici. Le immagini dei diamanti distribuite sui dischi sono state raccolte e analizzate con uno spettrometro fatto in casa dotato di una telecamera per la luce stellare e un contatore di fotoni. Oltre alla superficie liscia, sono state orientate le creste della superficie, parallelamente, ortogonalmente e miste rispetto alla direzione del moto, come mostrato in Figura 15. Tutte hanno riportato un'altezza media della cresta pari a 0.4mm, mentre la spaziatura è stata variata nella superficie a seconda della disposizione, raffigurate in Figura 15(a) [29].

La disposizione delle creste a 90 gradi rispetto alla direzione del flusso è stata tradotta in un'orientazione radiale poiché, la coppia applicata al piattello ha originato un moto fluido rotazionale. Ciò ha comportato

una spaziatura crescente in direzione radiale e, in particolare, è stata limitata tra 1.5 e 2 mm, al contrario di quelle parallele e miste, dove la spaziatura è stata mantenuta all'incirca costante e pari a 1mm.

Il rapporto tra altezza e spaziatura è stato mantenuto costante e pari a 0.4, per orientazione parallela e mista e, circa 0.27, per quelle a 90 gradi. La barra di errore ha riportato la deviazione standard di tre esperimenti ripetibili. Tuttavia, siccome il campo di moto è stato individuato radiale, la velocità di taglio è stata incrementata all'aumentare del raggio. Quindi, sono stati acquisiti i valori massimi in prossimità della periferia, poiché il fluido è stato accelerato radialmente dalla forza centrifuga [29].

In questa trattazione, la determinazione istantanea della viscosità è stata considerata fine a sé stessa, ma, è stata valutata per studiare come la diversa orientazione delle creste abbia restituito valori differenti della viscosità. In particolare, per regimi di moto in cui la velocità di taglio è stata misurata di bassi valori, quindi in prossimità del centro, (caratteristiche di strato limite laminare), la superficie più performante è stata attribuita a quella più liscia, al contrario quella avente creste parallele ha mostrato i valori di viscosità rispettivamente più alti. Osservando la Figura 17, per valori della velocità di taglio più elevati, ossia alla periferia, (caratteristiche del moto turbolento), la superficie che ha indotto una minor viscosità è la disposizione ortogonale. È stato dedotto quindi, dalle osservazioni sperimentali, che la superficie a pelle di squalo con orientazione a 90° ha riportato le migliori condizioni di riduzione della resistenza grazie alla viscosità inferiore a parità di velocità di taglio, nel confronto tra le diverse superfici. In base a quanto descritto fino ad ora, è stato correlato il gradiente parallelo di velocità, che può variare da 0 a 3mm, (mentre quello normale da 0 a 25mm), con la distribuzione di particelle di diamante individuata dal microscopio. In questo caso il gradiente parallelo di velocità ha giocato un ruolo fondamentale nella generazione della componente di resistenza della forza idrodinamica. L'orientamento della scala perpendicolare, riportato in Figura 17(d), ha mostrato la massima uniformità di distribuzione delle particelle che ha indicato il gradiente di velocità più basso [29].

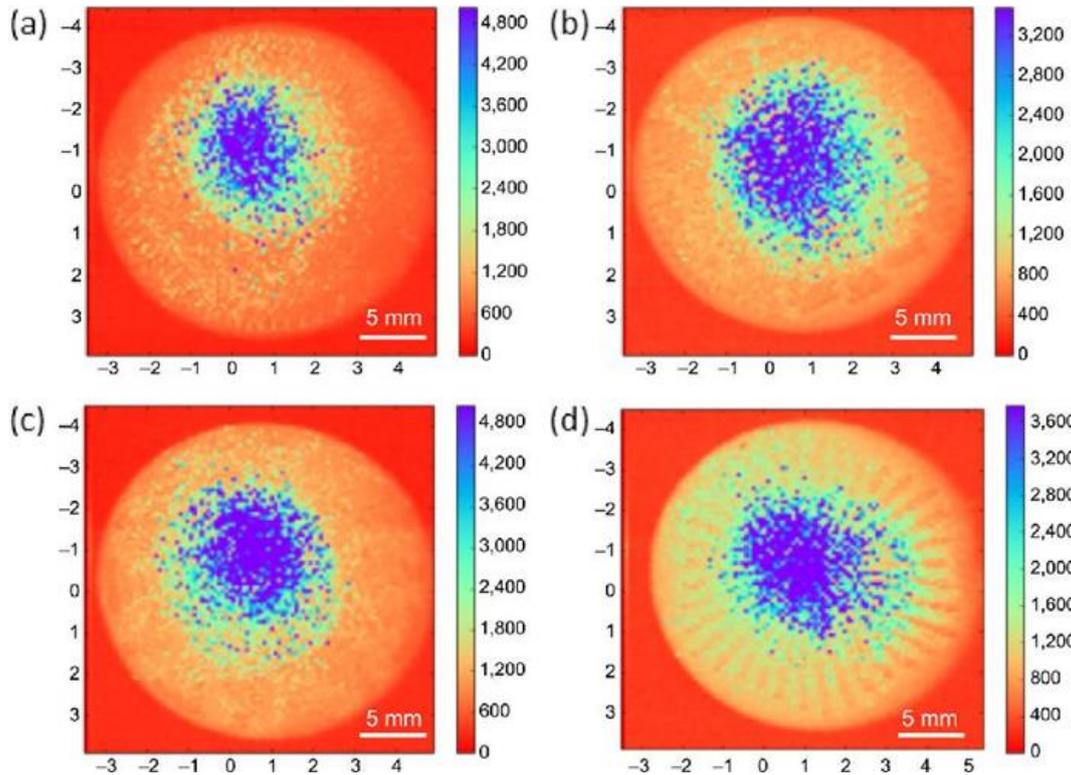


Figura 17: Distribuzione delle particelle di diamante sulle repliche delle superfici della pelle di squalo con diverse scale di orientazione dopo la misurazione di viscosità effettuata a 400 s^{-1} . (a) liscia; (b) parallela, 0° ; (c) mista, 45° ; (d) perpendicolare, 90° ; (immagine adattata da [29]).

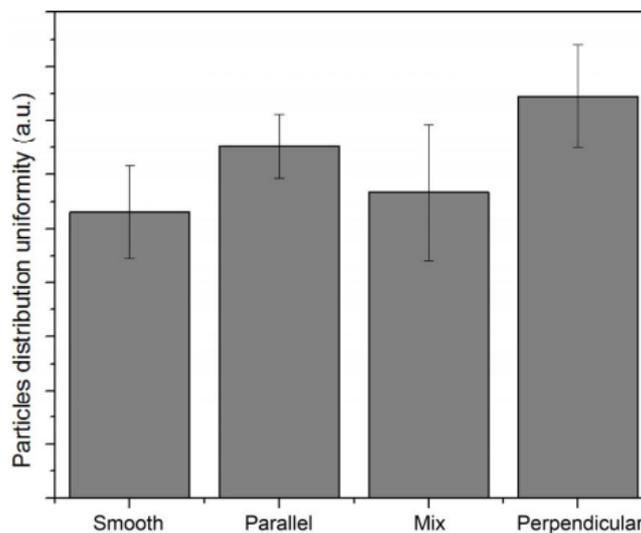


Figura 18: Uniformità della distribuzione delle particelle di diamante confrontata per le differenti scale di orientazione delle superfici ispirate alla pelle dello squalo dopo la misurazione di viscosità effettuata a 400 s^{-1} , (immagine adattata da [29]):

Per comprendere quantitativamente l'uniformità della distribuzione, distinta in Figura 18, la scansione lineare è stata condotta attraverso il centro delle superfici. Tale uniformità, quantificata per le diverse superfici, visualizzabile in Figura 17, è stata calcolata come il reciproco di deviazione dell'intensità della luce. In conclusione, tanto minore è stata rilevata la deviazione dell'intensità luminosa indicata, tanto maggiore è stata valutata l'uniformità della distribuzione di particelle e, quindi, tanto minore il gradiente

parallelo di velocità. Pertanto, l'orientazione a 90° ha la massima uniformità della distribuzione, per cui il gradiente di minor velocità. La resistenza è stata definita, infatti, come una misura dell'energia necessaria per trasferire quantità di moto dal fluido alla superficie. Un minor gradiente di velocità è stato tradotto in una minor energia necessaria per trasferire quantità di moto tra gli strati di fluido e tra fluido e parete. Lo studio in oggetto è stato considerato un potente strumento per confermare sperimentalmente il meccanismo di riduzione della resistenza per effetto della lubrificazione su superfici aventi questo tipo di morfologia [29].

È stato realizzato un grafico, mostrato in Figura 19, in cui nelle ascisse è stato riportato il numero adimensionale S^+ , definito nell'Equazione 4, che è stato modificato al variare dei parametri geometrici rispetto alla superficie liscia (variato da 0.3 a 0.9) e, nelle ordinate, il rapporto tra la viscosità della superficie a pelle di squalo e la superficie liscia. Se tale rapporto è stato indicato con un valore maggiore di uno, ciò ha implicato che la viscosità è stata aumentata, al contrario se tale rapporto ha assunto un valore inferiore a uno, ciò ha significato una riduzione della viscosità [29].

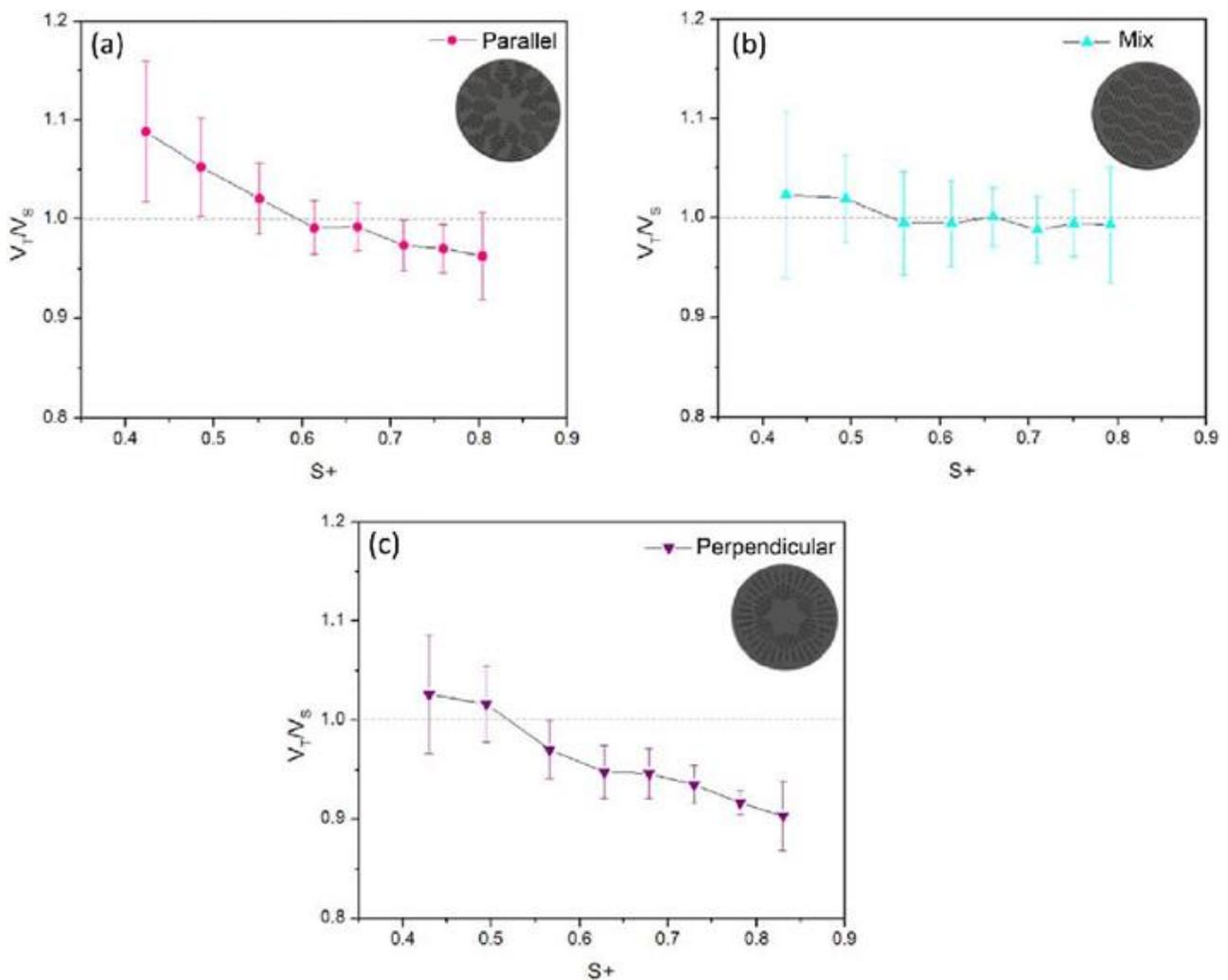


Figura 19: effetto di riduzione della viscosità della superficie a pelle di squalo, comparata con la superficie piana di riferimento, in funzione del numero s^+ : (a) parallela; (b) mista; (c) perpendicolare, (immagine adattata da [29]).

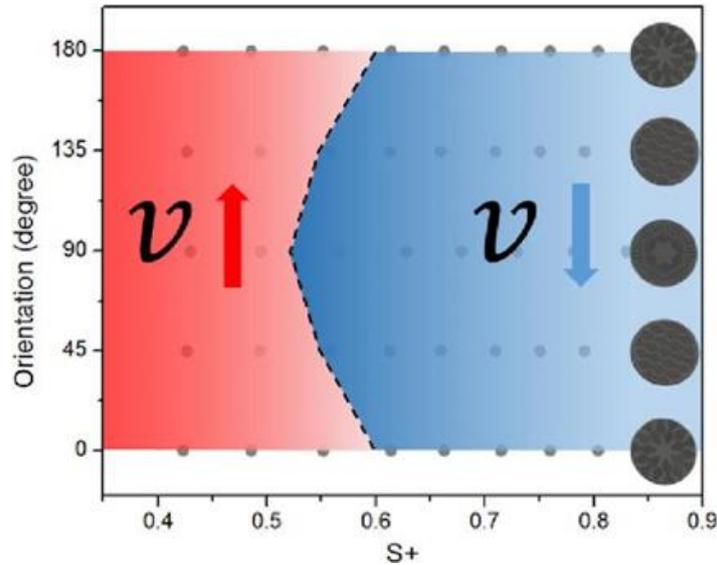


Figura 20: rappresentazione della mappa di viscosità della superficie a pelle di squalo con differenti scale di orientazione (da 0° a 90°), (immagine adattata da [29]).

Tutte le tipologie di orientazione hanno mostrato un comportamento simile, osservabile in Figura 19, l'effetto di riduzione della viscosità rispetto alla superficie liscia è stato rilevato più significativo all'aumentare di s^+ . Il numero di transizione s^+ dell'orientamento parallelo è stato individuato nel grafico a 0.6, mentre la superficie mista non ha mostrato una riduzione significativa della viscosità, mostrando un s^+ di transizione a 0.55, per la superficie perpendicolare, invece, è stata osservata una transizione per $s^+ = 0.52$. È stata schematizzata l'orientazione delle superfici parallele, miste e perpendicolari rispettivamente con un angolo, definito rispetto alla direzione del flusso, di 0°, 45°, 90° [29].

Nella mappa riportata in Figura 20, è stato possibile distinguere due regioni separate dalla linea tratteggiata, dove quest'ultima ha espresso la transizione per le diverse orientazioni. È stato notato che, per una data superficie, a sinistra della linea di transizione ha prevalso l'incremento della viscosità mentre nella regione di destra ha dominato l'effetto di lubrificazione e di riduzione della viscosità. L'orientazione della scala a 90° ha mostrato dei risultati che hanno confermato ciò che è stato riportato dal metodo di distribuzione delle particelle in correlazione alla riduzione della viscosità in funzione dell'uniformità di tale distribuzione. In particolare, per la scala di orientazione perpendicolare è stato visualizzato il più ampio intervallo di valori di S^+ , in cui la viscosità è stata ridotta e, allo stesso tempo, il più piccolo intervallo di valori di S^+ , quando il regime è stato mantenuto ancora laminare, in cui la viscosità è stato aumentato. La massima riduzione di viscosità è stata collocata intorno al 9% [29].

4. METODI E PROCEDIMENTI PER LA FABBRICAZIONE DELLE RIBLETS

4.1 Materiali e tecniche per la realizzazione di superfici micro-scanalate

Scegliendo la pelle di squalo come modello di replica e il micro-rilievo e micro-stampaggio come metodi di fabbricazione del materiale, è stata dimostrata l'efficacia della tecnologia di micro-replica della morfologia esterna della pelle dello squalo. L'analisi preliminare sulla precisione del processo ha indicato che la tecnologia di fabbricazione scelta ha potuto replicare la morfologia esterna della pelle con buona approssimazione, il che ha permesso la convalida del metodo per la realizzazione di un ampio insieme di applicazioni sia in ambito industriale sia per campagne sperimentali [30].

Han, Xin e Zhang hanno elaborato nel loro laboratorio questa procedura di bio-replicazione della pelle di squalo basata su un particolare processo dove, in primo luogo, sono state pretrattate le pelli di squalo campionate per ottenere i modelli biologici per la tecnologia di formatura bio-replicata. In secondo luogo, sono state prese la micro-goffratura e il micro-stampaggio come due tipi di metodi di formatura del materiale e ottenere gli stampi di micro-replica. Infine, sono stati replicati gli stampi mediante colata polimerica al fine dell'ottenimento della morfologia biomimetica della pelle di squalo. Inoltre, è stato verificato che le tecnologie di replica comunemente utilizzate sono state considerate adatte solo per oggetti aventi angolo di smusso ottuso, mentre le squame di squalo sono state visualizzate cuneiformi inclinate, ciò ha implicato l'inserimento di ulteriori requisiti sulla liquidità del materiale e sulla sua sformatura [30].

La prima parte, in cui è stato effettuato il pretrattamento, ha incluso la pulizia, la fissazione chimica, la ripulitura, la disidratazione e l'essiccazione, il cui scopo è stato quello di mantenere il prototipo biologico e migliorare la resistenza meccanica del materiale. I modelli impiegati in questo studio sono stati campionati dalla specie *Carcharhinus Branchyurous* (1.4 m di lunghezza) venduto sul mercato. Come primo passo, sono stati rimossi due fogli di pelle fresca, di dimensioni 50mm x 50mm, dalle posizioni simmetriche e, da essi, sono stati rimossi i tessuti sottocutanei; come secondo passo, sono stati lavati i rivestimenti con acqua distillata e conservate a 4°C per sei ore in un liquore glutaraldeide (2.5% di concentrazione); il terzo passaggio ha previsto il lavaggio con una soluzione tampone di fosfato e l'immersione in una soluzione acquosa di etanolo per la disidratazione; infine, essiccando a 60°C, sono state ottenute le sagome di pelle di squalo. Per evitare la deformazione, è stata premuta una lastra piana esercitando un certo peso sull'oggetto durante i procedimenti elencati precedentemente.

In Figura 21(a) è stato mostrato il modello ispirato alla morfologia della pelle dello squalo. È stato osservato che la pelle dello squalo è stata ricoperta da squame placoidi con disposizione a diamante, sulle quali sono presenti sottili scanalature longitudinali (quasi 50µm di larghezza), composte da smalto e, inoltre, sono state distribuite spine affilate e una piastra di base rettangolare profondamente incorporata nella pelle. Pertanto, le spine e la piastra hanno formato una struttura solida paragonabile ad una trave a sbalzo, come riportato in Figura 21(b).

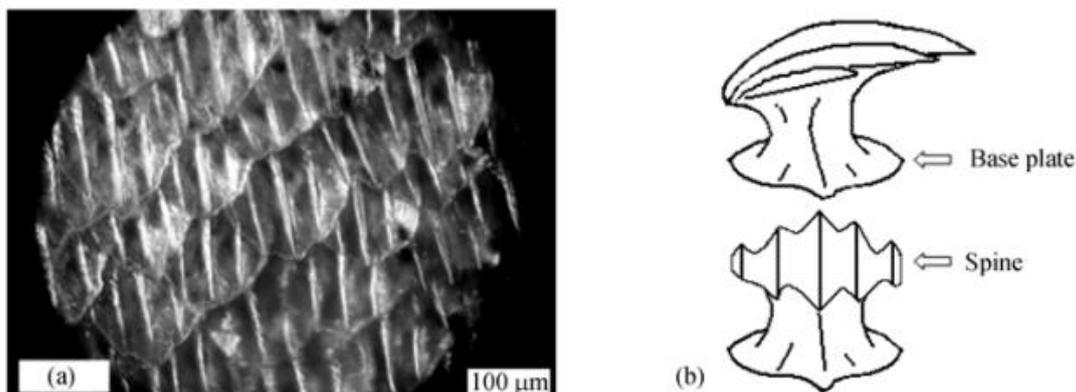


Figura 21: morfologia della superficie della pelle di squalo e della struttura di una singola scaglia. (a) micrografia ottica del modello a pelle di squalo (b) illustrazione di una singola squama, (immagine adattata da [30]).

Per quanto riguarda la seconda fase del processo, chiamata micro-goffratura, illustrata in Figura 22(a), è stata suddivisa in quattro ulteriori fasi: riscaldamento del substrato, impilamento delle sagome e pressatura isostatica, sformatura flessibile e replica dello stampo.

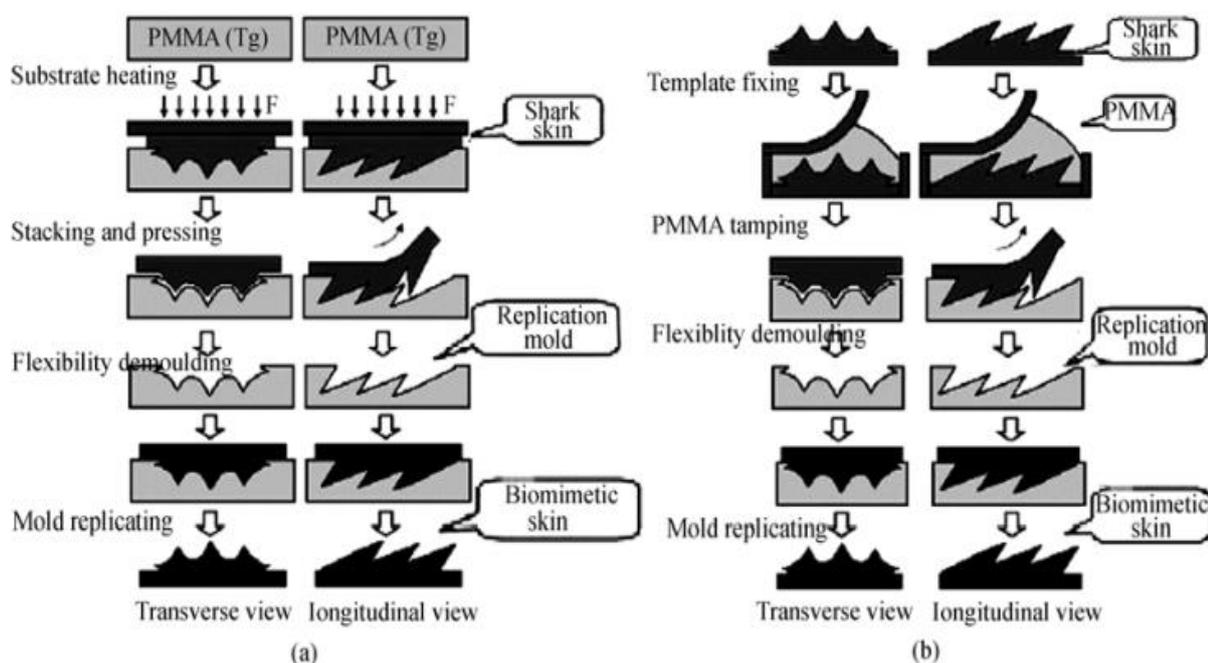


Figura 22: illustrazioni del processo di micro-replicazione per un modello della pelle di squalo. (a) è il metodo di micro-goffratura; (b) è il metodo di micro-stampaggio, (immagine adattata da [30]).

Come substrato è stata scelta una lastra piatta in polimetilmetacrilato, (abbreviato PMMA), di dimensioni 80 mm x 80 mm x 5 mm. Prima di tutto, la lastra di PMMA è stata riscaldata fino alla sua temperatura del vetro di 105°C, quindi la maschera di pelle è stata impilata su di essa con il lato della scaglia rivolto verso il basso. In secondo luogo, in base all'area del modello, è stata applicata pressione isostatica sul modello per 30 min. In terzo luogo, è stata abbassata lentamente la temperatura a 70°C mantenendo la pressione costante, quindi è stata effettuata la sformatura, ottenendo così lo stampo di micro-replicazione, come

mostrato nella Figura 23(a). Infine, la gomma silconica, vulcanizzata a temperatura ambiente RTV-II 5230, è stata selezionata come materiale di replica. Il prepolimero e l'agente indurente sono stati miscelati in un rapporto di massa di 1000:1 e degassati in un essiccatore; quindi, la miscela è stata versata sulla superficie dello stampo e degassata nuovamente. Dopo l'indurimento e la sformatura, è stata ottenuta la pelle di squalo biomimetica, come mostrato nella Figura 23(b).

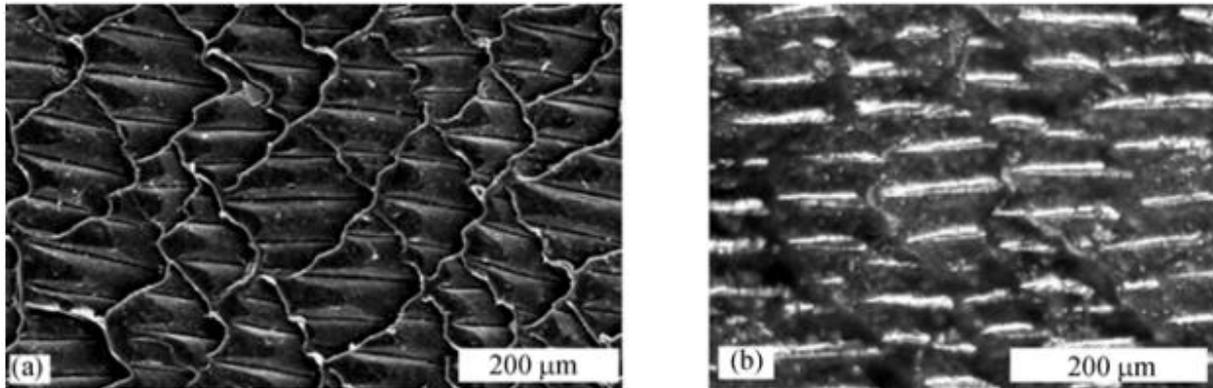


Figura 23: illustrazione delle repliche della pelle di squalo realizzate con la tecnica di micro-goffratura. (a) è la fotografia SEM dello stampo micro-goffrato; (b) è la micrografia ottica della pelle di squalo biomimetica, (immagine adattata da [30]).

È stata individuata una problematica, basata sulla leggera liquidità del PMMA, dovuta ad una porzione di PMMA che ha filtrato sotto le spine delle squame, il che ha provocato il distacco delle squame biomimetiche. Pertanto, il PMMA filtrato ha ostacolato inevitabilmente la sformatura, quindi il controllo dell'ordine e della direzione di sformatura sono state considerate le questioni chiave.

Per quanto riguarda il metodo di micro-stampaggio. Come mostrato nella Figura 22(b), il processo del metodo di micro-stampaggio è stato considerato simile a quello del metodo di micro-goffratura, tranne per il fatto che è stato tamponato direttamente il polimero non polimerizzato sulle pelli di squalo per formare lo stampo di micro-replica. Questo metodo ha richiesto che il tasso di restringimento del polimero, utilizzato come materiale dello stampo, sia stato valutato sufficientemente basso e che il polimero sia stato considerato adatto alla sformatura. La polvere di resina acrilica a base dentale (polvere di omopolimerizzazione PMMA e agente evocatore (BPO) e la resina liquida acrilica a base dentale (MMA e agente di reticolazione) sono state utilizzate come materiale bicomponente, che ha generato il polimero non cristallino PMMA nella reazione di polimerizzazione a catena. Il tasso di restringimento del PMMA è stato compreso tra 0,2% -0,6%, che ha contribuito alla precisione dimensionale della formatura dello stampo. Inoltre, nel processo di polimerizzazione del PMMA è stato presente un periodo di impasto, durante il quale non è stato avvertito alcun fenomeno di natura viscosa quando è stato pressato sulla scheda madre. Due componenti sono stati miscelati in un rapporto di massa di 2:1 e degassati in un essiccatore sottovuoto. Durante il periodo dell'impasto, il prepolimero è stato compresso sulla pelle dello squalo in virtù di una piastra piana, in modo che abbia riempito completamente gli spazi vuoti. Dopo l'indurimento, la sformatura flessibile e la colata RTV-II 5230, sono stati fabbricati lo stampo di micro-replicazione e la pelle di squalo biomimetica, come mostrato nella Figura 24(a) e Figura 24(b).

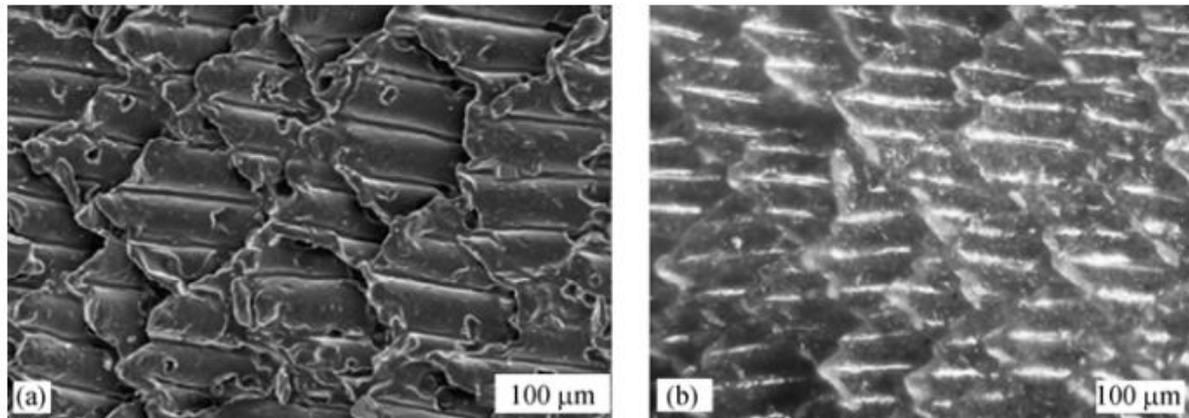


Figura 24: illustrazioni dello stampo replicato e della pelle di squalo biomimetica con il metodo del micro-stampaggio. (a) è la fotografia SEM dello stampo micro-stampato, (b) è la micrografia ottica della pelle di squalo replicata, (immagine adattata da [30]).

La forma del solco e l'obliquità delle scaglie di squalo sono state prese come indici di valutazione della precisione di replicazione. Un profilometro a stilo, Ultra Surface (Taylor Hobson Ltd.), è stato utilizzato per la scansione tridimensionale (3D) del modello di pelle di squalo e dei due stampi di micro-replica. Le figure 25 e 26 mostrano le scanalature 3D e i corrispondenti profili di sezione raccolti da una singola squama di squalo e due stampi a singola scala.

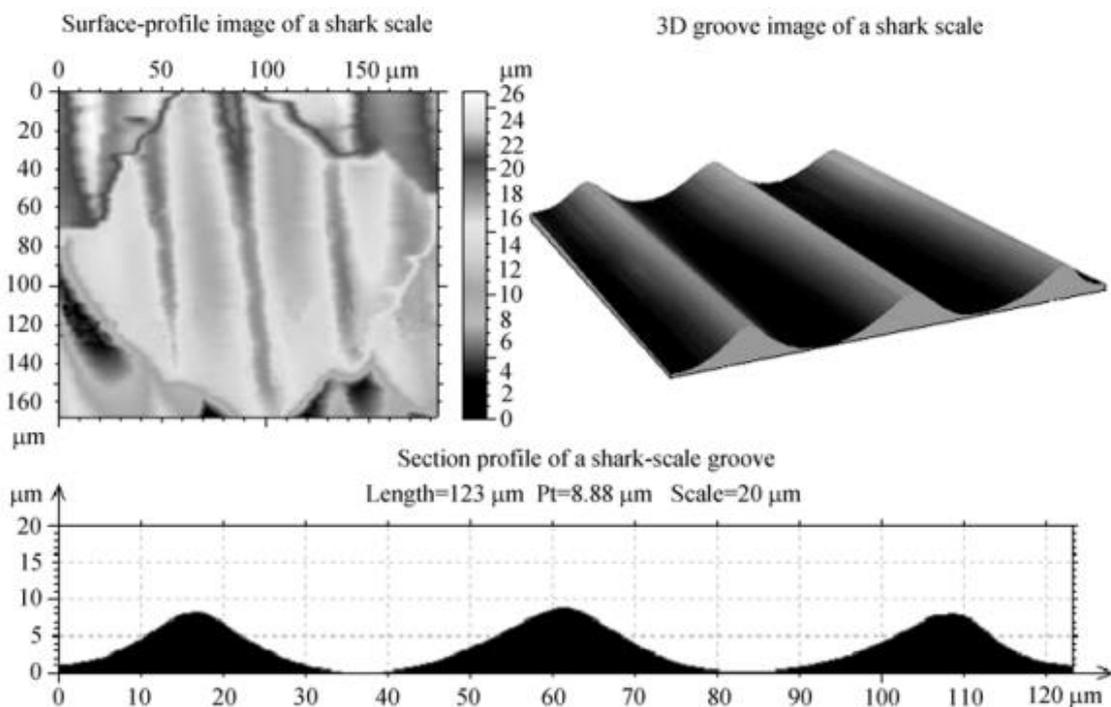


Figura 25: Imaging del profilo della superficie di una squama di squalo, (immagine adattata da [30]).

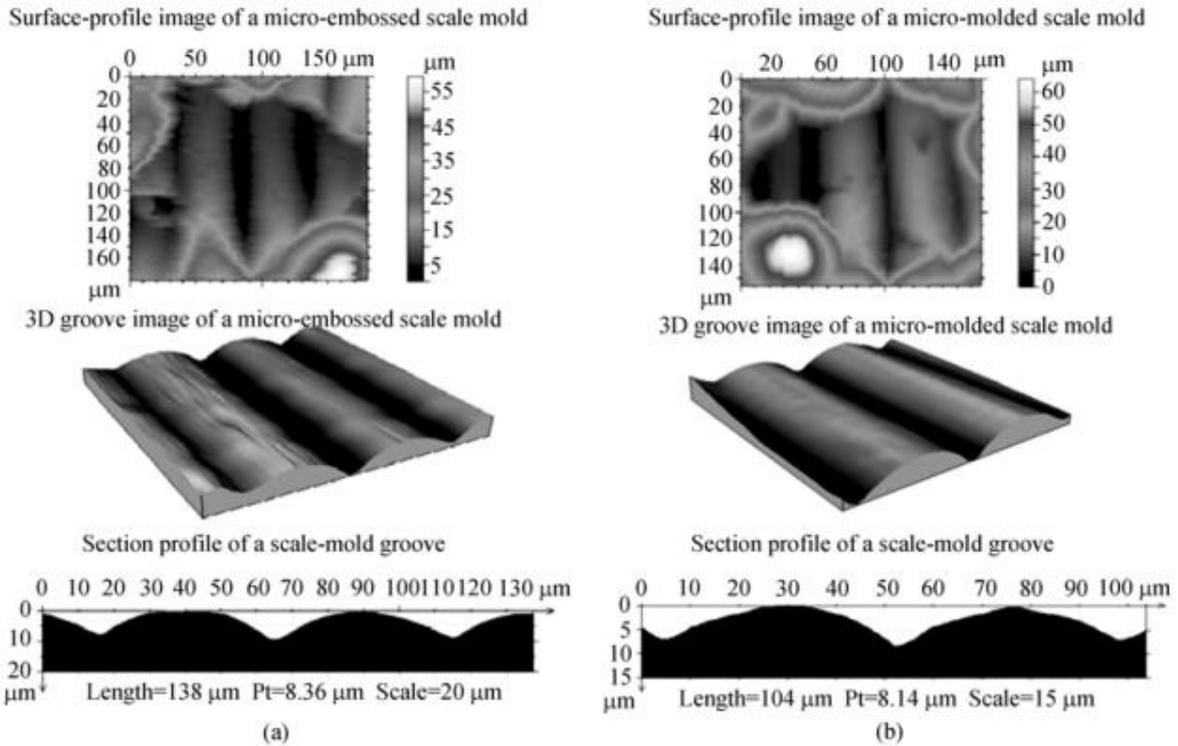


Figura 26: Imaging del profilo della superficie di uno stampo a squame di squalo. (a) è stato effettuato il campionamento dallo stampo micro-goffrato, (b) è stato effettuato il campionamento dallo stampo micro-stampato, (immagine adattata da [30]).

Per quanto riguarda la selezione delle aree di scansione, anche se è stato presupposto che sia stato confrontato uno stampo a scala singola con il suo modello di controparte, ha provocato molte difficoltà al campionamento. Considerando che la struttura delle scaglie placoidi ha mostrato dipendenza solo dalla loro posizione e specie, le squame della stessa parte di una pelle di squalo hanno approssimativamente la stessa struttura.

Nella precisione di replica delle scanalature della scala, poiché la larghezza della scanalatura e l'altezza del dorso sono stati considerati i parametri chiave del profilo della sezione, sono state confrontate la larghezza media della scanalatura, ovvero la spaziatura s , e l'altezza del dorso centrale h , rappresentate rispettivamente nella Figura 25 e 26, come mostrato nella Tabella 4, è stato notato che, rispetto al modello biologico, le larghezze dei solchi dei due tipi di materiale sono state aumentate rispettivamente del 5.5% e del 2.2% e le altezze delle spine centrali sono state diminuite rispettivamente del 5.9% e dell'8.3%. Ciò ha dimostrato che la pressione nel processo di micro-goffratura ha esteso la scanalatura della scala in senso trasversale, mentre la scanalatura della scala rimane quasi invariata nel processo di micro-stampaggio senza pressione. D'altra parte, l'intervento della pressione assicura al prepolimero dello stampo di riempire completamente il fondo della scanalatura. Pertanto, il metodo di micro-goffratura è stato preferito al metodo di micro-stampaggio nella replica dei dorsi in scala.

TIPOLOGIA STAMPO	SCANALATURA MEDIA s [μm]	ALTEZZA DEL DORSO CERNALE h [μm]	DEFORMAZIONE Δs [%]	DEFORMAZIONE Δh [%]
MICRO-GOFFRATO	48.0	8.36	+5.5	-5.9
MICRO-STAMPATO	46.5	8.14	+2.2	-8.3

Tabella 4: confronto della precisione di replica del solco della scala tra i due metodi. Per quanto riguarda i modelli biologici, $s = 45,5 \mu\text{m}$ e $h = 20,58 \mu\text{m}$.

Nella precisione di replica dell'obliquità della scala, la Figura 27 ha illustrato la deformazione dell'obliquità della scala nella formazione degli stampi di micro-replica: la punta della scala è stata piegata da D' a D e ha formato una cavità tra C e D. Per quanto riguarda i due stampi in Figura 26, prendendo B come punto di partenza, è stata scansionata una lunghezza di $100 \mu\text{m}$ lungo la direzione CA. Per quanto riguarda il modello biologico nella Figura 25, è stata scansionata anche una stessa lunghezza dalla radice della scala alla punta. Quindi, il punto finale di ciascuna scansione è stato preso come origine delle coordinate e tre curve di profilo sono state impilate nella Figura 28. Sulla base delle curve impilate, sono stati ottenuti gli sfasamenti di altezza ξ e δ di ogni stampo rispetto al modello come mostrato nella Figura 28(b). È stato osservato che le deformazioni dell'obliquità della scala sui due stampi sono state aumentate gradualmente dalla parte centrale e hanno raggiunto i valori massimi di $3.8 \mu\text{m}$ e $8.2 \mu\text{m}$ alle estremità della scala, che sono state diminuite rispettivamente del 13.7% e del 27.5% rispetto al modello. Ciò ha suggerito che il metodo di micro-stampaggio ha mostrato una maggiore precisione nella replica dell'obliquità della scala rispetto al metodo di micro-goffratura. L'analisi completa di cui sopra ha indicato che non è stata notata alcuna differenza significativa nella precisione di replica dei solchi della scala tra i due metodi e che il metodo di micro-stampaggio è stato preferito all'altro sulla replica dell'obliquità della scala. Tuttavia, il metodo di micro-goffratura ha presentato alcuni vantaggi sull'integrità della superficie rispetto allo stampo di micro-replica.

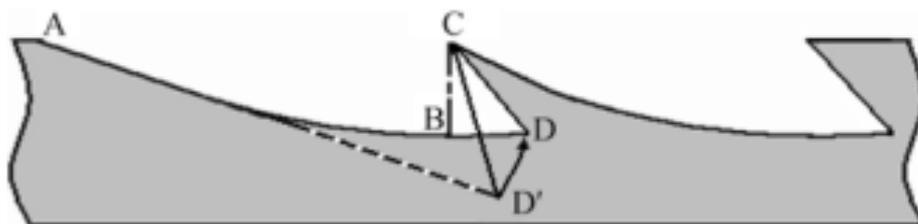


Figura 27: illustrazione della deformazione dell'obliquità della scala, (immagine adattata da [30]).

La pelle di squalo ha mostrato un'adeguata resistenza meccanica e tolleranza al calore, il che l'ha resa adatta ad essere presa come modello di replica dei metodi di micro-goffratura e micro-stampaggio. L'analisi sulla precisione di replicazione ha convalidato che la tecnologia di formatura bio-replicata ha mostrato adattabilità nella replicazione diretta della morfologia su capi di abbigliamento. In particolare, rispetto al metodo di micro-goffratura, il metodo di micro-stampaggio ha riportato una maggiore precisione nella replicazione morfologica dei tessuti nell'abbigliamento [30].

Un'altra tecnica, proposta per la fabbricazione di riblets bio-replicate, è stata basata su una vernice induribile UV rapida. Oltre alla progettazione del sistema di rivestimento, l'accuratezza della bio-replicazione della morfologia della superficie è stata convalidata di circa il 97% rispetto al modello trattato precedentemente della pelle di squalo. Infine, la riduzione della resistenza aerodinamica e la funzione antivegetativa della superficie del rivestimento sono state testate rispettivamente nel tunnel dell'acqua e in uno stagno aperto. Il tasso di riduzione della resistenza aerodinamica della superficie del rivestimento è stato valutato di circa 12% in più e l'antivegetativa ha dimostrato di migliorare circa cento volte.

La micro-goffratura, la cui procedura è stata illustrata in Figura 22(a), è stata considerata prevalente per la produzione a basso costo e in serie di micro o nanostrutture. Tuttavia, tale tecnica è stata generalmente limitata a micro-motivi 2D regolari, non adatti a micro-motivi 3D complessi come la pelle di squalo a causa della notevole difficoltà di sformatura, come descritto precedentemente. Al fine di rendere possibile il trasferimento della pelle di squalo naturale su una superficie a forma libera, è stato proposto un approccio di rivestimento flessibile di bio-replicazione della pelle di squalo, evolvendo il processo di fabbricazione della micro-goffratura [18].

La pelle di *Carcharhinus Brachyurous* (1,4 m di lunghezza, Beijing Fishery Corp.), che è stato classificato come un tipico squalo che nuota velocemente, è stata presa, anche in questo caso, come modello del rivestimento di bio-replicazione. Come materiale del nastro goffrato trasparente UV, è stato applicato il polidimetilsilossano (PDMS) ed è stato utilizzato il kit di elastomero Sylgard 184 (Dow. Corning, USA). Lo spessore dello stampo negativo morbido è stato fissato a 5 mm il più sottile possibile per garantire una trasmissione sufficiente della brillantezza UV. Una soluzione acquosa commerciale di un diacrilato di poliuretano ionomerico (PUC, nome commerciale UCECOAT 6558, MW-10.000 g/mol) è stata utilizzata come resina polimerizzabile UV di base, Darocur 1173 (Ciba Specialties Chemical) è stato utilizzato come foto-iniziatore. Un campione di proteine standard e lecitina di soia sono stati forniti da Shanghai Hufeng Biotechnology Co., Ltd. L'isotiocianato di fluoresceina (FTTC) è stato utilizzato per etichettare le proteine/liposomi e i coniugati di proteine FTTC sono stati preparati propriamente [18].

Tutti i processi di rivestimento di bio-replicazione hanno comportato il pretrattamento della pelle di squalo, la preparazione morbida dello stampo negativo e la rapida micro-goffratura della vernice UV. Una lunga striscia dello stampo morbido negativo è stata collegata in un anello flessibile per soddisfare i requisiti di rivestimento di varie superfici a forma libera. Il pretrattamento della pelle di squalo è stato considerato importante per mantenere la sua micro-morfologia superficiale e migliorare la resistenza meccanica del modello di stampaggio. Qui il pretrattamento della pelle di squalo è stato suddiviso nelle seguenti fasi: fissaggio rigido, pulizia, fissazione chimica, risciacquo, disidratazione e asciugatura. Per replicare la pelle di squalo in un'ampia area, è stato selezionato un pezzo di pelle di squalo fresca (200 mm x 550 mm) con una buona morfologia come modello di pelle di squalo e pretrattato come segue. Il modello di pelle di squalo è stato risciacquato 3-5 volte in acqua pulita, quindi 2-3 volte in acqua deionizzata al fine di rimuovere il sangue o altre impurità. Dopo essere stato appiattito e inchiodato su una piastra rigida, il modello di pelle di squalo è stato posto in glutaraldeide al 2,5% (C₈H₈O₂) per 3 ore per mantenere la sua micromorfologia originale tramite fissazione chimica. Il modello di pelle di squalo è stato fissato chimicamente ed è stato risciacquato per 1 ora con 3-4 cambi di soluzione tampone fosfato 0,1 mol/L pH7,2. La soluzione residua sul modello è stata risciacquata 3-4 volte in acqua pulita e acqua deionizzata. successivamente, condotto un processo di disidratazione a gradiente per prevenire la deformazione del modello a causa di un'eccessiva perdita d'acqua durante l'asciugatura. I campioni di pelle di squalo fissati chimicamente sono stati immersi in una concentrazione di soluzione di etanolo in una sequenza di concentrazione rispettivamente di 30%, 50%, 75%, 80%, 95% e 100% per effettuare la disidratazione passo dopo passo, ciascuno per 15-30 min. Con la conservazione in stufa per 12 ore a 60 °C, il pretrattamento del modello di pelle di squalo è stato terminato. Il modello della pelle di squalo pretrattata è stato mostrato in Figura 29(a).

Lo stampo morbido negativo è stato fabbricato tramite litografia morbida, in cui la pelle di squalo pretrattata è stata presa come modello della litografia morbida come mostrato in Figura 28. Colata di PDMS sul modello e sformatura dello stampo morbido negativo da modello sono state definite le procedure predominanti della litografia morbida. Al fine di garantire che il PDMS sia stato riversato completamente nelle microcavità del modello di pelle di squalo, tutti i processi di preparazione dello stampo negativo morbido sono stati condotti in una camera a vuoto per spremere l'aria dalle cavità della pelle di squalo. La foto dello stampo negativo morbido ottenuto dalla litografia morbida è stata mostrata in Figura 29(b) [18].

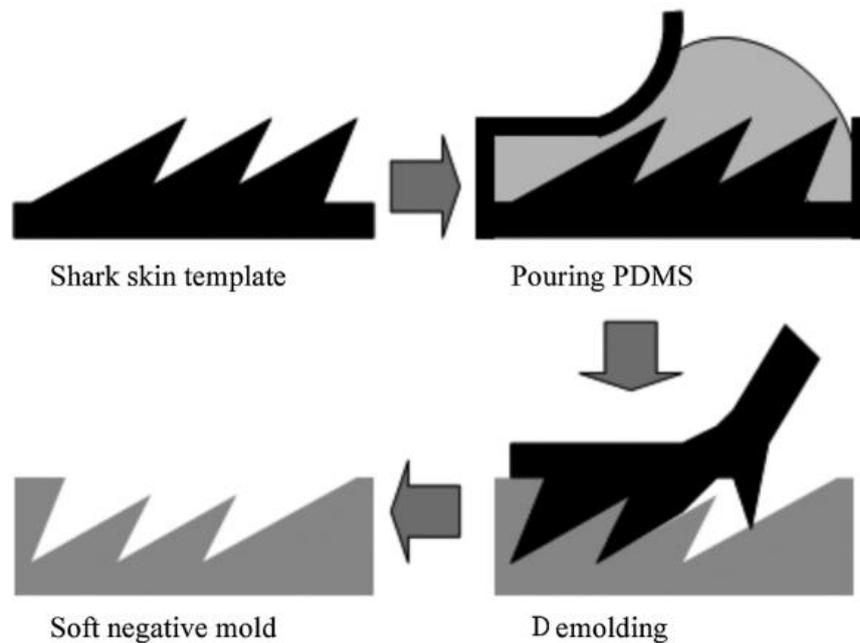


Figura 28: preparazione di uno stampo negativo morbido, (immagine adattata da [18]).

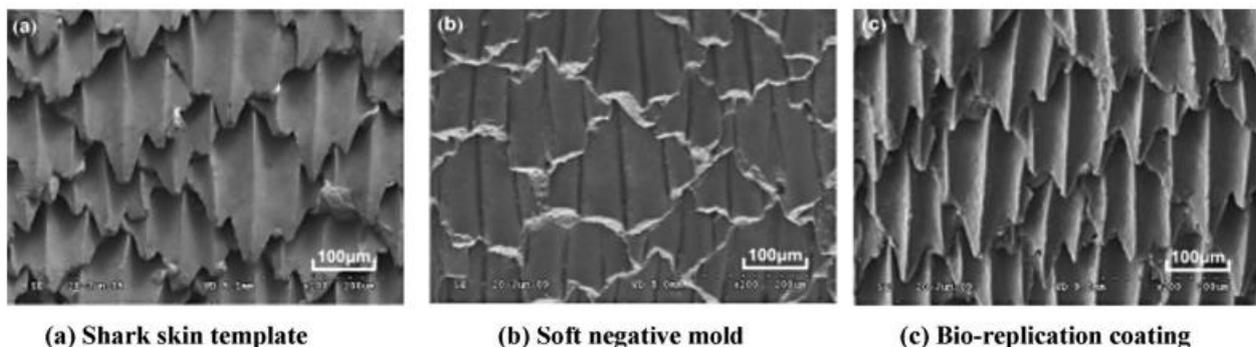


Figura 29: micro-morfologia di (a) pelle di squalo, (b) stampo negativo morbido, (c) rivestimento replicato, (immagine adattata da [18]).

Il meccanismo dello strumento di rivestimento di bio-replicazione su vasta area è stato illustrato come mostrato in Figura 30. Una lunga striscia di morbido stampo negativo con micromorfologia della pelle di squalo ha strettamente avvolto tre ruote di plastica e all'interno è stata inserita una lampada a raggi

ultravioletti. La striscia di stampo negativo morbido è stata misurata con una lunghezza di 500 mm e larghezza di 185 mm. La distanza tra la striscia e la lampada UV (potenza 300 W e lunghezza d'onda 395 nm Lampada LED UV, Shanghai Machine Optoelectronic Technology Co. Ltd) è stata fissata a 20 cm. Un PZT a vibrazione ultrasonica è stato montato sulla ruota vicino al lato di spruzzatura della vernice polimerizzabile UV. La vibrazione ultrasonica ad alta frequenza (frequenza 20 kHz e ampiezza 1µm) è stata generata durante i processi di rivestimento per assistere il riempimento della vernice polimerizzabile UV in uno stampo morbido negativo. Questo perché la vibrazione ad alta frequenza ha riportato un significativo effetto di liquefazione [18].

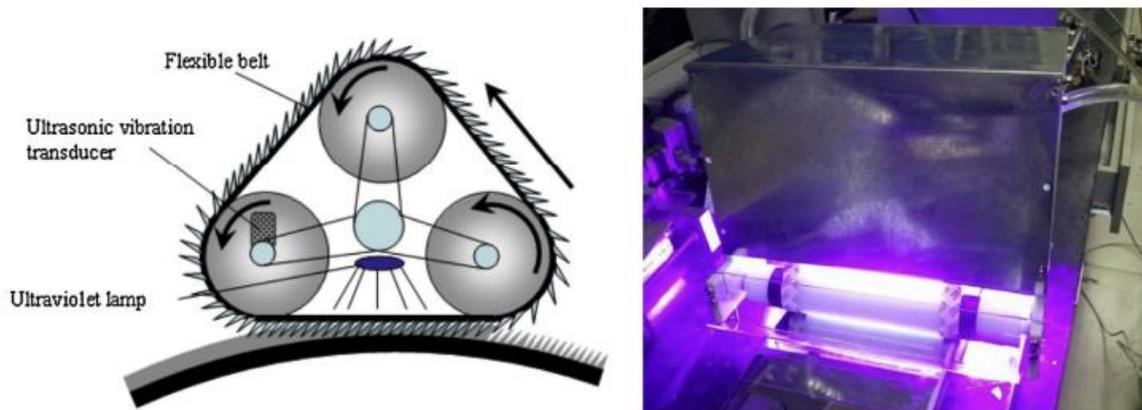


Figura 30: strumento di rivestimento per la replica della morfologia della superficie a funzione naturale, (immagine adattata da [18]).

Dopo il tempo T_{min} , è stata determinata, da vari esperimenti di rivestimento, la relazione tra l e V , definita nell'Equazione 6.

$$V = \frac{l}{T_{min}} \quad [6]$$

I dati della microscopia elettronica a scansione (SEM) vengono raccolti su un Cam Scan CS3400. Il profilometro di interferenza della luce bianca 3D (modello: SOHIO, AEP Technology, USA) è stato utilizzato per scansionare la micromorfologia della superficie. I campioni sono stati spruzzati con uno strato di Au (circa 2 nm di spessore) prima dell'imaging per migliorare la conduttività. È stato utilizzato il microscopio a fluorescenza XSY-1 con fotocamera SONY DSC-H50.

I test di riduzione della resistenza aerodinamica sono stati condotti in un tunnel ad acqua vacuolare, il cui diagramma è stato mostrato in Figura 31. La lunghezza del tubo di prova è stata scelta di 0,6 m e la distanza tra i due orifici di misurazione della caduta di pressione è stata selezionata di 0,5 m. La sezione del tubo tampone è stata impostata su una lunghezza superiore a 20 m per stabilizzare il flusso d'acqua nella parte anteriore della sezione del tubo di prova. La velocità del flusso nella sezione di prova è stata variata tra 0 e 20 m/s. La potenza della pompa dell'acqua è stata impostata a 18,5 kW [18].

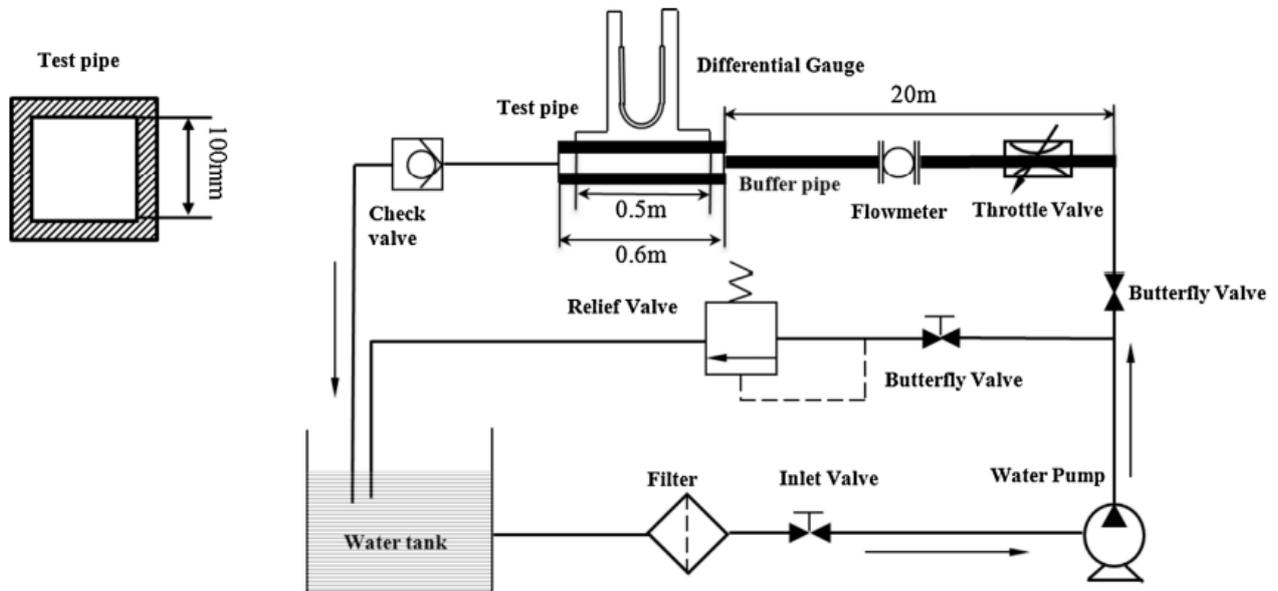
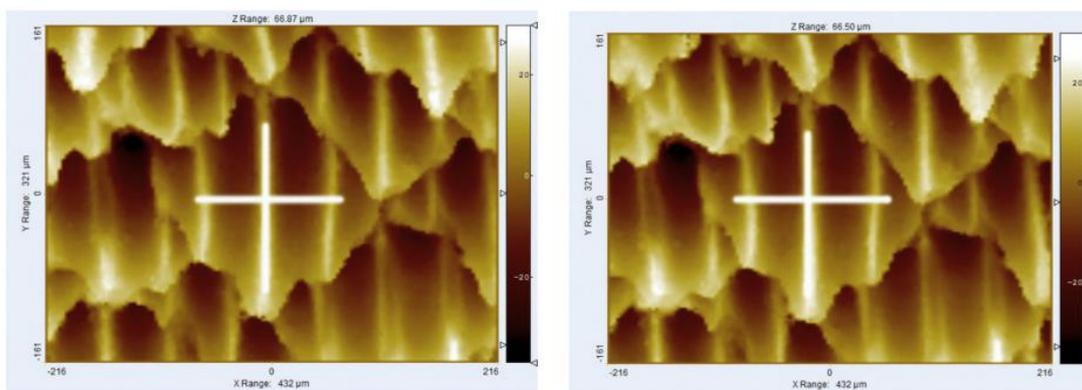


Figura 31: impianto sperimentale del tunnel d'acqua, (immagine adattata da [18]).

L'accuratezza della replicazione biologica è stata valutata confrontando la micro-morfologia della superficie tra il modello della pelle di squalo e la superficie del rivestimento replicato. In generale, la forma placode della pelle di squalo è stata considerata dipendente, non solo dalla sua posizione, ma anche dalla specie di squalo. Un foro è stato praticato sulla pelle di squalo prima della preparazione dello stampo negativo morbido come segno per trovare gli stessi placoidi dal modello di pelle di squalo e dalla superficie del rivestimento. Le morfologie superficiali dello stesso placode sono state mostrate in Figura 32. I contorni al centro del placode del modello di pelle di squalo e della superficie di rivestimento replicata sono stati indicati nelle Figura 33 e 34 rispettivamente. Dalla Figura 34, è stato osservato che la cresta placode della pelle di squalo ha un'inclinazione di circa 11° , chiamata angolo di attacco. Inoltre, è stata notata la somiglianza tra le due curve, il che ha dimostrato che l'accuratezza del rivestimento di bio-replicazione è stata considerata sufficientemente elevata. La Figura 35 ha mostrato la foto in sezione trasversale della superficie del rivestimento di bio-replicazione, attraverso la quale è stato affermato che l'angolo di attacco sul fondo scala è stato coerentemente trasferito sulla superficie del rivestimento.



(a) Shark skin template

(b) Coating surface

Figura 32: SEM della pelle di squalo e del rivestimento replicato. (immagine adattata da [18]).

I risultati morfologici superficiali della pelle di squalo bio-replicata sono elencati nella Tabella 5, dove S è stata definita come la larghezza media di un solco e H l'altezza media di una nervatura. Nella Tabella 5, rispetto al modello di pelle di squalo, gli errori di rivestimento replicati di S e H sono stati valutati rispettivamente -0,4% e -2,6%. I valori negativi hanno indicato il restringimento della superficie del rivestimento causato principalmente dal calore del processo di polimerizzazione UV. Tuttavia, gli errori sono stati stimati sufficientemente bassi da ottenere una precisione di replicazione soddisfacente delle micro-nervature [18].

Grandezza		Modello di pelle di squalo	Rivestimento di bio-replicazione	Errore di replicazione
Altezza media H [μm]		26.9 ± 0.2	26.2 ± 0.2	-2.60%
Spaziatura media S [μm]	L	68.44 ± 0.3	68.36 ± 0.3	-0.10%
	S	61.66 ± 0.3	61.41 ± 0.3	-0.40%

Tabella 5: confronto dei rivestimenti di replica della nervatura, L = lato sinistro, R = lato destro.

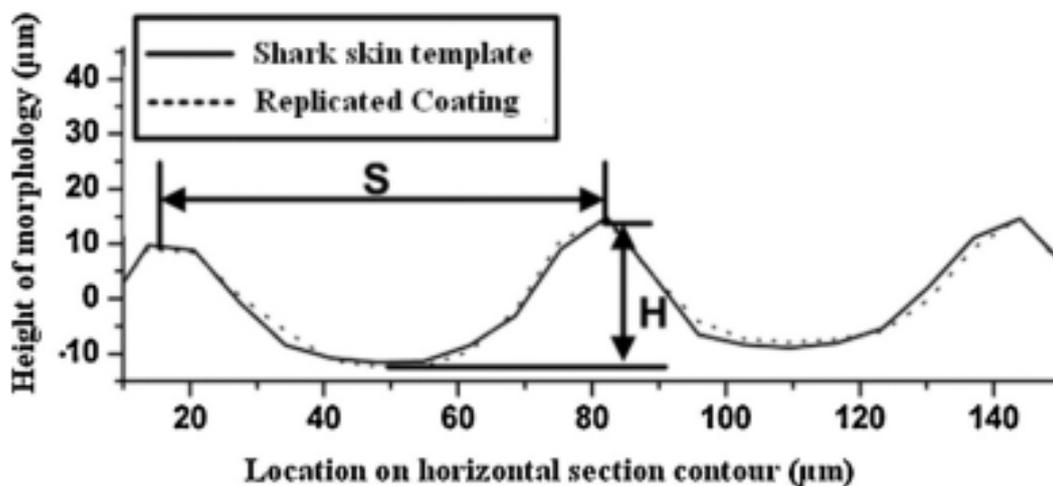


Figura 33: Contorno orizzontale della sezione trasversale della pelle di squalo e rivestimento replicato. (immagine adattata da [18]).

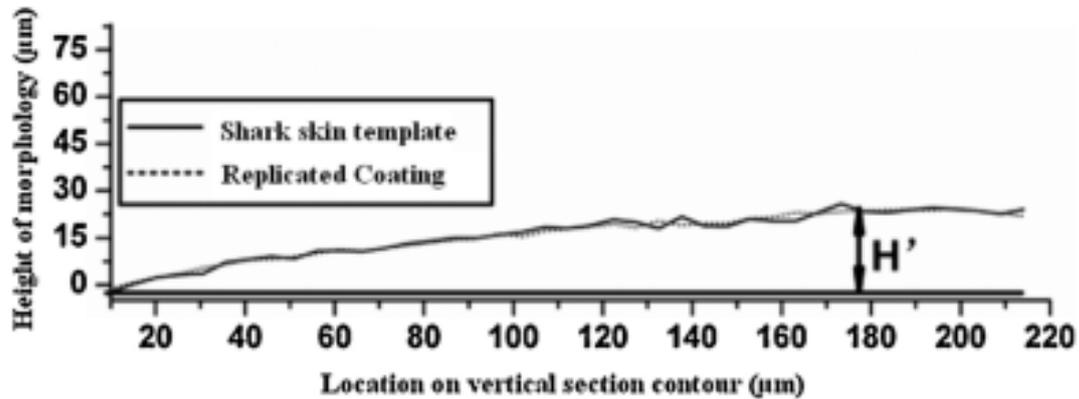


Figura 34: Contorno della sezione trasversale verticale della pelle di squalo e rivestimento replicato. (immagine adattata da [18]).

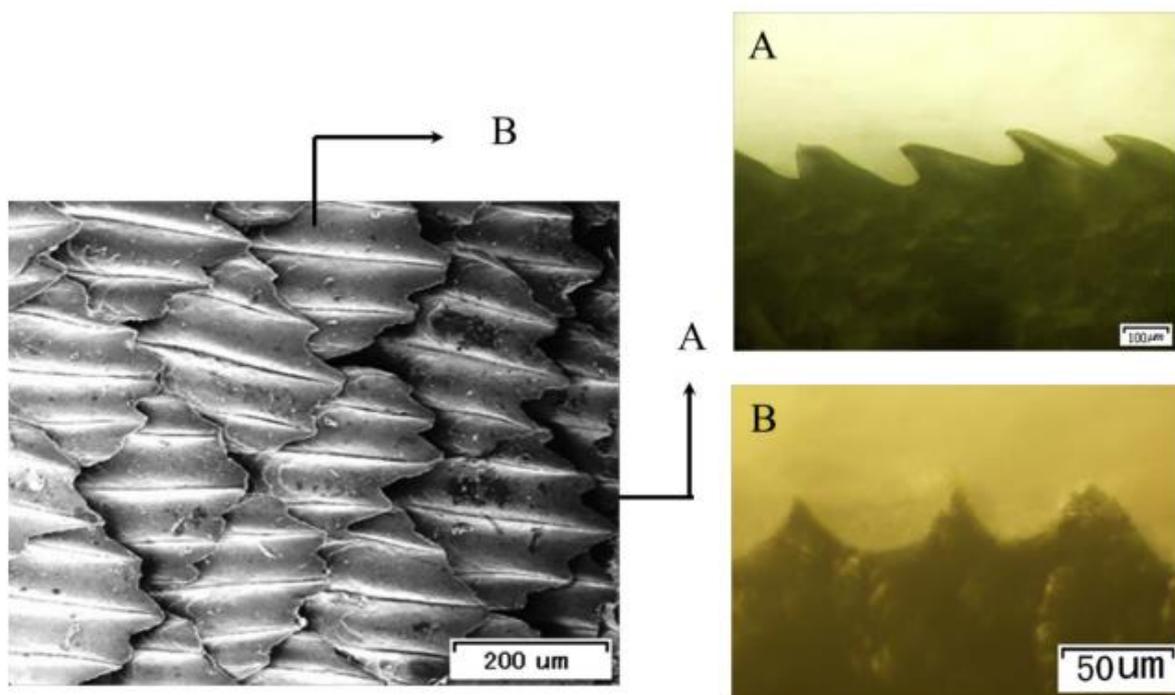


Figura 35: Sezione trasversale della superficie del rivestimento di bio-replicazione. (immagine adattata da [18]).

Infine, è stato effettuato una sperimentazione relativa alla riduzione della resistenza allo scopo di confrontare le prestazioni delle sue superfici. La sezione del condotto di prova è stata scelta di forma quadrata, mostrata in Figura 31, tutte le pelli su ciascun lato del quadrato sono state fabbricate direttamente dal rivestimento di bio-replicazione di ampia area. Sono stati preparati tre tipi di superfici di rivestimento che hanno comportato scanalature micro-scanalature lisce di tipo V e pelle di squalo vivida bio-replicata per confrontare la riduzione della resistenza aerodinamica, in cui la superficie di rivestimento liscia (rugosità superficiale $R_a < 0,5 \mu\text{m}$) è stata presa come superficie di riferimento. È stato mantenuto lo stesso materiale e la nervatura micro-scanalatura di tipo V ha riportato un'altezza di $35 \mu\text{m}$ e una spaziatura tra i picchi di $80 \mu\text{m}$. La temperatura dell'acqua è stata impostata a $28 \text{ }^\circ\text{C}$ e il sistema di prova è stato degassato per più di un'ora prima del test. I tassi di riduzione della resistenza DR, definito in Equazione 7,

della scanalatura micro-solcata e del bio-superficie del rivestimento di replica sono stati calcolati secondo la relazione espressa nell'Equazione 6.

$$DR = \frac{\Delta p_r - \Delta p_t}{\Delta p_r} \times 100\% \quad [7]$$

I tassi di riduzione della resistenza della nervatura a microsolchi e della pelle di squalo bio-replicata sono stati mostrati in Figura 36. Il tasso di riduzione della resistenza della nervatura a microsolchi è di circa l'8%, il che è stato compatibile con precedenti campagne sperimentali [8]. Inoltre, la bio-replicazione della superficie del rivestimento ha mostrato una riduzione della resistenza aerodinamica di circa il 12%, superiore a quella delle micro-scanalature. Questo perché la pelle di squalo bio-replicata ha riservato la struttura gerarchica della superficie naturale in modo ottimale, che è stata considerata più complessa del normale microsolco. Diversamente dalla struttura a microsolchi a forma di U/V, la sezione longitudinale della scaglia di pelle di squalo non è stata mantenuta parallela alla direzione del flusso dell'acqua, in particolare esiste un angolo di attacco. L'angolo di attacco è stato osservato in un intervallo di 10-35°. Quest'ultimo, che è stato considerato uno dei fattori importanti al fine di produrre l'elevata efficienza di riduzione della resistenza aerodinamica, ha diminuito l'intensità della turbolenza sul fondo delle scanalature, e ha potuto anche implicare il verificarsi di bolle di ricircolazione sulla valle della scala. Inoltre, a causa della morfologia fine e sofisticata, la pelle dello squalo è stata definita come una sorta di superficie super idrofobica [18].

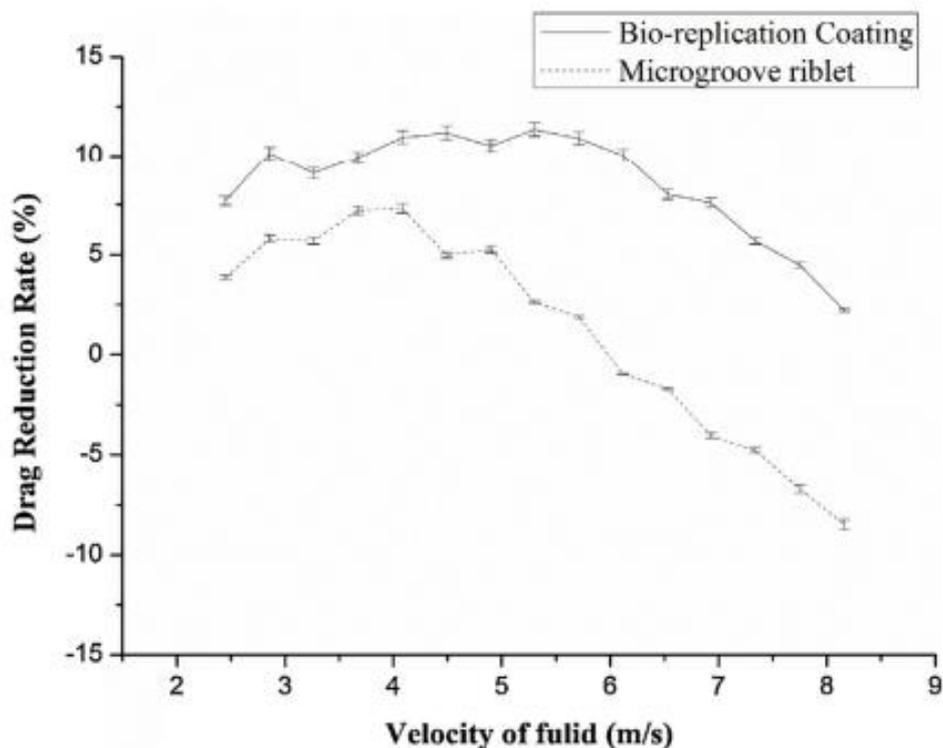


Figura 36: risultati del test di riduzione della resistenza. (immagine adattata da [18]).

4.2 Impiego di riblets per rivestimenti superficiali in ambito aeronautico

Gli ultimi due decenni hanno visto una considerevole attività di ricerca sull'uso delle nervature per la riduzione della resistenza viscosa. Sono stati rivisti i risultati sperimentali relativi alle prestazioni delle riblets 3M su profili alari, ali e configurazioni del corpo alare o dell'aeromobile a diversi regimi di velocità. Oltre alla riduzione della resistenza aerodinamica, sono stati discussi gli aspetti delle caratteristiche di flusso modificate indotte dalla presenza delle nervature sulla base di misurazioni dettagliate in galleria del vento a basse velocità. I risultati disponibili ottenuti dalle gallerie del vento e dai test di volo hanno stabilito fermamente l'efficacia delle riblets da bassa velocità a numeri di Mach supersonici moderati. Esistono forti prove, a basse velocità, per indicare che le nervature sono state convalidate come più efficaci nei gradienti di pressione avversi. Sulle ali di moderata incidenza, rilevanti per gli aerei da trasporto, le nervature sono state applicate efficacemente, fornendo una riduzione della resistenza aerodinamica paragonabile ai profili alari 2D, purché l'angolo localizzato tra le linee di superficie e l'orientamento delle nervature sia stato imposto sufficientemente piccolo ($<10^\circ$) [31].

La ricerca sulle metodologie di riduzione della resistenza aerodinamica rilevanti per i veicoli di volo ha ricevuto una notevole attenzione negli ultimi 2-3 decenni. Nel contesto di un aereo da trasporto civile o commerciale, a seconda delle dimensioni, la resistenza di attrito ha contribuito fino al 70% della resistenza totale. È stata condotta un'attività continua e mirata in tutto il mondo riguardo allo sviluppo di nuove tecniche per la riduzione della resistenza all'attrito e i tentativi sono stati progrediti ampiamente in due direzioni: metodi per ritardare la transizione dello strato limite laminare-turbolento e metodi per alterare o modificare la struttura turbolenta di uno strato limite turbolento. In questa trattazione l'attenzione è stata concentrata sul controllo della resistenza di attrito nello strato limite turbolento mediante l'impiego di superfici Riblet. Le nervature, ovvero micro-scanalature sulla superficie e allineate alla direzione del flusso, sono state studiate in modo più approfondito nei capitoli precedenti e i risultati di questi studi sono stati così promettenti e incoraggianti che il concetto è stato valutato nelle prove di volo. Numerosi convegni internazionali hanno affrontato il tema delle nervature, sia dal punto di vista della meccanica dei fluidi di base che delle applicazioni pratiche. Le nervature con scanalature a V simmetriche (altezza pari alla spaziatura) con pellicola adesiva prodotta dalla società 3M (USA) sono state ampiamente studiate nella maggior parte dei lavori passati e i risultati hanno rivelato un'enorme coerenza anche per quanto riguarda il grado di riduzione della resistenza aerodinamica. La massima riduzione della resistenza viscosa nell'intervallo del 4-8% è stata misurata su una varietà di flussi bidimensionali con gradienti di pressione nulli o lievi; incoraggiati da questi risultati, sono stati riportati studi che hanno valutato l'efficacia delle riblets a velocità transoniche così come in volo. Alcuni studi a basse velocità hanno focalizzato l'attenzione sull'ottimizzazione della geometria delle nervature e sono state riportate riduzioni della resistenza fino al 10% [31].

Nonostante i numerosi studi condotti nei decenni precedenti, i meccanismi dettagliati, mediante i quali le nervature hanno provocato la riduzione dello sforzo di taglio alla parete, sono stati ancora inseriti come oggetto di molti studi. Sono stati suggeriti diversi meccanismi fisici che hanno descritto l'atto di moto su questa tipologia di superfici, i quali hanno incluso: indebolimento del processo di scoppio dei vortici vicino alla parete, significativo rallentamento del flusso nella valle delle scanalature, aumento dello spessore del sottostrato viscoso, inibizione o restrizione del movimento dei vortici trasversali: è stato supposto che molte delle suddette caratteristiche del flusso abbiano mostrato il loro sottile ruolo nell'alterazione della sollecitazione di taglio della parete. A causa delle dimensioni della scanalatura relativamente piccole, le misurazioni nelle immediate vicinanze delle scanalature sono state valutate generalmente con difficoltà. In seguito, sono state disposte misurazioni sia della velocità media che di alcune statistiche di turbolenza nei solchi, utilizzando nervature tagliate a macchina (di dimensioni molto superiori a quelle realizzate da 3M);

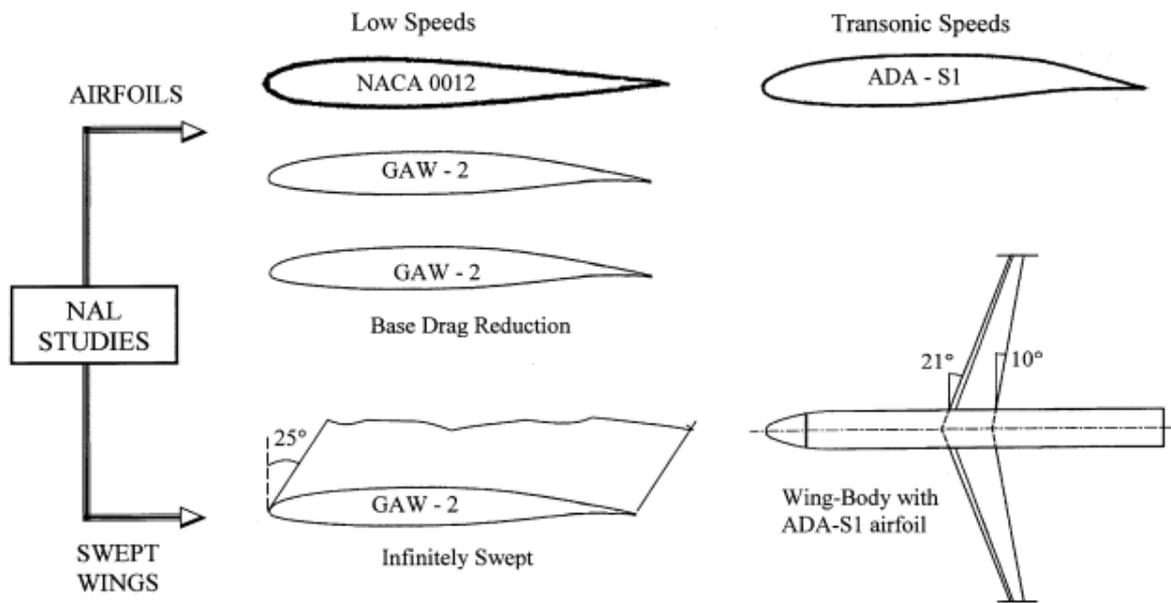
questi risultati hanno indicato che la sollecitazione di taglio alla parete è stata aumentata vicino alle creste del solco, mentre è stata sensibilmente ridotta nella valle ed è stato suggerito che sia stata verificata una riduzione netta della resistenza nonostante l'aumento dell'area bagnata [31].

Le applicazioni realistiche che hanno coinvolto gradienti di pressione, tridimensionalità nella riduzione della resistenza aerodinamica in queste condizioni sono state affrontate. Lo strato limite su un profilo alare è stato soggetto all'influenza combinata dei gradienti di pressione nel senso della corrente e della curvatura della superficie, a differenza del flusso su una piastra piana. Nonostante l'interesse tecnologico, lo sforzo che è stato dedicato alla comprensione dettagliata dell'efficacia delle riblets, in presenza di questi effetti aggiuntivi, è stato piuttosto limitato. Ci sono state indagini che hanno confermato le capacità di riduzione della resistenza aerodinamica delle nervature nei gradienti di pressione. L'applicazione di nervature su profili alari 2D a incidenza nulla o bassa ha rivelato una riduzione della resistenza viscosa paragonabile ai flussi a gradiente di pressione nullo. Risultati molto incoraggianti sono stati riportati dai test in galleria del vento sul modello di velivolo Do-228 a basse velocità e sul modello del corpo alare dell'Airbus A-320 a numeri di Mach transonici, gli esperimenti di volo a numeri di Reynolds relativamente alti su un T-33 e gli aeroplani Learjet hanno fornito un notevole supporto alle osservazioni in galleria del vento sull'efficacia dei riblets [31].

La misurazione diretta della sollecitazione di taglio della parete utilizzando un accurato bilancio della resistenza di attrito della pelle è stata eseguita in diverse indagini e sono state stimate bande di errore. L'utilizzo del MI (momentum integral) 2D ha previsto la misurazione dei profili di velocità nello strato limite, sia a monte che immediatamente a valle della superficie di prova, sia per la superficie liscia che in presenza di nervature; questo di solito è stato ottenuto utilizzando un rastrello di sensori Pitot. L'attrito medio della pelle (sulla superficie di prova) è stato determinato calcolando la variazione dello spessore di quantità di moto dello strato limite (θ) attraverso la superficie di prova. Questo metodo ha potuto fornire risultati soddisfacenti a condizione che la superficie di prova sia stata scelta sufficientemente lunga da causare una variazione sufficiente di θ . L'applicazione di MI per flussi con gradienti di pressione nel verso della corrente ha comportato l'importante presupposto che il campo di pressione sia stato considerato virtualmente inalterato in presenza di nervature. Sono state presentate prove ragionevoli (ad esempio su profili alari a basse velocità) che i cambiamenti nella distribuzione della pressione dovuti alle nervature sono stati valutati trascurabili fintanto che lo strato limite non ha separato. Diversi studi hanno utilizzato la tecnica MI per la determinazione della resistenza totale di un corpo 2D (il classico metodo di modellazione della scia); ciò ha comportato nuovamente la misurazione dei profili di velocità nella scia (tipicamente a 1-2 corde a valle del bordo d'uscita) per il corpo liscio e con le nervature. Mentre la riduzione della resistenza per attrito cutaneo è stata ottenuta dalla riduzione totale della resistenza aerodinamica (con il presupposto che la resistenza alla pressione non sia stata modificata). È stata utilizzata una bilancia estensimetrica interna per la misurazione della resistenza totale di un corpo con una procedura relativamente semplice; l'output di equilibrio è stato adeguatamente calibrato per le forze interne, se presenti, per ottenere la forza di resistenza netta. La riduzione percentuale della resistenza viscosa sarebbe stata estrapolata da ulteriori informazioni sulla resistenza dovuta alla distribuzione delle pressioni [31].

La base di dati limitata dei primi studi su profili alari a zero e bassa incidenza e flussi soggetti a lievi gradienti di pressione avversi ha suggerito che sia stata ipotizzata una riduzione della resistenza viscosa paragonabile a quella osservata nei flussi a gradiente di pressione nullo. Tuttavia, le informazioni disponibili sui profili alari sono state considerate inadeguate a fornire risposte a molte questioni importanti: ad esempio, l'effetto dell'incidenza del profilo alare sulle prestazioni delle nervature, il metodo per la scelta ottimale per applicazioni di profilo alare, ecc. Inoltre, le informazioni sulle proprietà dello strato limite su profili alari in presenza di nervature sono state generalmente carenti, anche per una comprensione grossolana di come il flusso sia stato alterato dalla presenza di queste ultime.

Indagini sistematiche con riblet da 3M sono state condotte nel laboratorio di Viswanath e dei suoi collaboratori, sia a basse velocità che a velocità transoniche, su diversi profili alari ed ali che sono schematizzati in Figura 37; alcuni ampi dettagli sperimentali sono stati riportati nella Tabella 6. Gli esperimenti e l'analisi sono stati relativamente dettagliati sul profilo alare NACA 0012 coprendo un intervallo di incidenza di 0° - 12° . Gli studi sul profilo alare GAW-2 sono stati intrapresi principalmente per confermare alcune nuove scoperte osservate sul profilo alare NACA 0012. L'efficacia del Riblet a velocità transoniche è stata valutata su un profilo alare supercritico



o ADA-

S1.

Figura 37: catalogo degli esperimenti NAL, (immagine adattata da [31])

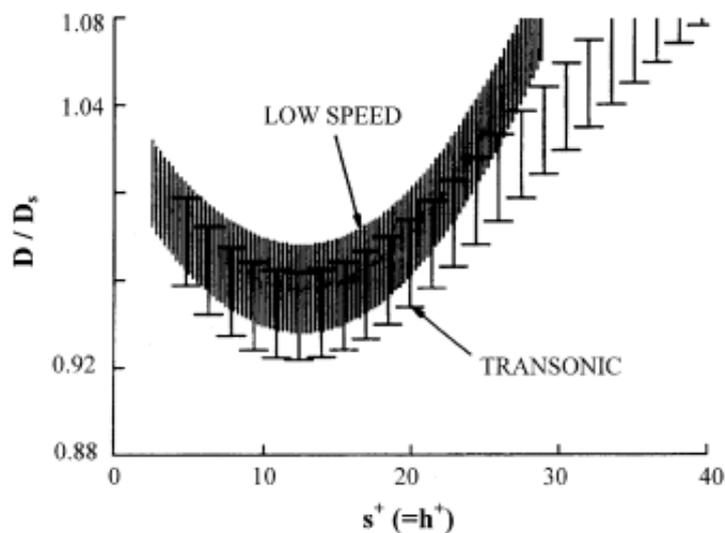


Figura 38: stima delle prestazioni, in termini di valutazione della resistenza, delle nervature: D e D_s sono rispettivamente la resistenza misurata con le nervature e su una superficie liscia, (immagine adattata da [31]).

profilo	Corda [m]	Re_c	M_∞	h [mm]	α [°]	Λ [°]	osservazioni
LC 100D	0.40	$5.3 - 7.95 \times 10^5$	-	0.152, 0.076	0 – 6		Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
NACA 0012	0.152	2.5×10^5	-	0.152, 0.076, 0.023	0		Riduzione della resistenza totale misurata (rilevamento della scia)
CAST 7	0.20	3.3×10^6 (per $M_\infty = 0.76$)	0.65 - 0.76	0.017, 0.023, 0.033, 0.051	0		Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
ADA-S1	0.15	3.0×10^6	0.60 - 0.76	0.018, 0.033	Da -0.5 a 1		Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
NACA 0012	0.60	1.0×10^6	-	0.152, 0.076	0 – 6		Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
NACA 0012	0.60	1.0×10^6	-	0.152	6 – 12		Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
GAW-2	0.60	1.0×10^6	-	0.076	0 – 12		Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
GAW-2	0.60	1.0×10^6	-	0.152, 0.076	0 – 6		Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
ONERA D	0.20	$2.65-4.25 \times 10^5$	-	0.152, 0.076, 0.051	0	22.5	Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale (rilevamento della scia)
GAW-2	0.45	0.75×10^6	-	0.014	0 – 6	25	Riduzione della resistenza di attrito ricavata dalla misurazione della resistenza totale

AIRBUS A320	0.381	3.9 x 10 ⁶ (per M _∞ = 0.7)	0.30 – 0.82	0.023	Da -2 a 3	28	(rilevamento della scia) Riduzione della resistenza totale misurata (bilancio)
Do228	0.508 (sezione centrale)	1.37 - 3.09 x 10 ⁶	-	0.076	Da -5 a 20		Riduzione della resistenza totale misurata (bilancio)

Tabella 6: dettagli sperimentali NAL.

In tutte le configurazioni di profilo alare testate, gli strati limite sulle superfici superiore e inferiore sono stati fatti valutati vicino al bordo d'attacco ed è stata misurata la resistenza totale (con e senza riblets) utilizzando il noto metodo di rilevamento della scia; la bidimensionalità del flusso medio è stata stabilita per la prima volta utilizzando la tecnica dell'equazione integrale della quantità di moto 2D. In tutti i casi, le nervature sono state applicate tipicamente su una distanza nel senso della corrente di circa l'80% della corda su entrambe le superfici superiore e inferiore. Nei casi in cui sono state misurate le distribuzioni di pressione superficiale, la riduzione della resistenza viscosa è stata stimata in base alla riduzione della resistenza totale a cui è stato sottratto il contributo della resistenza dovuta alla distribuzione delle pressioni.

Gli esperimenti sul profilo alare NACA 0012 sono stati eseguiti in due fasi utilizzando lo stesso modello di profilo alare con una corda di 0,60 m. Nella prima fase, le misurazioni hanno coperto un intervallo di incidenza di 0-6° e, oltre alla determinazione della resistenza, sono state effettuate misurazioni della velocità media, dell'intensità della turbolenza e dei profili di sollecitazione di taglio di Reynolds nello strato limite in posizioni selezionate sul profilo alare: la seconda fase degli esperimenti ha incluso principalmente misurazioni della resistenza aerodinamica nell'intervallo di incidenza di 8-12° essenzialmente per valutare le caratteristiche di riduzione della resistenza aerodinamica fino allo stallo.

La selezione delle nervature è stata basata sulla correlazione della riduzione della resistenza viscosa stabilita per le nervature 3M con flussi di strato limite a gradiente di pressione zero (Figura 38); i dati rivelano che la massima riduzione della resistenza aerodinamica si verifica per h^+ di circa 10-15, dove h^+ è stato definito in Equazione 7. Le distribuzioni di pressione sul profilo aerodinamico per determinare la variazione di h^+ nel senso della corrente a valori di incidenza differenti hanno fornito risultati che sono stati utilizzati per scegliere l'altezza ottimale delle riblets per una data condizione di flusso.

$$h^+ = \frac{h}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad [7]$$

La Figura 39 ha mostrato la distribuzione delle pressioni lungo la direzione longitudinale. Sia con che senza nervature misurate sul profilo NACA 0012 a $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 6^\circ$, l'effetto delle nervature sulle pressioni superficiali è stato valutato notevolmente piccolo. Di conseguenza, i valori della resistenza dovuta alle pressioni sono stati mantenuti essenzialmente gli stessi, ad un dato α .

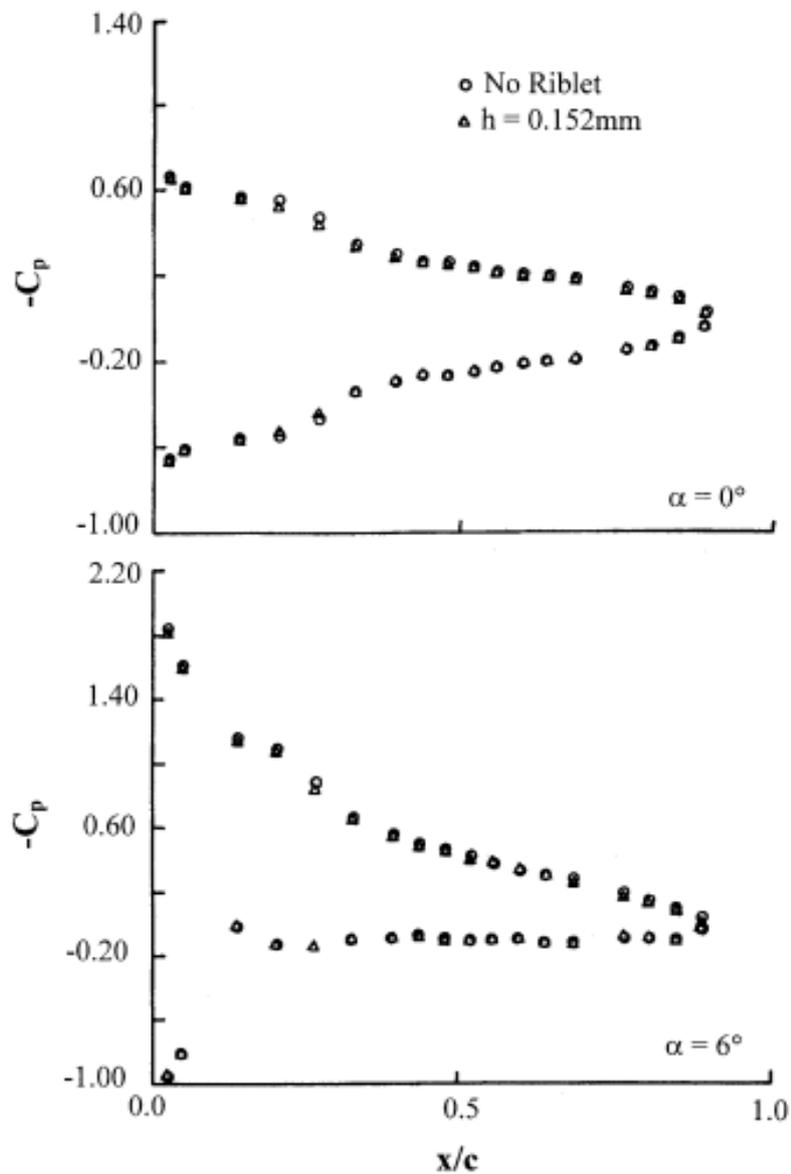


Figura 39: distribuzione delle pressioni sulla superficie del profilo alare NACA 0012, (immagine adattata da [31]).

La variazione di h^+ sulla superficie superiore del profilo alare per i due casi estremi, ovvero ad $\alpha = 0^\circ$ e 6° , è stata presentata in Figura 40, per tre valori di altezza della nervatura. Le variazioni di h^+ sono ampiamente all'interno dell'intervallo ottimale di h^+ per $h = 0.152\text{ mm}$; d'altra parte, le variazioni di h^+ per l'altezza della costolatura di 0.114 e 0.076 mm , sebbene non all'interno dell'intervallo ottimale, sono ancora nell'intervallo di riduzione della resistenza (Figura 38). Tutte le misurazioni dettagliate sul NACA 0012 sono state effettuate con $h = 0.152\text{ mm}$.

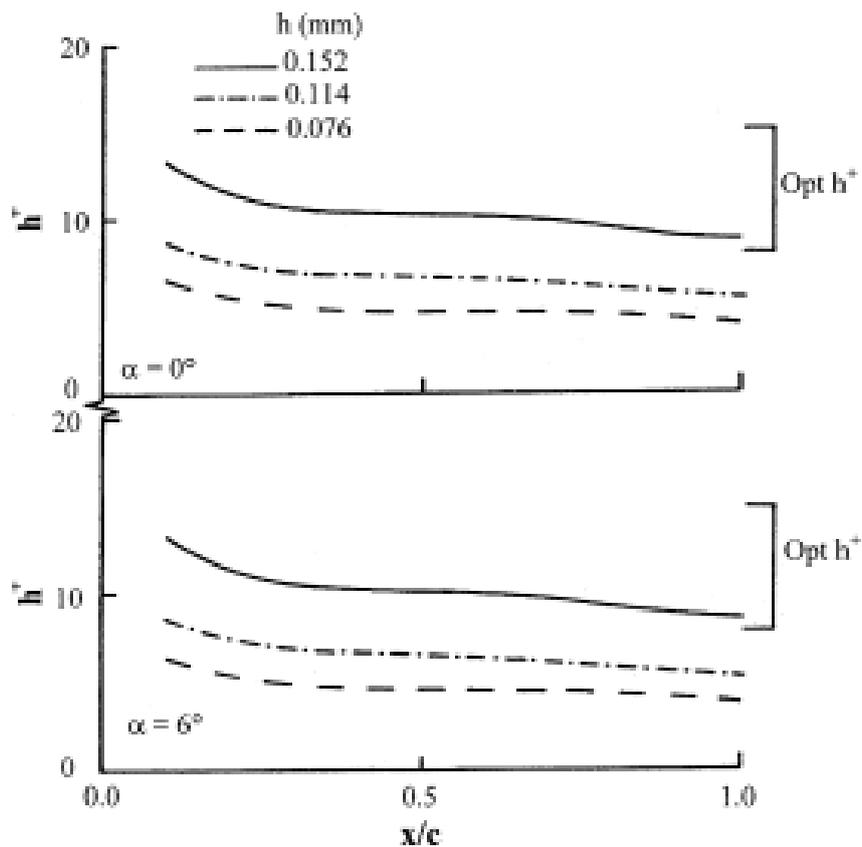


Figura 40: variazione di h_+ sulla superficie superiore del profilo NACA 0012, (immagine adattata da [31]).

I risultati della percentuale di riduzione della resistenza totale, (normalizzata rispetto alla resistenza del profilo alare liscio ad ogni α), per le nervature ottimizzate dagli esperimenti e i valori stimati della percentuale di riduzione del trascinamento viscoso (ACC) sono stati mostrati in Figura 41. La riduzione della resistenza totale è stata aumentata inizialmente con incidenza da circa il 7% a $\alpha = 0^\circ$ al 13% a $\alpha = 6^\circ$, oltre il quale è stata verificata una graduale diminuzione fino al raggiungimento della riduzione della resistenza aerodinamica nulla intorno a $\alpha = 10^\circ$; la massima riduzione della resistenza di attrito è stata valutata del 16% a $\alpha = 10^\circ$ e il valore corrispondente valore del gradiente di pressione secondo Clauser, (β), è stato stimato di circa 1.06. L'osservazione appena effettuata è stata indicativa del fatto che la riduzione della resistenza aerodinamica dovuta alle nervature sia stata incrementata all'aumentare dell'incidenza, come è stato dimostrato da [18]. A valori di incidenza più alti ($\geq 6^\circ$), sebbene β sia stato aumentato monotonamente lungo la direzione longitudinale x , la riduzione della resistenza aerodinamica è stata diminuita gradualmente a causa della progressiva decelerazione dello strato limite di velocità della superficie superiore, che ha condotto, infine, alla separazione.

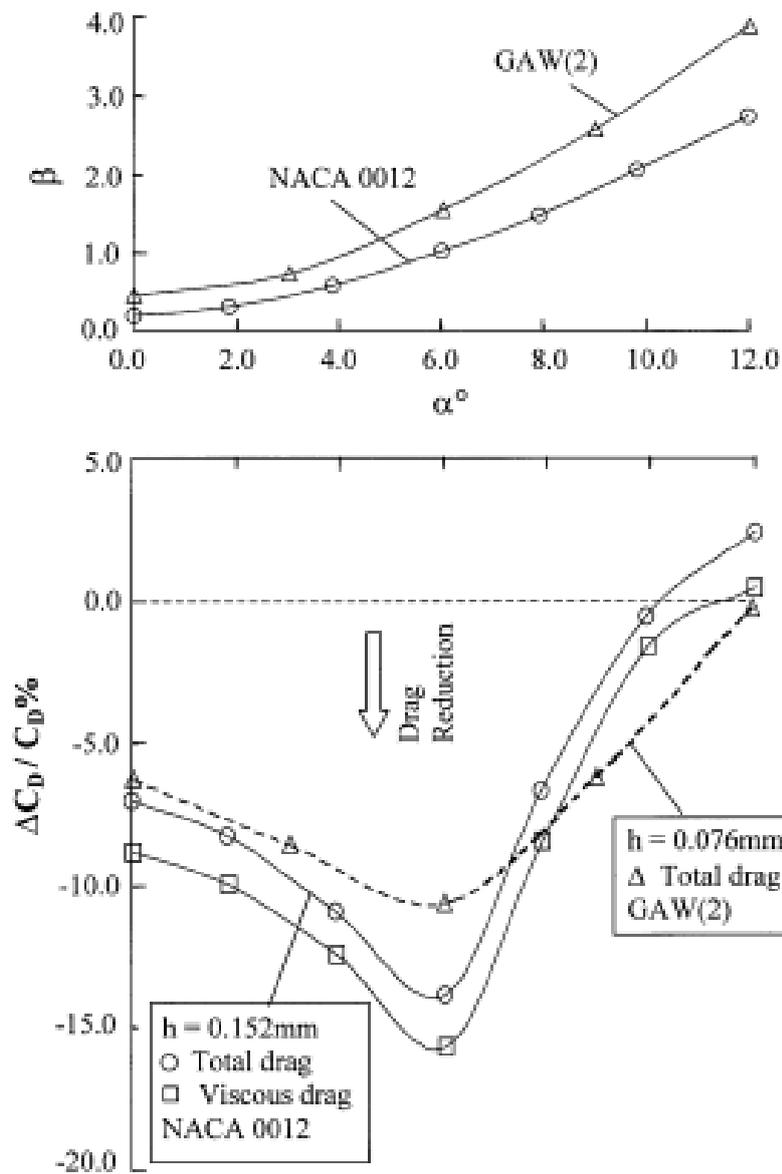


Figura 41: variazione della riduzione della resistenza e del parametro di Clouser con l'incidenza, (immagine adattata da [31]).

Per confermare che la tendenza di una maggior riduzione della resistenza aerodinamica con α non è stata considerata una caratteristica associata alla sezione simmetrica del profilo alare (NACA 0012) utilizzata e per studiare il comportamento delle nervature, ulteriori esperimenti sono stati condotti su un profilo alare GAW-2 nella stessa galleria del vento, strumentazione e condizioni di test simili; sono state effettuate solo misurazioni della resistenza totale per la dimensione della scanalatura di 0.076 mm. I risultati, riportati in Figura 41, hanno mostrato lo stesso comportamento qualitativo del NACA 0012; la riduzione totale massima del 10% si è verificata per $\alpha = 6^\circ$ con un valore di β intorno a 1.50. È stato osservato che entrambi i profili alari testati sia stata restituita la riduzione della resistenza aerodinamica massima attorno ad $\alpha = 6^\circ$ che è stata considerata essenzialmente una caratteristica associata alle condizioni di prova degli esperimenti e al numero di Reynolds. In particolare, a numeri di Reynolds più alti, è stato atteso che la massima riduzione della resistenza sia stata traslata a un valore più elevato di α . È stato notato anche che un significativo rallentamento del flusso vicino alla parete, derivante dal progressivo aumento del gradiente di pressione, abbia limitato l'efficacia massima delle nervature su un profilo alare.

Questa parte della trattazione è stata dedicata allo studio dell'effetto generato dalle superfici con nervature sul campo di moto in regime transonico. Squire e Savill [32] sono stati inseriti tra i primi ricercatori a studiare l'efficacia di nervature 3M di varie dimensioni a un numero di Mach subsonico e transonico. Hanno effettuato test in una galleria del vento a numeri di Reynolds relativamente alti e numeri di Mach di 0,88 e 0,50. La riduzione dell'attrito della pelle dovuta alle nervature è stata determinata tracciando il rapporto tra la variazione di θ lungo la superficie delle nervature e la corrispondente variazione lungo la stessa lunghezza della superficie liscia. È stata osservata una riduzione massima della resistenza all'attrito della pelle di circa il 5%, per il flusso a gradiente di pressione nullo, a entrambi i numeri di Mach: l'intervallo medio corrispondente di h^+ è stato indicato di 10-20. Le prestazioni delle riblets in gradienti di pressione avversi a $\beta^+ = 0.25$, sono state paragonate alle prestazioni ottenute con valore nullo del gradiente di pressione, al contrario, le nervature non hanno lavorato efficacemente a $\beta^+ = 0.50$. Su un corpo cilindrico, ad incidenza nulla, sono state effettuate misure di resistenza nel Mach nell'intervallo numerico di 0.30-0.815 e il numero di Reynolds, basato sulla lunghezza della nervatura (=550 mm), è stato variato tra $3.8-18.7 \times 10^6$. Sono state testate nervature 3M con $h=0.023, 0.033, 0.051$ e 0.076 mm e hanno riportato una riduzione massima della resistenza all'attrito della pelle del 7-8% (Figura 44) e l'intervallo corrispondente di $\overline{h_w^+}$ è stato valutato tra gli estremi 10-15, (l'altezza delle nervature h_w^+ è stata parametrizzata rispetto alle variabili interne dello strato limite turbolento alla parete; $\overline{h_w^+}$ è stata definita come media dell'altezza h_w^+ delle riblets). I precedenti risultati di Squire, Savill [32] e Coustols, Schmitt [33] hanno rivelato che l'efficacia delle nervature a numeri di Mach transonici è stata considerata accettabile a basse velocità per condizioni di gradiente di pressione nullo e lievemente sfavorevole.

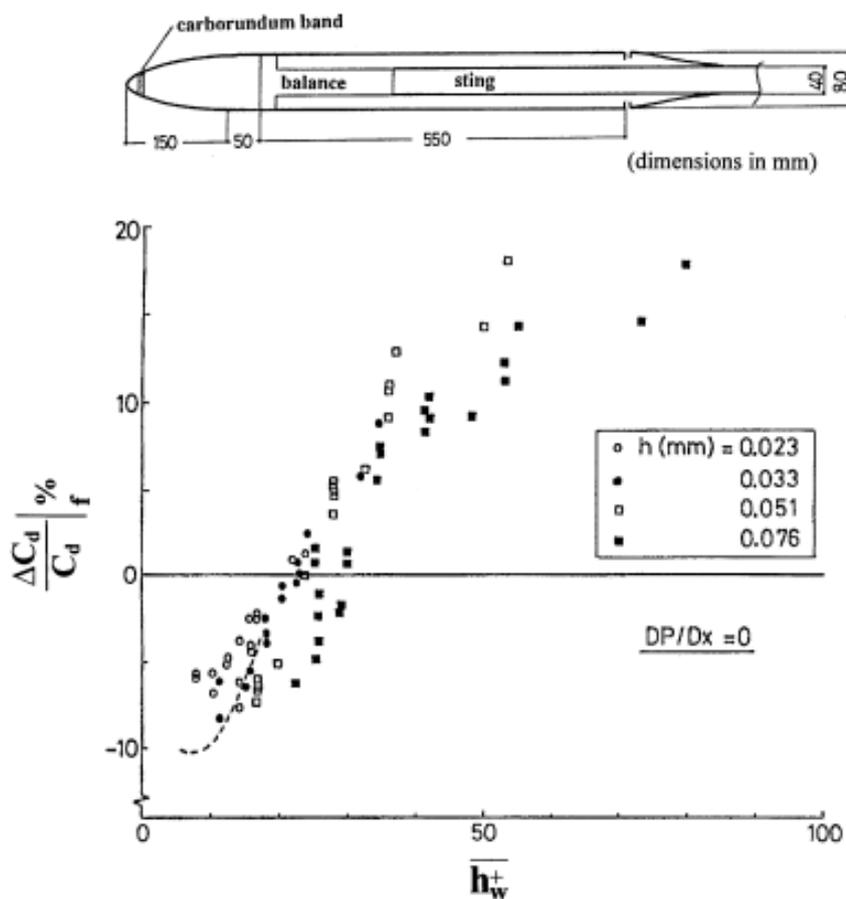


Figura 44: sintesi dei dati di resistenza rilevati, risultati corrispondenti a valori di bassa velocità, (immagine adattata da [31]).

Coustols e Schmitt [33] hanno presentato i risultati delle prestazioni delle riblets su un profilo alare CAST 7 a incidenza nulla nell'intervallo del numero di Mach di 0.65-0.76. Riblets 3M con $h = 0.017, 0.023, 0.033$ e 0.051 mm sono state applicate tra il 15% e il 100% della lunghezza della corda. Nella scia sono stati utilizzati sensori di Pitot per misurare la resistenza totale del profilo alare. È stata osservata una riduzione della resistenza totale di circa il 3.3% per $h = 0.023$ mm, mentre sono stati riscontrati aumenti di resistenza per nervature con 0.033 e 0.051 mm (Figura 45); i risultati per $h = 0.017$ mm sono stati rilevati come circa gli stessi di $h = 0.023$ mm. La suddetta riduzione della resistenza totale per $h = 0.023$ mm ha implicato una riduzione della resistenza viscosa di circa il 7.5-8% che si verificava nell'intervallo di $\overline{h_w^+}$ compreso tra 12 e 16. Questi risultati hanno mostrato l'efficacia delle nervature su un profilo alare transonico a incidenza nulla.

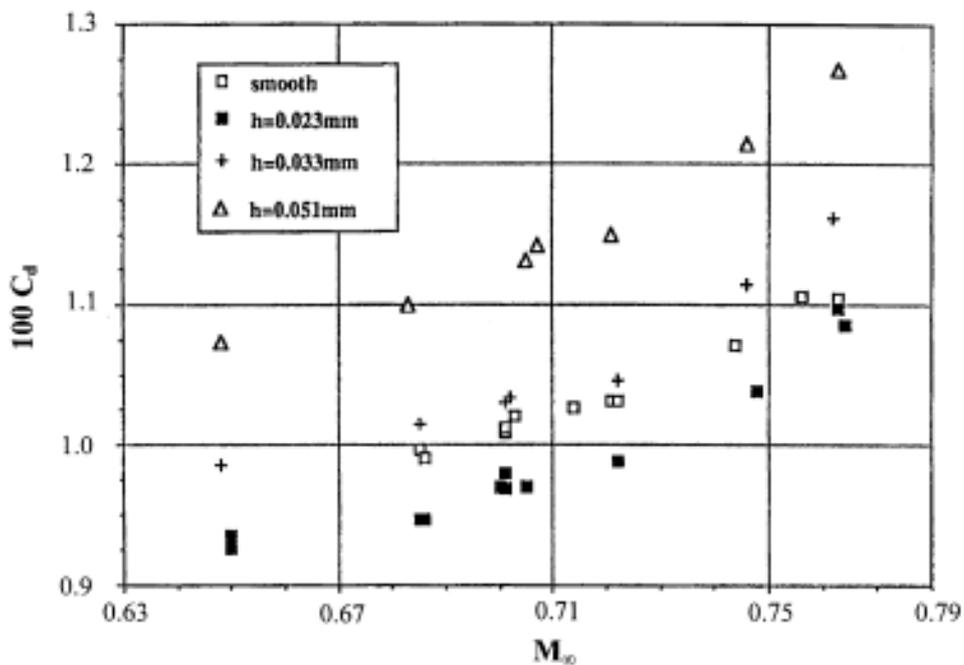


Figura 45: sintesi delle misurazioni di resistenza tratte dal profilo alare CAST 7, (immagine adattata da [31]).

L'effetto freccia alare è stato tradotto in strati limite tridimensionali. In aggiunta alla presenza dello strato limite di velocità incrociato, l'effetto dell'angolo di imbardata delle riblets avrebbe potuto aumentare significativamente con l'incidenza dell'ala. McClean e i suoi collaboratori [34] hanno riportato stime della riduzione della resistenza all'attrito cutaneo media da esperimenti di volo su un addestratore a reazione T-33 nell'intervallo di numeri Mach di 0.35-0.70; l'ala aveva un angolo di freccia di circa 9° e nervature da 3M, con altezze della nervatura di 0.033 e 0.076 mm, sono state applicate solo sulla superficie superiore dell'ala coprendo una distanza nel senso della corrente di circa il 76% della corda. Sulla base delle stime dello spessore di quantità di moto, (ottenute dai profili di velocità misurati), hanno dedotto una riduzione della resistenza viscosa fino al 6% nell'intervallo s_+ ($= h_+$) di 10-15. La prestazione delle nervature sono state stimate su una sezione di profilo alare ONERA-D, con un angolo di freccia di 22.5° , e incidenza nulla, rappresentate in Figura 46. Nervature 3 M di $h = 0.152, 0.076$ e 0.051 mm sono state utilizzate con scanalature allineate parallelamente alla direzione del flusso indisturbato e l'area manipolata era di circa l'85%. È stata registrata una riduzione massima della resistenza totale del 3-3.5% (Figura 47) per $\overline{h_w^+} < 10$

(valore medio di h_w^+ sulla lunghezza manipolata della superficie superiore del profilo alare) nell'intervallo del numero di Reynolds di $2.65-4.25 \times 10^5$, (le linee verticali in Figura 47 sono state impiegate per fare riferimento all'incertezza sperimentale), la corrispondente riduzione della resistenza all'attrito della pelle è stata stimata essere nell'intervallo del 5-6%.

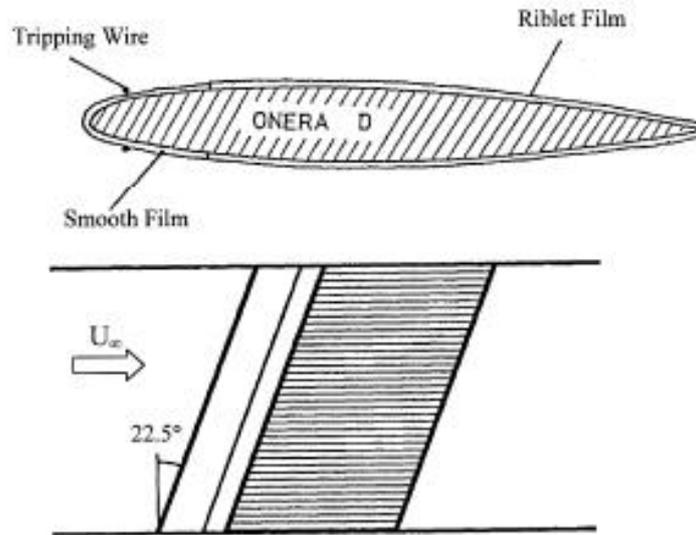


Figura 46: profilo alare ONERA D ricoperto da un rivestimento composto da riblets, (immagine adattata da [31]).

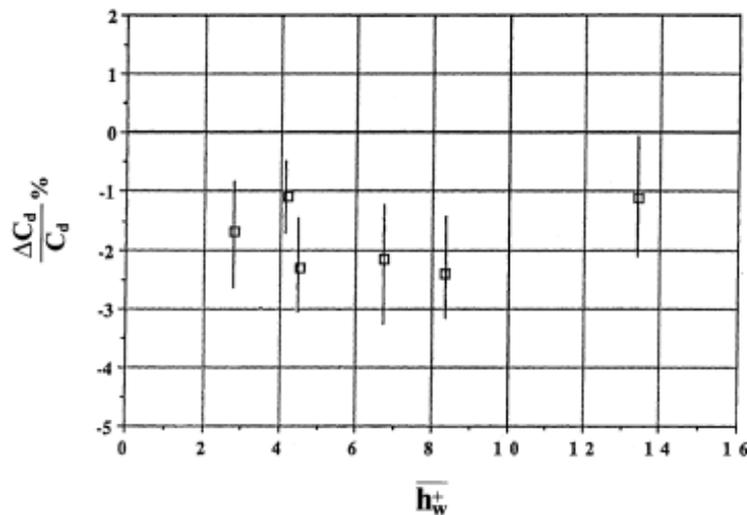


Figura 47: variazione del coefficiente di resistenza totale, profilo alare ONERA D, (immagine adattata da [31]).

Sundaram e i suoi collaboratori [35] hanno presentato risultati dettagliati delle prestazioni delle riblets su un'ala a freccia, mostrati in Figura 48, a basse velocità. Gli esperimenti condotti su un'ala a freccia, con una corda di 0.45m, la quale ha attraversato la galleria del vento a bassa velocità di sezione 1.5 m x 1.5 m: il modello dell'ala con un profilo GAW-2 spesso 13.6% ha riportato un angolo di freccia di 25° e il bordo

d'uscita, (smussato con uno spessore addizionale di corda dello 0.5%), è stato modificato in un bordo di uscita affilato per evitare la complessità del flusso dovuta alla separazione, i rivestimenti di riblets sono stati allineati parallelamente al flusso indisturbato e applicati tra il 13% e il 96% di corda su entrambi i lati superiori e inferiori. Tutte le misurazioni sono state effettuate con un numero di Reynolds di 0.75×10^6 coprendo un intervallo di incidenza di $0-6^\circ$.

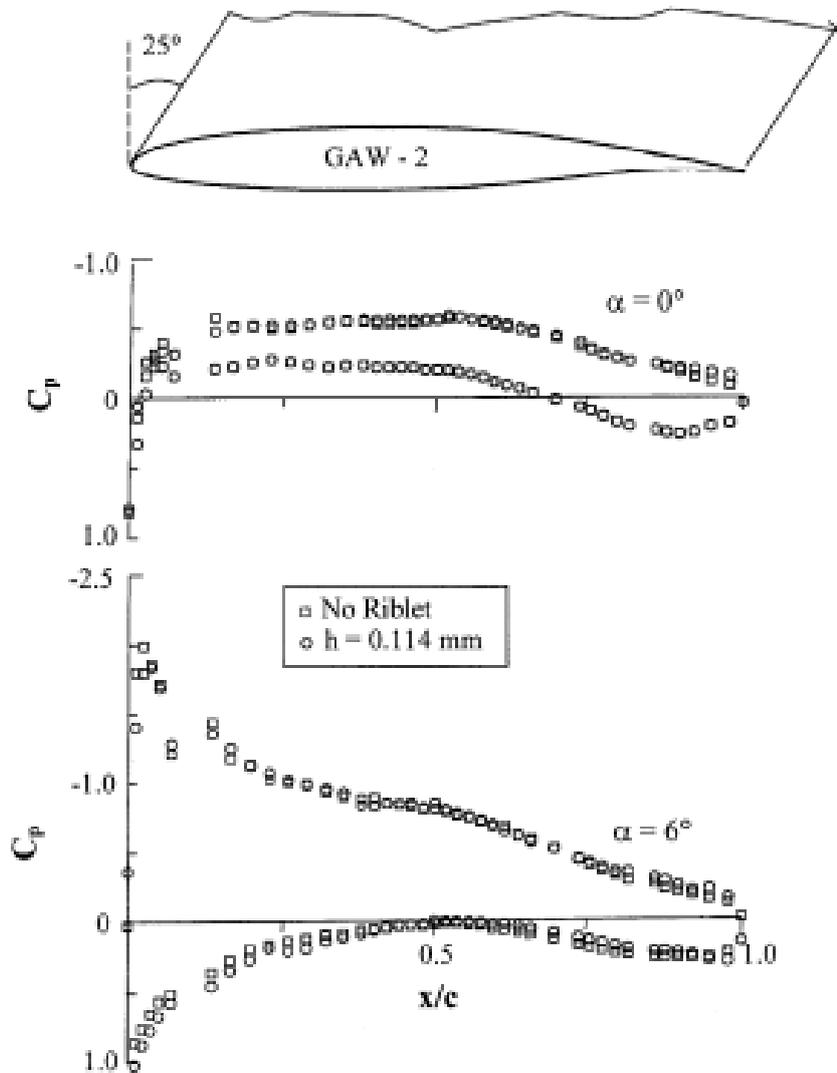


Figura 48: distribuzione delle pressioni sulla superficie di un'ala a freccia, profilo alare GAW-2, (immagine adattata da [31]).

Le distribuzioni di pressione superficiale misurate $\alpha = 0^\circ$ e 6° sono state presentate in Figura 48 che ha mostrato ancora una volta che l'effetto delle nervature sulla pressione superficiale è stato valutato piccolo. I calcoli dello strato limite sono stati effettuati utilizzando le distribuzioni di C_p misurate lungo la linea di corrente sulla superficie superiore dell'ala. La Figura 49 ha mostrato la variazione calcolata di h^+ sulla superficie superiore dell'ala per tre valori di h (0.152, 0.114, 0.076 mm) a $\alpha = 0^\circ$ e 6° . I rivestimenti di Riblets con $h = 0.114$ mm sono stati scelti opportunamente per tutti le misure [35].

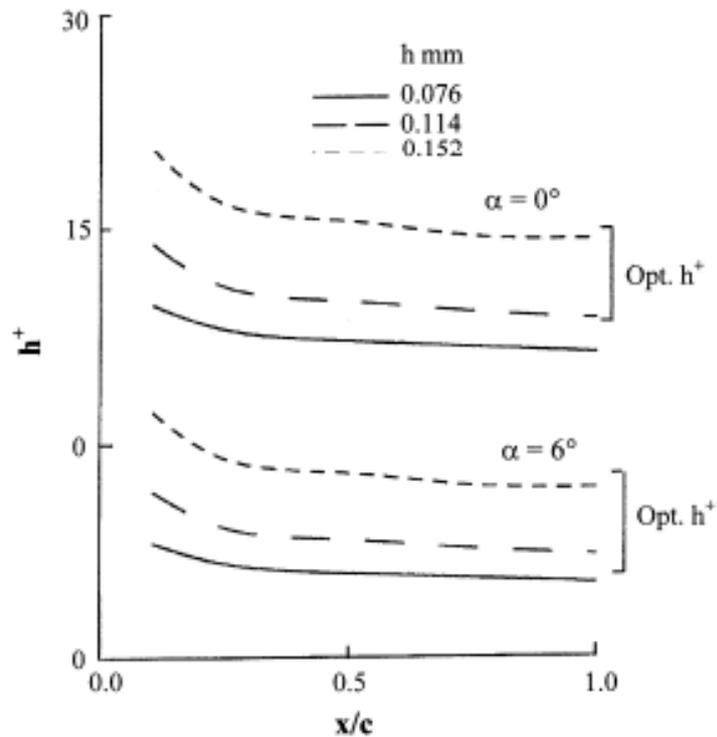


Figura 49: variazione di h^+ sulla superficie superiore, profilo alare GAW-2, (immagine adattata da [31]).

La Figura 50 ha espresso i risultati della percentuale di resistenza totale e di riduzione dell'attrito viscoso in funzione dell'incidenza; come fattore di normalizzazione per la riduzione della resistenza totale ad ogni α è stata selezionata la resistenza totale del profilo alare liscio privo di nervature. La stima di β è stata calcolata utilizzando un gradiente di pressione medio in corrispondenza di ogni α . La riduzione della resistenza aerodinamica totale del 6% e la riduzione della resistenza aerodinamica di attrito dell'8%, osservate a $\alpha = 0^\circ$, si sono rivelate in buon accordo con la riduzione della resistenza aerodinamica che è stata osservata su profili alari 2D e in flussi di gradiente a pressione nullo. Con un aumento di α , la riduzione della resistenza sia totale che viscosa è stata diminuita progressivamente, il che è stato considerato in netto contrasto con l'osservazione fatta sui profili alari 2D, riportata in Figura 41.

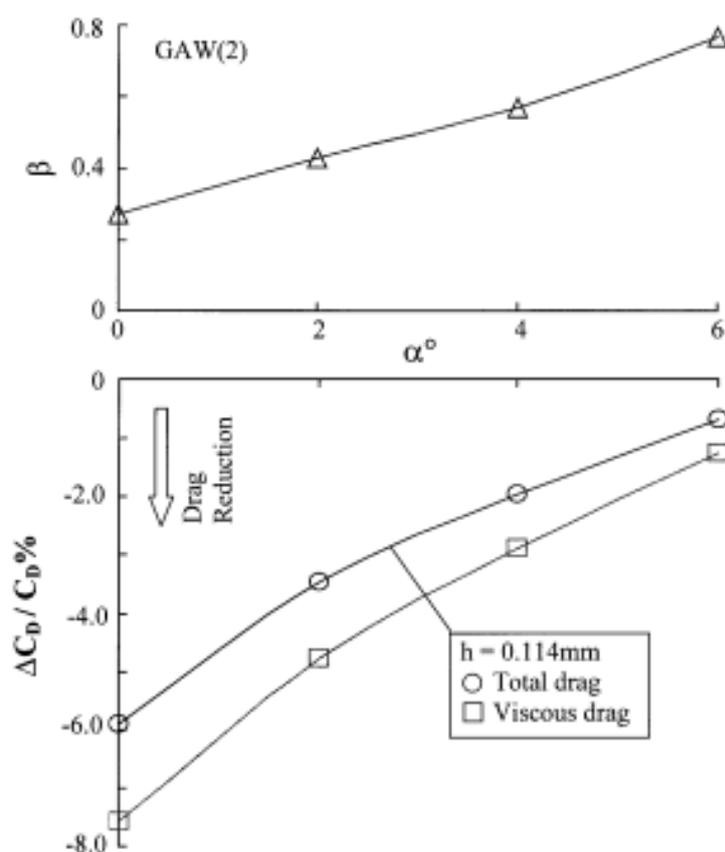


Figura 50: variazioni di riduzione di resistenza e di parametro di Clouser con l'incidenza in un'ala a freccia, profilo alare GAW-2, (immagine apportata da [31]).

I dati disponibili sui profili alari a velocità subsoniche e transoniche e sull'ala a freccia a basse velocità hanno indicato che è stato possibile ottenere una riduzione della resistenza di attrito nell'intervallo del 5-8% per le nervature ottimizzate a bassa o zero incidenza. Sui corpi cilindrici, le misurazioni di Coustols e Schmitt [33] a numeri di Reynolds relativamente elevati hanno mostrato una massima riduzione dell'attrito di circa il 7-8% per le nervature ottimizzate a incidenza nulla (la resistenza dell'attrito su questo modello ha contribuito a circa il 96% di resistenza totale) e su un intervallo di numeri di Mach compreso tra 0.30 e 0.81. In una configurazione di velivolo civile da trasporto, l'effettiva riduzione della resistenza viscosa è stata dovuta principalmente da due fattori: l'area coperta dalle nervature e se la geometria delle nervature è stata ottimizzata per i flussi di ala e fusoliera in modo appropriato. Inoltre, le prestazioni delle nervature hanno mostrato tendenza ad essere gravemente compromesse in zone di grande tridimensionalità (ad esempio attorno alla giunzione del corpo alare, all'estremità dell'ala e nelle regioni posteriori della fusoliera).

Coustols e Schmitt [33] hanno studiato l'efficacia delle nervature 3M su una scala 1:11 di un modello di corpo alare dell'Airbus A-320 nell'intervallo del numero di Mach di 0.30-0.82 e nell'intervallo di incidenza da -2° a 3° ; il massimo numero di Reynolds basato sulla lunghezza della fusoliera di 3.416 m era di circa 40×10^6 . Rivestimenti, con riblets aventi altezza $h = 0.023$ mm, sono stati applicati con scanalature allineate alla direzione del flusso libero esterno e l'area coperta da queste ultime è stata occupata per circa il 66% sulla configurazione di ala-fusoliera; la profondità della scanalatura è stata precedentemente ottimizzata il flusso della fusoliera a $M = 0.70$. La corrispondente riduzione della resistenza all'attrito della pelle è stata stimata in circa il 4,85%. Hanno suggerito che il suddetto valore di riduzione della resistenza aerodinamica non

stato considerato il massimo poiché la dimensione della scanalatura non è stata ottimizzata per le ali e inoltre, l'area bagnata coperta dalle nervature era solo del 66% circa.

Van Der Hoven e Bechert [37] hanno riportato misurazioni della resistenza aerodinamica utilizzando una bilancia estensimetrica a sei componenti su un modello 1:4.2 dell'aeromobile DORNIER Do-228 nella galleria del vento DNW, nell'intervallo di velocità del flusso libero di 40-90 m/s; il corrispondente numero di Reynolds basato sull'ala (sezione centrale) era rispettivamente di $1,37 \times 10^6$ e $3,09 \times 10^6$. Sono state scelte pellicole riblets con $h = 0.076\text{mm}$ che è stato scelto come compromesso, considerando h ottimale per la fusoliera e le ali, e le scanalature sono state allineate parallelamente al flusso libero. Le misurazioni dell'equilibrio (con dispositivi di sgancio sulla fusoliera e sulle ali) hanno mostrato una riduzione della resistenza aerodinamica nell'ordine dell'1-6%. Gli autori hanno, tuttavia, indicato che la riduzione della resistenza aerodinamica del 6% è stata affermata piuttosto irrealistica a causa di alcune imprecisioni nelle misurazioni del bilanciamento; una riduzione della resistenza totale del 2-3% è stata considerata più affidabile.

Szodruch [38] ha riportato una valutazione di volo delle prestazioni delle riblets su un aeromobile Airbus A-320. Circa il 70% della superficie del velivolo è stata ricoperta da nervature da 3 M, mostrato in Figura 51, e la riduzione totale della resistenza aerodinamica è stata valutata in base al risparmio di carburante nei test di volo. Questi test hanno rivelato a riduzione della resistenza totale di poco meno del 2% nell'intervallo del numero di Mach di 0.77-0.79, in conformità con le loro previsioni. I risultati sono estremamente significativi poiché hanno riportato vantaggi nelle applicazioni di volo effettive.

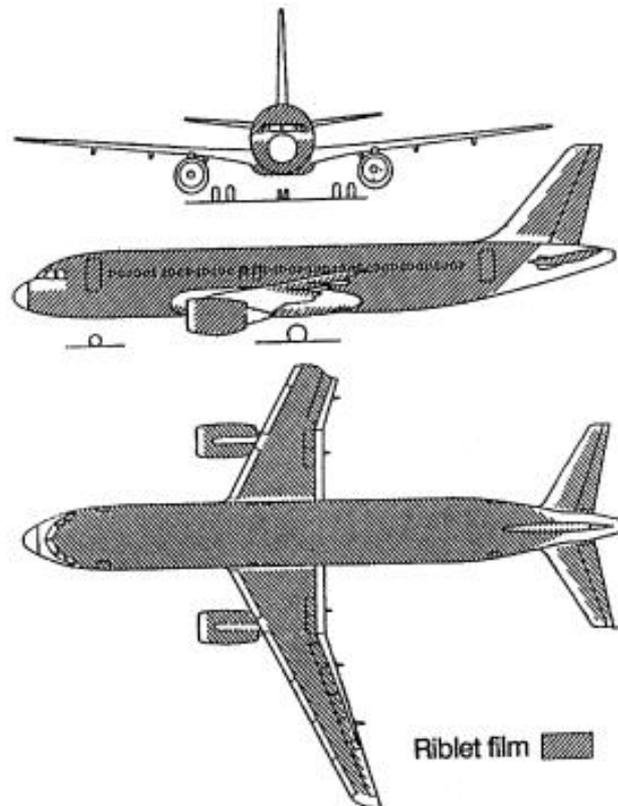


Figura 51: Airbus A-320 ricoperto da pellicole di riblets, (immagine adattata da [31]).

4.3 Applicazione di superfici con nervature per tessuti sportivi

A causa delle limitazioni delle passate tecnologie Riblets, sia i vantaggi nelle applicazioni commerciali che i metodi di applicazione sono stati limitati. Poiché le nervature hanno fornito una riduzione della resistenza aerodinamica su oggetti in cui la forma dominante di resistenza è stata causata dalla presenza di uno strato limite turbolento in superficie, solo gli oggetti con un certo fattore di forma avrebbero mostrato vantaggi misurabili. Gran parte della resistenza generata su oggetti lunghi con lati relativamente piatti è stata derivata dalla turbolenza sulla parete, pertanto, le nervature avrebbero riportato un effetto apprezzabile. Tuttavia, per oggetti come le automobili, dove il contributo predominante della resistenza è stato principalmente causato dalle pressioni, l'applicazione di nervature avrebbe mostrato un effetto minimo.

Il mercato commerciale dominante e forse unico in cui è stata ampiamente commercializzata la tecnologia Riblets per la riduzione della resistenza aerodinamica è stato considerato quello dei costumi da bagno competitivi. La popolazione generale è stata informata dei vantaggi di riduzione della resistenza aerodinamica della pelle di squalo con l'introduzione delle tute Fastskin di Speedo nel 2004. Speedo ha affermato una riduzione della resistenza aerodinamica di diversi punti percentuali in un test statico rispetto ad altre tute da gara. Tuttavia, dati i compromessi della geometria delle scanalature fatte durante la produzione, è stato difficile attendersi un raggiungimento dei valori massimi della riduzione della resistenza aerodinamica.

È stata notevolmente dichiarata la complessità di fabbricazione delle nervature in questa tipologia di applicazioni. Di conseguenza, le geometrie di riblets tessute da filo hanno riportato opzioni limitate di forme di riblets fattibili. Dal motivo in tessuto nei costumi da bagno Fastskin, sono state formate costole che assomigliano a riblets a lama larga con piccole scanalature sulla parte superiore. Le nervature più grandi sono state formate dal modello di macro-intreccio, e le nervature più piccole sono state create dalle singole armature di filo allineate con le macro-nervature. Entrambe queste forme simili a nervature sono state distinte nella Figura 52. Come mostrato nella Figura 52(a), le nervature non stirate sono state strettamente imballate. Man mano che il tessuto è stato allungato, la larghezza e la spaziatura delle nervature è stata incrementata, come mostrato in Figura 52(b). La diminuzione associata del rapporto h/s è stata considerata dipendente dalle dimensioni del corpo di ciascun nuotatore, che è stato supposto un altro fattore compromettente nel design. Inoltre, anche lo spessore della rigatura è stato un fattore considerato nel design. A parte le limitazioni imposte dai modelli di tessitura disponibili, la flessibilità nelle punte delle nervature ha ostacolato la capacità del tessuto di impedire la traslazione trasversale dei vortici sulla superficie. Per la risoluzione di questa problematica sono state applicate nervature più spesse, utilizzate per la resistenza; tuttavia, causando l'allontanamento dalle caratteristiche geometriche ottimali cui è stata corrisposta una diminuzione della capacità di riduzione della resistenza massima rispetto a nervature più sottili [11].

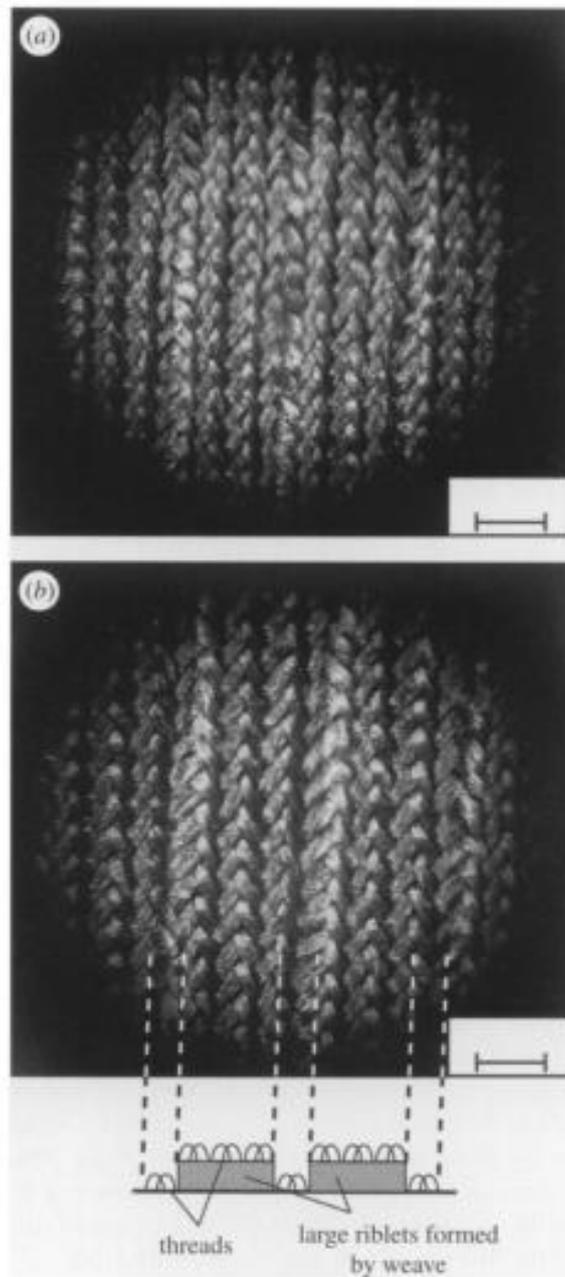


Figura 52: immagini delle geometrie delle nervature, (a) tessuto non stirato (barra della scala, 1.0 mm); (b) costume da bagno Fastskin Speedo stirato (barra della scala, 1.0 mm), con esso è stato indicato uno schema dell'apparente struttura gerarchica delle nervature formate da fili, (immagine adattata da [11]).

L'aero/idrodinamica ha giocato un ruolo fondamentale nel nuoto. Gli studi hanno stimato che oltre il 90% della spinta erogata dal nuotatore sia stata spesa per superare la resistenza aero/idrodinamica. Recentemente, i costumi da bagno sono stati commercializzati in modo imponente, principalmente come mezzo per ridurre la componente di attrito cutaneo della resistenza totale, conferendo così un vantaggio competitivo rispetto ad altri nuotatori. Alcuni produttori hanno rivelato una significativa riduzione della resistenza aerodinamica, ma è stato difficile trovare ricerche indipendenti nella letteratura aperta che abbiano supportato queste affermazioni e contro affermazioni. In effetti, non è stato chiarito che i costumi da bagno in realtà possano ridurre l'attrito della pelle o altre forme di resistenza. Il lavoro svolto da Moria e

dai suoi collaboratori è stato dovuto ad uno studio comparativo di tre costumi da bagno prodotti commercialmente dalla concorrenza.

I costumi da bagno moderni hanno percorso un lungo percorso e attraversato una serie di cambiamenti di stili e design nel corso dei decenni. Più recentemente, i produttori hanno soffermato l'attenzione sulle prestazioni dei loro costumi da bagno, in particolare, sulla riduzione della resistenza idrodinamica e migliorando la galleggiabilità. Dai Giochi Olimpici di Pechino 2008, quasi tutti i principali produttori hanno introdotto costumi da bagno interi realizzati in poliuretano semi-integrale combinato con tessuti Lycra. I costumi da bagno più pubblicizzati di queste categorie sono Speedo, TYR, Blueseventy, Arena, Diana e Jaked In Beijing Olympic, su 32 eventi, in 21 di essi hanno battuto record mondiali e record olimpici. I produttori hanno affermato che queste tute hanno mostrato caratteristiche come peso ultraleggero, idrorepellenza, oscillazione muscolare e riduzione delle vibrazioni della pelle. È stato rivelato che l'innovazione tecnologica sia nel design che nei materiali ha svolto un ruolo cruciale nello sport raggiungendo la sua posizione attuale in entrambi alte prestazioni. Al fine di comprendere l'idrodinamica completa di nuotatori, costumi da bagno e trovare risposte a molte domande contemporanee, presso la Scuola di Ingegneria Aerospaziale, Meccanica e di Produzione è stato intrapreso un ampio progetto di ricerca sull'aero/idrodinamica dei costumi da bagno (Università RMIT). Come parte di questo grande progetto di ricerca è stato intrapreso uno studio comparativo di una serie di costumi da bagno acclamati dal punto di vista commerciale. Lo studio è stato condotto sperimentalmente utilizzando RMIT Industrial Wind Tunnel e una metodologia di test appositamente sviluppata.

Al fine di ottenere sperimentalmente proprietà aerodinamiche per una gamma di costumi da bagno disponibili in commercio realizzati con varie composizioni di materiali; è stato prodotto un cilindro di 110 mm di diametro. Il cilindro è stato realizzato in materiale PVC ed è stato usato del riempitivo per renderlo strutturalmente rigido. Il cilindro era supportato verticalmente su un trasduttore a sei componenti con una sensibilità dello 0,05% in un intervallo da 0 a 200 N, come mostrato nella Figura 53. Le forze aerodinamiche e i momenti da esse generati sono stati misurati per un intervallo di numeri di Reynolds basati sul diametro del cilindro e sulle diverse velocità dell'aria nella galleria del vento (da 10 km/h a 130 km/h con un incremento di 10 km/h). Ciascun test è stato condotto in funzione dell'orientamento della cucitura del costume da bagno e della posizione della cucitura, come riportato in Figura 54.

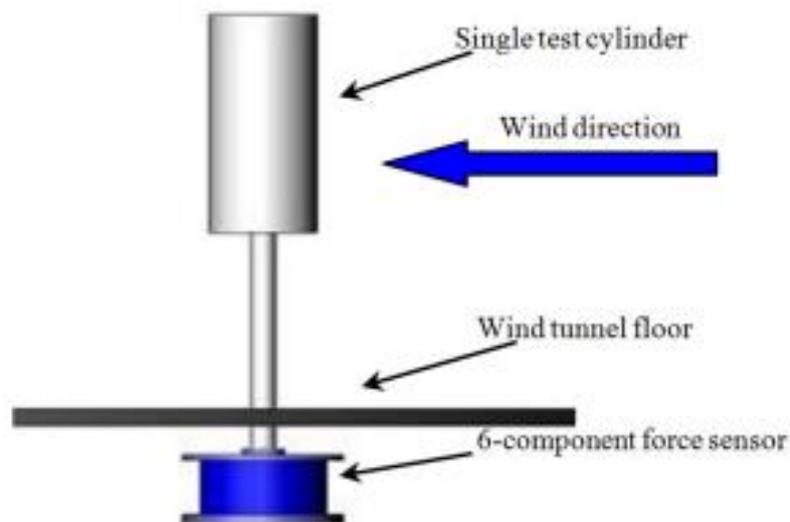


Figura 53: modello CAD schematico del cilindro introdotto nella galleria del vento RMT, (immagine adattata da [39]).

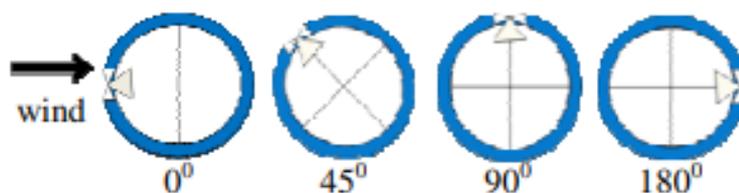


Figura 54: orientamento della cucitura, vista dall'alto, (immagine adattata da [39]).

Come accennato in precedenza, la galleria del vento industriale RMIT a circuito chiuso, con una piattaforma girevole per simulare gli effetti del vento laterale, è stata impiegata per le misurazioni. La velocità massima del tunnel è stata valutata di circa 150 chilometri all'ora. Le dimensioni della sezione di prova rettangolare sono larghe 3 metri, alte 2 metri e lunghe 9 metri e l'area della sezione trasversale del tunnel è di 6 metri quadrati. Una vista in pianta del tunnel è mostrata nella Figura 55. Il tunnel è stato calibrato prima e dopo aver condotto gli esperimenti e le velocità dell'aria all'interno della galleria del vento sono state misurate con un tubo di Pitot a testa ellissoidale modificato del National Physical Laboratory (NPL), (situato all'ingresso della sezione di prova), che è stato collegato tramite tubo flessibile con il sensore di pressione Baratron realizzato da MKS Instruments. Il cilindro è stato collegato tramite un punto di montaggio con la cella di carico multi-asse JR3 comunemente noto anche come sensore forza-coppia a 6 gradi di libertà prodotto da JR3, Inc., Woodland, USA. Il sensore è stato utilizzato per misurare tutte e tre le forze (resistenza, portanza e forze laterali) e tre momenti (momenti di imbardata, beccheggio e rollio) alla volta. Ogni punto dati è stato registrato per un tempo medio di 20 secondi con una frequenza di 20 Hz, assicurando che l'interferenza elettrica fosse ridotta al minimo. Sono stati raccolti più scatti a ciascuna velocità testata e i risultati sono stati calcolati in media per ridurre al minimo gli ulteriori possibili errori nei dati grezzi sperimentali. Il cilindro non rivestito dal tessuto è stato testato inizialmente per valutare le prestazioni aerodinamiche. Quindi il cilindro è stato avvolto con diversi tessuti per costumi da bagno per misurare le loro forze e momenti aerodinamici. Per questo studio sono stati selezionati tre nuovissimi materiali per costumi da bagno integrali, poiché sono stati ufficialmente utilizzati in vari eventi competitivi nei Giochi mondiali e olimpici. Questi costumi da bagno, riportati in Figura 56 sono: (a) Speedo LZR, (b) TYR Sayonara e (c) Blueseventy Pointzero3.



Figura 56: costumi da bagno Speedo LZR, TYR Sayonara e Blueseventy Pointzero3 utilizzati nella campagna sperimentale, (immagine apportata da [39]).

Il costume Speedo LZR è composto da 70% Nylon (Polyamide) e 30% Elastane (Lycra) e il pannello in poliuretano è stato sovrapposto ad alcune parti del costume Speedo mentre la cucitura è stata realizzata mediante flash unendo i due bordi (ad esempio applicando la cosiddetta saldatura ad ultrasuoni). La larghezza della cucitura è di circa 18 mm.

D'altra parte, il TYR Il costume da bagno Sayonara è stato realizzato in 55,5% PU-cloroprene, 40,5% nylon e 4% lega di titanio; e il Blueseventy Pointzero3 è stato composto per il 75% in nylon e per il 25% in PU-CR. Le cuciture dei costumi da bagno TYR Sayonara e Blueseventy Pointzero3 sono state realizzate utilizzando il metodo "flat lock" a quattro vie. La cucitura ha una lunghezza di 18 punti per pollice (25,4 mm). La larghezza della cucitura è di circa 6 mm.

Il coefficiente di resistenza è stato calcolato in Equazione 8.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho u^2 S} \quad [8]$$

Il numero di Reynolds parametrizzato rispetto al diametro del cilindro è stato espresso nell'Equazione 9.

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad [9]$$

La resistenza in funzione della velocità del fluido e C_D in funzione di Re per una serie di posizioni di cucitura per i costumi da bagno testati sono state presentate nelle Figure da 57 a 63. Per confrontare i risultati dei materiali dei costumi da bagno, la forza di resistenza e il parametro adimensionale C_D , del cilindro senza tessuto sono stati mostrati in tutte le figure. Le forze di resistenza e i valori di C_D per il costume da bagno Speedo LZR con quattro orientamenti di cucitura (0° , 45° , 90° e 180°) sono stati mostrati nelle Figure 57 e 58. La Figura 57 ha mostrato che la resistenza per il cilindro nudo è stata aumentata continuamente senza eventuali cambiamenti improvvisi come previsto. Tuttavia, un improvviso calo delle forze di resistenza tra 90 e 110 km/h è stato evidenziato per la tuta Speedo LZR a tutti gli angoli di cucitura. La variazione C_D con Re , mostrata nella Figura 58, ha indicato chiaramente che il materiale Speedo LZR ha subito una rapida criticità di resistenza per tutte le posizioni della cucitura eccetto la posizione della cucitura a 45° . L'effetto di transizione è stato presentato molto prima a 70 km/h rispetto ai 90 km/h per altre posizioni della cucitura. La posizione della cucitura a 45° ha migliorato maggiormente il gradiente di pressione favorevole, ritardando la separazione dello strato limite, rispetto ad altre posizioni. In generale, la superficie più ruvida dei costumi da bagno ha esteso lo strato limite turbolento riducendo la lunghezza dello strato limite laminare e infine ritarda la separazione del flusso rispetto alla superficie liscia del cilindro nudo. Come previsto, non è stata notata alcuna differenza di resistenza o di C_D per le posizioni di giunzione di 0° e 180° a tutte le velocità testate. Tuttavia, sono state notate variazioni minori di resistenza e rispettivo coefficiente adimensionale per l'angolo di giunzione a 90° rispetto alle altre posizioni di giunzione. La posizione della cucitura a 90° non è stata presentata come favorevole alla riduzione della resistenza, poiché ha provocato un anticipo della separazione rispetto alla posizione di giunzione a 0° .

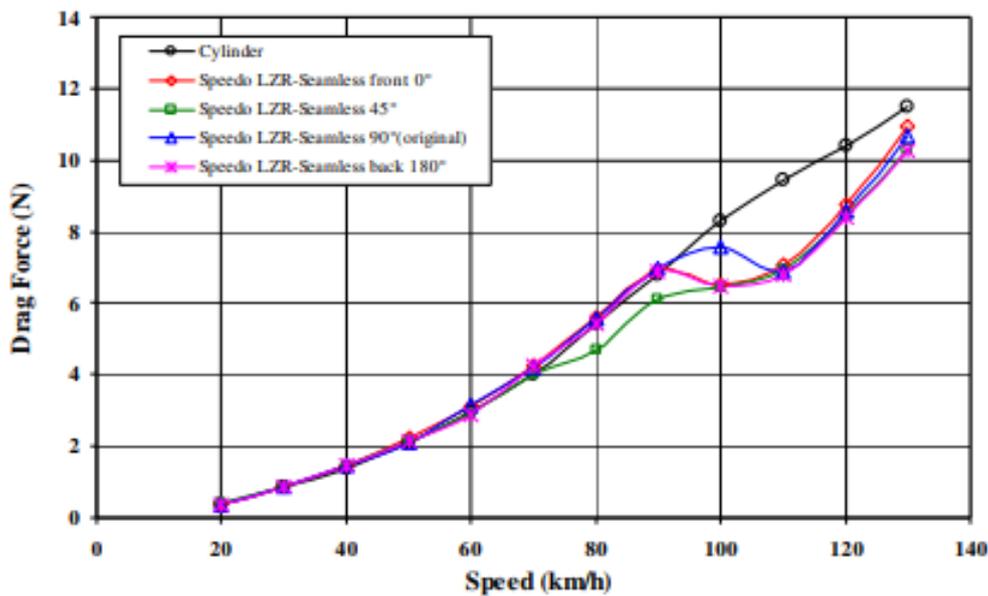


Figura 57: variazione di resistenza con la velocità del costume Speedo LZR, (immagine apportata da [39]).

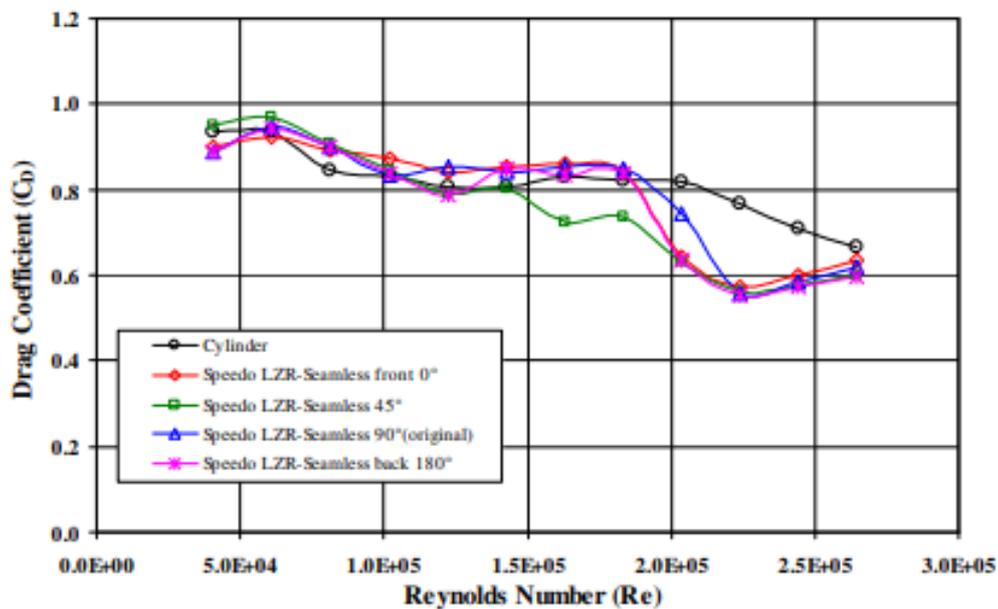


Figura 58: variazione di C_D con Re per il costume da bagno Speedo LZR, (immagine apportata da [39]).

I valori di resistenza e C_D per il costume da bagno TYR Sayonara sono stati mostrati nelle Figure 59 e 60. Non è stato riportato alcun effetto di transizione notato sulla resistenza e sul coefficiente di resistenza, eccetto la posizione della cucitura di 45°. La posizione della cucitura del costume da bagno TYR Sayonara a tutti gli altri angoli testati ha riportato valori di resistenza e C_D più elevati rispetto al cilindro nudo. Un'attenta ispezione ha rivelato che la superficie del materiale è stata individuata molto più liscia rispetto

al costume da bagno Speedo LZR. Pertanto, la superficie relativamente liscia non ha aiutato il flusso a generare l'effetto voluto.

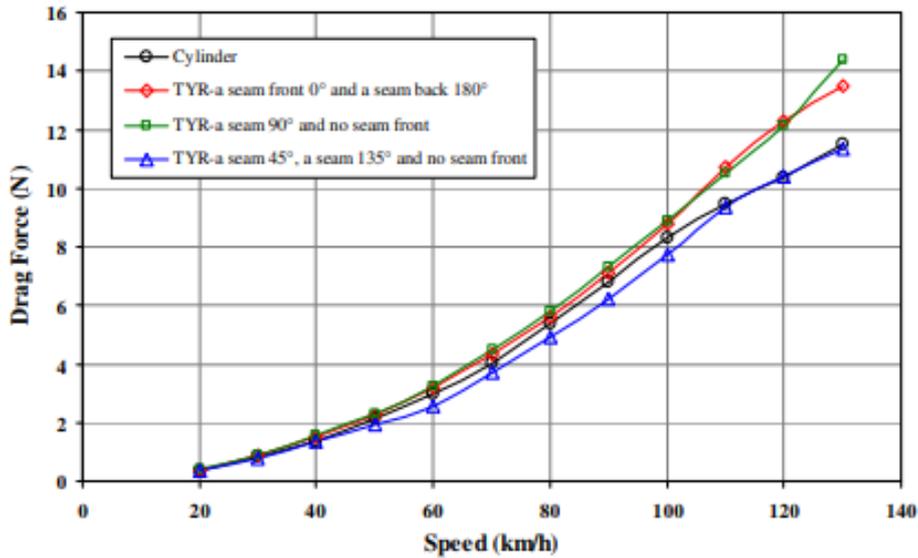


Figura 59: variazione di resistenza con la velocità misurata per il costume TYR Sayonara, (immagine apportata da [39]).

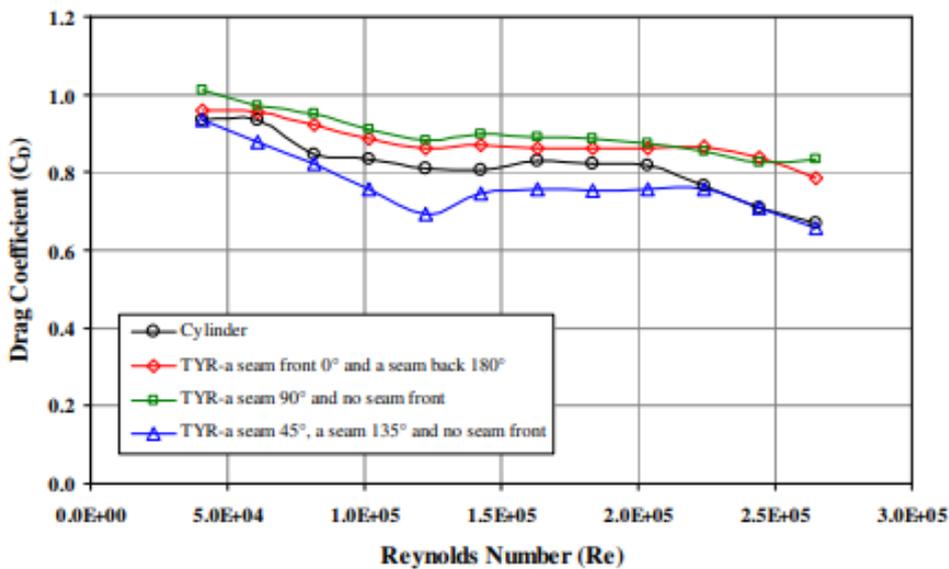


Figura 60: variazione di C_D con Re per il costume TYR Sayonara, (immagine apportata da [39]).

Un effetto molto simile è stato notato anche per il costume da bagno Bluseventy Pointzero3, i cui risultati sono stati riassunti in Figura 61 e 62. Tuttavia, a causa della complessità della posizione delle cuciture sulla tuta, le cuciture sono state posizionate sul cilindro di prova contemporaneamente a 45° e 90°; e a $\pm 45^\circ$. I valori medi di resistenza e C_D in queste posizioni di giunzione sono stati misurati inferiori di circa il 13% rispetto ad altre posizioni di giunzione (+90°, 0° e 180°). Un'attenta ispezione ha anche rivelato che sia i costumi da bagno TYR Sayonara che quelli Bluseventy Pointzero3 sono stati composti da più strati, i cui

spessori sono stati fabbricati rispettivamente di 0,3 mm e 0,5 mm. Lo Speedo LZR è stato realizzato in un unico strato e lo spessore è stato valutato essere inferiore a TYR Sayonara e Blueseventy Pointzero3.

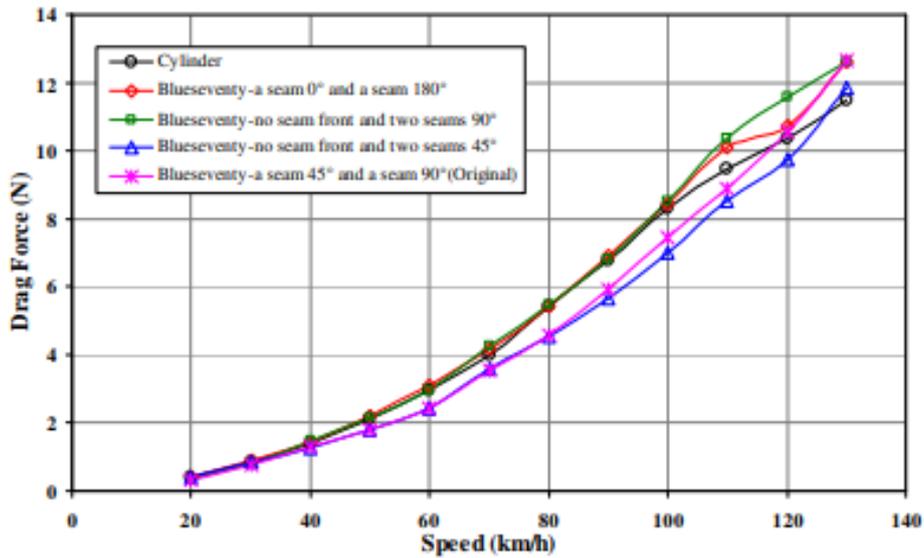


Figura 61: variazione di resistenza con la velocità misurata per il costume Blueseventy Pointzero3, (immagine apportata da [39]).

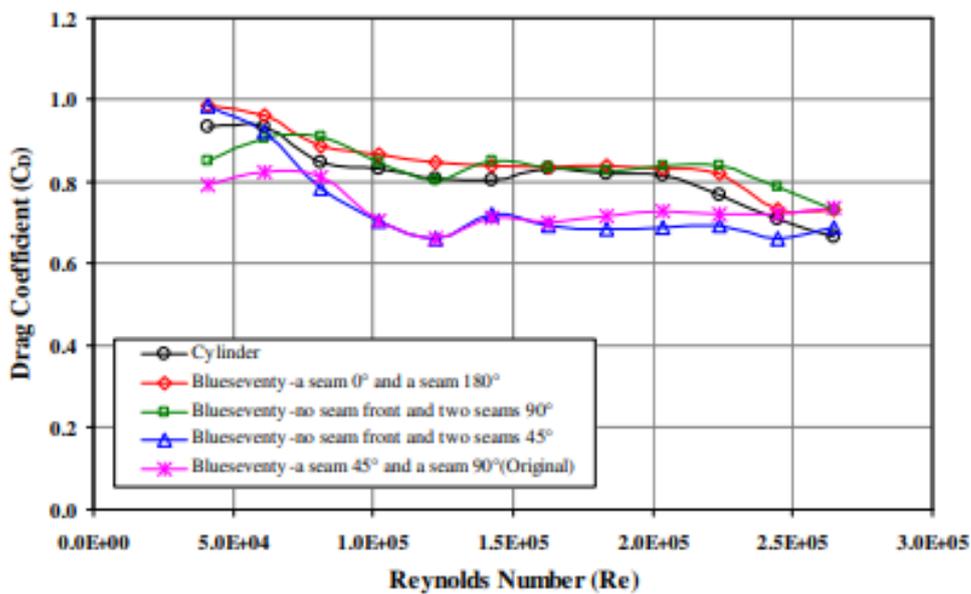
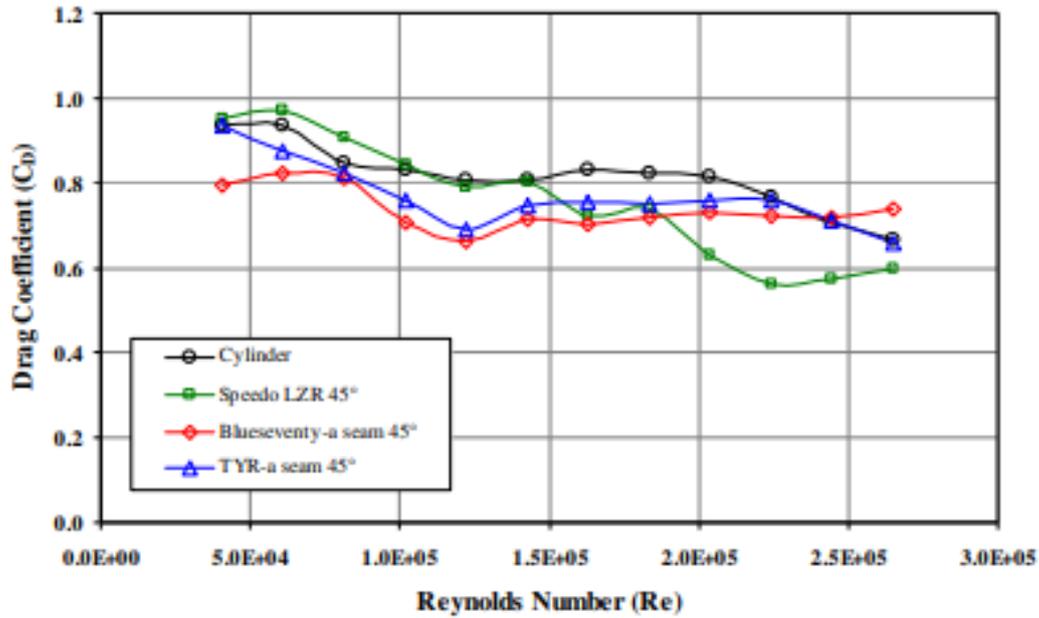


Figura 62: variazione di C_D con Re per il costume Blueseventy Pointzero3, (immagine apportata da [39]).

Un confronto dei valori di C_D per i costumi Speedo LZR, TYR Sayonara e Blueseventy Pointzero3 per la posizione della cucitura di 45° è stato mostrato nella Figura 63. È stato osservato che la cucitura del costume Speedo LZR ha mostrato il valore più basso del coefficiente di resistenza. Siccome le altre due tute

hanno mostrato una transizione anticipata, hanno riportato valori di C_D relativamente più alti alle alte velocità. Queste tute hanno restituito vantaggi relativi a velocità inferiori rispetto a Speedo LZR. Il costume da bagno Blueseventy Pointzero3 ha riportato valori C_D inferiori rispetto al costume da bagno TYR Sayonara poiché questi costumi non hanno avuto molto effetto sulla transizione dello strato limite.



2

Figura 63: confronto dell'andamento di C_D in funzione di Re per i costumi Speedo LZR, TYR Sayonara and Blueseventy Pointzero3, (immagine adattata da [39]).

CONCLUSIONI

L'oggetto di questa tesi è stato incentrato sulla modellizzazione degli effetti generati dalle rugosità superficiali sulle caratteristiche del moto turbolento. Partendo dalla definizione della resistenza e dalla distinzione dei suoi contributi, è stata effettuata una classificazione dei sistemi di controllo della resistenza aerodinamica, ispirati a tecniche biomimetiche utilizzate da alcuni esemplari presenti in natura. In particolare, l'obiettivo della trattazione è stato focalizzato sulla descrizione di un particolare dispositivo basato sul controllo dello strato limite turbolento, ispirato alla morfologia della pelle dello squalo. Gli studi sperimentali, effettuati dalla seconda metà del secolo precedente, hanno inserito la morfologia della pelle dello squalo tra i più performanti sistemi di controllo della resistenza presenti sul pianeta. Per questo motivo, la replica della geometria della superficie ha progressivamente attirato l'attenzione di imprenditori e ricercatori nel corso dei decenni. I primi risultati raccolti dall'analisi del moto del fluido, sull'insieme di superfici aventi nervature bidimensionali presentate, le cui ottimizzazioni estrapolate dalle misurazioni effettuate nel canale petrolifero di Berlino sono state sintetizzate in Tabella 3, ha rivelato che una scelta accurata del sistema di misurazione e dei parametri geometrici possa restituire una riduzione dello sforzo di taglio alla parete fino al 9.9%. A seguito di questa validazione, numerosi studi sono stati finanziati nell'interesse del raggiungimento delle prestazioni reali della pelle dello squalo, le cui nervature hanno mostrato una struttura tridimensionale. Tuttavia, le prestazioni valutate nello stesso luogo, legate all'implementazione di riblets 3D a lama trapezoidale di lunghezza variabile, hanno riportato una massima riduzione dello sforzo di taglio alla parete del 7.3%. Osservando la struttura superficiale della pelle di squali che nuotano velocemente, gli studiosi hanno associato la perdita di prestazioni rispetto alle superfici con riblets bidimensionali alla morfologia delle squame. Alcuni studi, presentati in letteratura, hanno indagato le proprietà di riduzione della resistenza aerodinamica delle squame di squalo, considerando la sommità della nervatura sia come struttura statica che come membro flessibile. Essi hanno confermato che le squame, situate sulla cute della pelle dello squalo, hanno presentato la capacità di erigersi passivamente, attraverso un meccanismo fisico di scambio di pressione con gli strati inferiori della pelle, permettendo un maggior controllo della separazione.

Questo ulteriore contributo ha promosso l'interesse verso la fabbricazione di nuove superfici micro-stampate, maggiormente simili alla morfologia superficiale dello squalo, le quali hanno riportato una massima riduzione della resistenza del 12%. Pertanto, nella prima parte dell'ultima sezione dell'elaborato sono state discusse le due tecniche di produzione delle riblets, (impiegate con i rispettivi materiali), chiamate micro-goffratura e micro-stampaggio, che hanno consentito la realizzazione di stampi, utilizzando come modello la pelle di squalo biologica.

Le fasi principali delle due tecniche sono state suddivise in:

1. Pretrattamento della pelle di squalo biologica, campionata per ottenere i modelli per la tecnologia di formatura bio-replicata.
2. Selezione delle tecniche, quali micro-goffratura e micro-stampaggio, come due tipi di metodi di formatura del materiale, al fine dell'ottenimento degli stampi di micro-replica.
3. replica degli stampi mediante colata polimerica al fine dell'ottenimento della morfologia biomimetica della pelle di squalo.

Dopo aver effettuato la descrizione dei due processi di fabbricazione dello stampo bio-replicato, schematizzata in Figura 22, è stato effettuato un confronto sulla precisione delle due tecniche di micro-replica, dove quest'ultima è stata valutata mediante la deformazione dell'altezza della scanalatura e della spaziatura tra le punte dei solchi, i risultati sono stati riassunti in Tabella 4. È stato notato che, rispetto al modello biologico, le larghezze dei solchi dei due tipi di materiale sono state aumentate e le altezze delle

nervature centrali sono state diminuite. Ciò ha dimostrato che la pressione nel processo di micro-goffratura ha esteso la scanalatura della scala in senso trasversale, mentre la scanalatura della scala è stata mantenuta quasi invariata nel processo di micro-stampaggio senza pressione. D'altra parte, l'intervento della pressione ha assicurato al prepolimero dello stampo il riempimento completo del fondo della scanalatura. Pertanto, il metodo di micro-goffratura è stato preferito al metodo di micro-stampaggio nella replica dei dorsi in scala. È stato osservato che le deformazioni dell'obliquità della scala sui due stampi sono state aumentate gradualmente dalla parte centrale e hanno raggiunto i valori massimi di 3.8 μm e 8.2 μm alle estremità della scala, che sono state diminuite rispettivamente del 13.7% e del 27.5% rispetto al modello biologico. Ciò ha suggerito che il metodo di micro-stampaggio ha mostrato una maggiore precisione nella replica dell'obliquità della scala rispetto al metodo di micro-goffratura. L'analisi completa di cui sopra ha indicato che non è stata notata alcuna differenza significativa nella precisione di replica dei solchi della scala tra i due metodi e che il metodo di micro-stampaggio è stato preferito all'altro sulla replica dell'obliquità della scala. Tuttavia, il metodo di micro-goffratura ha presentato alcuni vantaggi sull'integrità della superficie rispetto allo stampo di micro-replica. La pelle di squalo ha mostrato un'adeguata resistenza meccanica e tolleranza al calore, il che l'ha resa adatta ad essere presa come modello di replica dei metodi di micro-goffratura e micro-stampaggio. L'analisi sulla precisione di replicazione ha convalidato che la tecnologia di formatura bio-replicata avrebbe mostrato un'elevata adattabilità nella replicazione diretta della morfologia su capi di abbigliamento. La micro-goffratura, è stata privilegiata per la produzione a basso costo e in serie di micro o nanostrutture. Tuttavia, tale tecnica è stata generalmente limitata a micro-scanalature 2D regolari, non adatti a micro-scanalature 3D complesse come la pelle di squalo a causa della notevole difficoltà di sformatura, come descritto precedentemente. Al fine di rendere possibile il trasferimento della pelle di squalo naturale su una superficie a forma libera, è stato presentato un approccio di rivestimento flessibile di bio-replicazione della pelle di squalo, evolvendo il processo di fabbricazione della micro-goffratura. In merito a ciò, è stata proposta una tecnica, per la fabbricazione di riblets bio-replicate, basata su una vernice induribile UV rapida. Oltre alla progettazione del sistema di rivestimento, l'accuratezza della bio-replicazione della morfologia della superficie è stata convalidata di circa il 97% rispetto al modello trattato precedentemente della pelle di squalo. Infine, la riduzione della resistenza aerodinamica e la funzione antivegetativa della superficie del rivestimento sono state testate rispettivamente nel tunnel dell'acqua e in uno stagno aperto. Il tasso di riduzione della resistenza aerodinamica della superficie del rivestimento è stato valutato di circa 12% in più e l'antivegetativa ha dimostrato un miglioramento di circa cento volte.

Infine, l'ultima parte della tesi è stata dedicata alla presentazione degli effetti provocati dai rivestimenti superficiali riblet apportati sulla superficie esterna dei velivoli e nei tessuti fabbricati per il nuoto competitivo. In merito all'applicazione in ambito aeronautico, i dati disponibili sui profili alari a velocità subsoniche e transoniche e sull'ala a freccia a basse velocità hanno indicato che è stato possibile ottenere una riduzione della resistenza di attrito nell'intervallo del 5-8%, per le nervature ottimizzate a bassa o incidenza nulla. Sui corpi cilindrici, come nel caso della fusoliera e gondola motore, le misurazioni a numeri di Reynolds relativamente elevati hanno mostrato una massima riduzione dell'attrito di circa il 7-8%, per le nervature ottimizzate a incidenza nulla (la resistenza di attrito valutata su questo modello ha contribuito a circa il 96% della resistenza totale) e su un intervallo di numeri di Mach compreso tra 0.30 e 0.81. In una configurazione di velivolo civile da trasporto, l'effettiva riduzione della resistenza viscosa è stata dovuta principalmente da due fattori: l'area coperta dalle nervature e se la geometria delle nervature è stata ottimizzata per i flussi di ala e fusoliera in modo appropriato. Inoltre, le prestazioni delle nervature hanno mostrato tendenza ad essere gravemente compromesse in zone in cui l'attrito cutaneo ha ridotto il suo contributo nel bilancio totale di resistenza, (ad esempio, attorno alla giunzione del corpo alare, all'estremità dell'ala e nelle regioni posteriori della fusoliera). La tecnologia delle superfici Riblet, maggiormente commercializzata, è stata applicata a tessuti dedicati al nuoto competitivo. Pertanto, è stata dedicata una sezione della tesi all'esposizione di una campagna sperimentale che ha valutato le prestazioni delle riblets

su tre costumi da bagno competitivi concorrenti di mercato, ovvero Speedo LZR, TYR Sayonara e Blueseventy Pointzero3. Essi sono stati testati nella galleria del vento industriale a ciclo chiuso RMIT e i risultati delle sperimentazioni sono stati riassunti e confrontati in Figura 63, dove è stato riportato l'andamento del coefficiente di resistenza in funzione del numero di Reynolds.

BIBLIOGRAFIA

1. Bhushan, Bharat. "Biomimetics: lessons from nature—an overview." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367.1893 (2009): 1445-1486.
2. Walsh, M. "Turbulent boundary layer drag reduction using riblets." *20th aerospace sciences meeting*. 1982.
3. Walsh, Michael J. "Riblets as a viscous drag reduction technique." *AIAA journal* 21.4 (1983): 485-486.
4. Walsh, Michael J. "Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets." *Symposium on Viscous flow drag reduction*. 1980.
5. Walsh, M., and A. Lindemann. "Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction." *22nd aerospace sciences meeting*. 1984.
6. Walsh, Michael J., and John B. Anders. "Riblet/LEBU research at NASA Langley." *Applied Scientific Research* 46.3 (1989): 255-262.
7. Bechert, D. W., and M. Bartenwerfer. "The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs." *Journal of fluid mechanics* 206 (1989): 105-129.
8. Bechert, D. W., et al. "Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry." *Journal of fluid mechanics* 338 (1997): 59-87.
9. Bechert, D. W., and M. Bartenwerfer. "The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs." *Journal of fluid mechanics* 206 (1989): 105-129.
10. Bechert, D. W., et al. "Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application." *Naturwissenschaften* 87.4 (2000): 157-171.
11. Dean, Brian, and Bharat Bhushan. "Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368.1929 (2010): 4775-4806.
12. Koeltzsch, K., A. Dinkelacker, and R. Grundmann. "Flow over convergent and divergent wall riblets." *Experiments in fluids* 33.2 (2002): 346-350.
13. Lang, Amy, et al. "Shark skin separation control mechanisms." *Marine Technology Society Journal* 45.4 (2011): 208-215.
14. Bixler, Gregory D., and Bharat Bhushan. "Bioinspired rice leaf and butterfly wing surface structures combining shark skin and lotus effects." *Soft matter* 8.44 (2012): 11271-11284.
15. Luo, Yuehao, et al. "Bio/micro-rolling fabrication of biological sharkskin morphology on semi-cured coating and drag force experimental research." *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 16.02 (2016): 1650016.
16. Luo, Yuehao, et al. "Chemical, mechanical and hydrodynamic properties research on composite drag reduction surface based on biological sharkskin morphology and mucus nanolong chain." *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 15.05 (2015): 1550084.
17. Yuehao, Luo, and Zhang Deyuan. "Investigation on fabricating continuous vivid sharkskin surface by bio-replicated rolling method." *Applied Surface Science* 282 (2013): 370-375.
18. Chen, Huawei, et al. "Investigation on large-area fabrication of vivid shark skin with superior surface functions." *Applied Surface Science* 316 (2014): 124-131.
19. Kim, Tae Wan. "Assessment of hydro/oleophobicity for shark skin replica with riblets." *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 14.10 (2014): 7562-7568.
20. Oeffner, Johannes, and George V. Lauder. "The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications." *Journal of Experimental Biology* 215.5 (2012): 785-795.
21. Young, Donald F., TH (Theodore Hisao) Okiishi, and Wade Huebsch. *Fundamentals of fluid mechanics*. Wiley, 2006.

22. Kline, Stephen J., et al. "The structure of turbulent boundary layers." *Journal of Fluid Mechanics* 30.4 (1967): 741-773.
23. Rose, J., S. Ganesh Natarajan, and V. T. Gopinathan. "Biomimetic flow control techniques for aerospace applications: a comprehensive review." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 20.3 (2021): 645-677.
24. Yu, Cunming, et al. "Bio-inspired drag reduction: from nature organisms to artificial functional surfaces." *Giant* 2 (2020): 100017.
25. Lee, S-J., and S-H. Lee. "Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface." *Experiments in fluids* 30.2 (2001): 153-166.
26. Goldstein, D., R. Handler, and L. Sirovich. "Direct numerical simulation of turbulent flow over a modeled riblet covered surface." *Journal of Fluid Mechanics* 302 (1995): 333-376.
27. Wilkinson, S. P., et al. "Turbulent drag reduction research at NASA Langley: progress and plans." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 9.3 (1988): 266-277.
28. Jung, Yong Chae, and Bharat Bhushan. "Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows." *Journal of Physics: Condensed Matter* 22.3 (2009): 035104.
29. Dai, Wei, et al. "Drag-reduction of 3D printed shark-skin-like surfaces." *Friction* 7.6 (2019): 603-612.
30. Han, Xin, and DeYuan Zhang. "Study on the micro-replication of shark skin." *Science in China Series E: Technological Sciences* 51.7 (2008): 890-896.
31. Viswanath, P. R. "Aircraft viscous drag reduction using riblets." *Progress in Aerospace Sciences* 38.6-7 (2002): 571-600.
32. Squire, L. C., and A. M. Savill. "Drag measurements on planar riblet surfaces at high subsonic speeds." *Applied Scientific Research* 46.3 (1989): 229-243.
33. Coustols, E., and V. Schmitt. "Synthesis of experimental riblet studies in transonic conditions." *Turbulence control by passive means*. Springer, Dordrecht, 1990. 123-140.
34. MCLEAN, JDOUGLAS, D. E. Z. S. O. N. GEORGE-FALVY, and PETERP SULLIVAN. "Flight-test of turbulent skin-friction reduction by riblets." *Turbulent drag reduction by passive means* (1987): 408-424.
35. Sundaram, S., P. R. Viswanath, and N. Subaschandar. "Viscous drag reduction using riblets on a swept wing." *AIAA journal* 37.7 (1999): 851-856.
36. Hoeven, J. G., and D. W. Bechert. "Experiments with a 1: 4.2 model of a commuter aircraft with riblets in a large wind tunnel." *Recent developments in turbulence management*. Springer, Dordrecht, 1991. 3-24.
37. Hoeven, J. G., and D. W. Bechert. "Experiments with a 1: 4.2 model of a commuter aircraft with riblets in a large wind tunnel." *Recent developments in turbulence management*. Springer, Dordrecht, 1991. 3-24.
38. Szodruch, J. "Viscous drag reduction on transport aircraft." *29th Aerospace Sciences Meeting*. 1991.
39. Moria, Hazim, et al. "Aero/hydrodynamic study of speedo LZR, TYR sayonara and blueseventy Pointzero3 swimsuits." *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 5.1 (2011): 83-88.

APPENDICE A: Numero di Reynolds di transizione

Durante una campagna sperimentale, Reynolds ha misurato il punto di transizione per diverse misurazioni svolte, variando la velocità e la temperatura del fluido dove, quest'ultima variazione, ha permesso di modificare il coefficiente di viscosità cinematica. Egli ha notato che la variazione della posizione del punto di transizione non è stata espressa in modo indipendente dagli altri parametri, ma una particolare combinazione di essi è stata mantenuta costante durante la sequenza di misurazione. Pertanto, ha definito il numero di Reynolds di transizione (Equazione 3), il quale è stato dimostrato essere funzione dei disturbi esterni applicati al sistema fluido e del gradiente di pressione ($\frac{\partial p}{\partial x}$).

$$Re_T = \frac{V x_t}{\nu} \quad [3]$$

Il celebre fisico ha notato che il fenomeno della transizione non è stato istantaneo ma è stato legato al processo di diffusione ondosa in una fase transitoria del moto, dove, tale fase, è stata delimitata da due diversi valori adimensionali chiamati:

- Reynolds critico, dove i disturbi iniziano ad essere amplificati.
- Reynolds di transizione, oltre al quale il moto è stato definito turbolento

RINGRAZIAMENTI

Il completamento di questo elaborato ha rappresentato per me un importante obiettivo realizzato, il quale non sarebbe stato possibile senza l'aiuto di molte persone a me care. Innanzitutto, devo ringraziare i miei genitori e la mia famiglia, per avermi affiancato sia economicamente che con un grande supporto emotivo, durante tutto il percorso universitario. Li ringrazio anche per aver contribuito a rendermi una persona migliore, aiutandomi a mettere a fuoco una serie di valori che costantemente applico nella mia vita.

Il mio percorso accademico ha contribuito alla mia crescita personale, permettendomi di comprendere a fondo il valore del sacrificio. Pertanto, devo ringraziare anche i miei amici che, sostenendomi ogni volta che ne avevo bisogno e motivandomi a superare ogni ostacolo con impegno, hanno reso possibile la realizzazione del mio sogno.

Per concludere, ringrazio il mio relatore per avermi insegnato l'importanza della professionalità nel ruolo che si esercita e per avermi guidato e spronato a dare il meglio durante la fase finale del percorso. Ringrazio il professore anche per avermi trasmesso passione e interesse per la materia che tanto desideravo di approfondire.