

# POLITECNICO DI MILANO



Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Aeronautica

## UN ATTUATORE AL PLASMA PER APPLICAZIONI AERONAUTICHE

RELATORE: PROF. MAURIZIO QUADRIO  
CO-RELATORE: PROF. MARCO BELAN

Tesi di Laurea di:  
Marcello VITALI  
matr. n. 668324

Anno Accademico 2011/2012

# Sommario

Il progetto, collocabile nell'ambito dell'*airflow control*, ha riguardato la realizzazione di un attuatore al plasma in modalità DC-corona, del tipo *wire-to-plate*. Il dispositivo, montato su un profilo alare NACA 0013, è stato successivamente messo a punto in una galleria del vento didattica. Quest'ultima, poiché è restata per lungo tempo inutilizzata, ha dapprima richiesto una consistente opera di manutenzione e in seguito, la modifica di alcune parti dedicate ad operare in presenza di plasma. La velocità raggiungibile in camera di prova è di 1,35 m/s e il numero di Reynolds è dell'ordine di 15000.

Nelle prove, l'interesse maggiore s'è concentrato sul comportamento dell'attuatore, nei casi di profilo ad incidenze ben oltre lo stallo. Sia la caratterizzazione prettamente aerodinamica del modello che quella dell'attuatore, sono avvenute mediante riscontro visivo diretto della corrente. Questo è reso possibile dal tipo di galleria, concepita per avere una qualità di vena regolare e strumentata per visualizzazioni con fili di fumo. Da qui la possibilità di verificare aspetti come la separazione dello strato limite, la bolla di separazione, il comportamento della scia e delle zone di ricircolo.

Le prove si sono svolte in condizioni atmosferiche di umidità relativa attorno al 50% e temperatura dell'ordine di 20°.

Particolare attenzione è stata rivolta alla disposizione e alla forma degli elettrodi montati sul profilo. Dettaglio quest'ultimo risultato rilevante per la stabilità del regime di scarica.

Lavorando su questi parametri progettuali, è stato possibile collaudare e successivamente confermare, le ottime aspettative riposte nell'attuatore. Azionando il dispositivo, il riattacco della vena fluida avviene pressoché istantaneamente anche per incidenze ben oltre lo stallo. In particolare verranno documentati eccellenti risultati fino a 34° di incidenza, il che significa aver ampliato di circa 20° il *range* operativo del profilo alare.



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b>	<b>4</b>
1.1 Flow control . . . . .	4
1.1.1 Controllo passivo . . . . .	5
1.1.2 Controllo attivo . . . . .	6
1.2 Applicazioni industriali dei plasmi . . . . .	8
1.3 Obiettivo . . . . .	10
1.4 Struttura del lavoro . . . . .	10
<b>2 ATTUATORI AL PLASMA PER L'<i>AIRFLOW CONTROL</i></b>	<b>12</b>
2.1 Scarica di Townsend in corrente continua . . . . .	13
2.1.1 L'energia di ionizzazione . . . . .	13
2.2 La corona e il DBD . . . . .	16
2.2.1 Corona positiva . . . . .	16
2.2.2 Corona negativa . . . . .	18
2.2.3 DBD, <i>Dielectric barrier discharge</i> . . . . .	18
2.3 Vento ionico e qualche esperimento . . . . .	21
2.4 Regimi di scarica . . . . .	24
2.5 Stabilità della corona . . . . .	26
<b>3 GALLERIA DEL VENTO</b>	<b>30</b>
3.1 Descrizione generale . . . . .	30
3.1.1 Pulizia e manutenzione . . . . .	32
3.2 Impianto elettrico . . . . .	33
3.3 Prove preliminari e velocità in centro vena . . . . .	34

---

<b>4 FASE DI PROGETTO E REALIZZAZIONE</b>	<b>35</b>
4.1 Modello strumentato con attuatore al plasma . . . . .	35
4.1.1 Punto d'applicazione dell'anodo . . . . .	37
4.1.2 Distanza fra gli elettrodi . . . . .	39
4.1.3 Fase realizzativa . . . . .	44
4.2 Pannello posteriore della camera di prova . . . . .	46
4.3 Collimatori di luce . . . . .	47
<b>5 PROVE</b>	<b>49</b>
5.1 Caratterizzazione dell'attuatore in assenza di vento . . . . .	49
5.2 Prova dell'attuatore in galleria . . . . .	51
<b>6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</b>	<b>53</b>
6.1 Conclusioni . . . . .	53
6.1.1 Considerazioni ad alta velocità . . . . .	54
6.2 Sviluppi . . . . .	55
<b>Elenco delle figure</b>	<b>56</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>58</b>
<b>Appendice - Tavole</b>	<b>60</b>

# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi a carattere sperimentale, è da collocarsi all'interno di una vasta area d'interesse aeronautico che prende il nome di *flow control*. L'argomento ha conosciuto una rapida espansione negli ultimi decenni grazie alla ricerca e allo sviluppo di applicazioni industriali di vario genere.

Qui vogliamo approfondire con concetti più recenti, come due semplici elettrodi sottoposti ad un gradiente di tensione, possano effettivamente modificare il campo di moto di un fluido.

L'attore principale di questa materia è interpretato dal plasma, altrimenti detto *quarto stato* della materia.

Il plasma ha le sembianze di un gas, nel quale però vi sono disciolte particelle aventi carica elettrica non nulla. Elettroni liberi e ioni per l'appunto, rendono elettricamente conduttivo questo speciale gas che si trova ora assoggettato a reagire, sotto l'influenza di un campo elettrico.

### 1.1 Flow control

Volendo rimanere in ambito aeronautico, il *flow control* è un contenitore di applicazioni così ampio, da considerare spesso aspetti di tipo molto pratico che nello stesso tempo però, vengono spiegati attraverso alcune teorie tra le più sofisticate. Concetti come il controllo della separazione, la regolazione della transizione o il controllo della turbolenza, sono all'ordine del giorno da oramai diversi anni. Questo è dovuto al fatto che gli obiettivi coi quali università e industrie del settore si confrontano, sono tanto importanti quanto pur sempre gli stessi.

Riduzione di resistenza, aumento di portanza, riduzione di rumore, incremento di mixing, e così via. Ad esempio, un metodo per l'aumento della turbolenza, potrebbe portare ad una maggiore

efficienza nei fenomeni di mixing tra fluidi; una migliore tecnica di riduzione della turbolenza consentirebbe invece la riduzione di rumore aerodinamico. Tutto questo si traduce in: progresso della conoscenza dei fenomeni, aumento dell'efficienza di nuove tecnologie e naturalmente, un risparmio abnorme anche in termini di denaro.

Motivi di tipo ambientale, hanno recentemente spinto l'Unione Europea ad introdurre in molti ambiti, delle regole che limitano aspetti come l'inquinamento, i consumi, le vibrazioni o il rumore. Oggi dunque le tecniche di controllo sui fluidi, non sono solo sinonimo di *prestazioni* o *guadagno economico*, infatti il *flow control* è spesso diventato obbligatorio per consentire il raggiungimento dei requisiti imposti dalla normativa vigente.

### 1.1.1 Controllo passivo

Alcune valutazioni recentemente divulgate da diverse comunità scientifiche, ritengono che in ambito aerodinamico, si potrà ancora ridurre la resistenza del 10%, con un relativo aumento dei profitti di circa il 40%.

La soluzione migliore sarebbe quella di ottenere l'aumento di prestazioni senza dover spendere nulla. Il controllo passivo, si focalizza per l'appunto su questo obiettivo, in quanto non prevede l'immissione di energia all'interno del sistema. Queste tecniche si concentrano tutte nell'interferire con il noto ciclo di parete e le sue strutture coerenti, in modo da ridurre la turbolenza sul nascere.

Parliamo ad esempio di *riblets*, *compliant coatings*, catene polimeriche e microbolle. Le *riblets* sono delle sottili scanalature prodotte sulla superficie dalla quale si vogliono trarre i benefici. Sono mediamente disposte in direzione del flusso anche se possono essere di forme particolari. La profondità dei solchi è di qualche decina di  $\mu m$  e le piccole strutture vorticosi di parete ne rimangono intrappolate. I risultati più ottimistici riportano una riduzione di attrito del 10% ma i costi, il peso, e la sensibilità alla polvere e al degrado ne hanno smorzato l'impiego. Buone aspettative sono riposte nell'idea di disporre le *riblets* con andamento sinusoidale in direzione longitudinale. Questa soluzione incrementa le prestazioni delle *riblets* del 50% [17].

I *compliant coatings* sono materiali visco-elastici che hanno la proprietà di deformarsi, se sottoposti a sforzi di pressione o scorrimento viscoso. Ad essi vengono attribuite le capacità di ridurre l'attrito del 7% e di ritardare la transizione da flusso laminare a turbolento [4].

Altre soluzioni di tipo passivo riguardano la presenza sulla parete di strati sottili e disomogenei di diversa natura. Ad esempio l'*air layer* su superfici idrofobiche o tutti quei metodi

che coinvolgono l'iniezione di particelle elementari nel fluido, come micro-bolle e macromolecole polimeriche.

In quest'ultimo caso le molecole vengono "sciolte" in soluzione ma, fintanto che il flusso resta stazionario, loro mantengono una forma pseudo-sferica. Dove invece localmente la corrente è più instazionara, come per il *buffer layer* [12], le catene polimeriche si srotolano modificando le proprietà di quello strato di fluido. Il processo di rigenerazione del vortice di parete viene quindi interrotto grazie all'aumento delle scale viscose e la produzione di energia turbolenta diminuisce drasticamente

Seppur la riduzione di attrito è molto alta, si parla di un 80%, questa tecnica è limitata ai liquidi confinati.

### 1.1.2 Controllo attivo

Il controllo attivo del flusso, consiste nella manipolazione volontaria delle sue caratteristiche per ottenere un effetto desiderato [7].

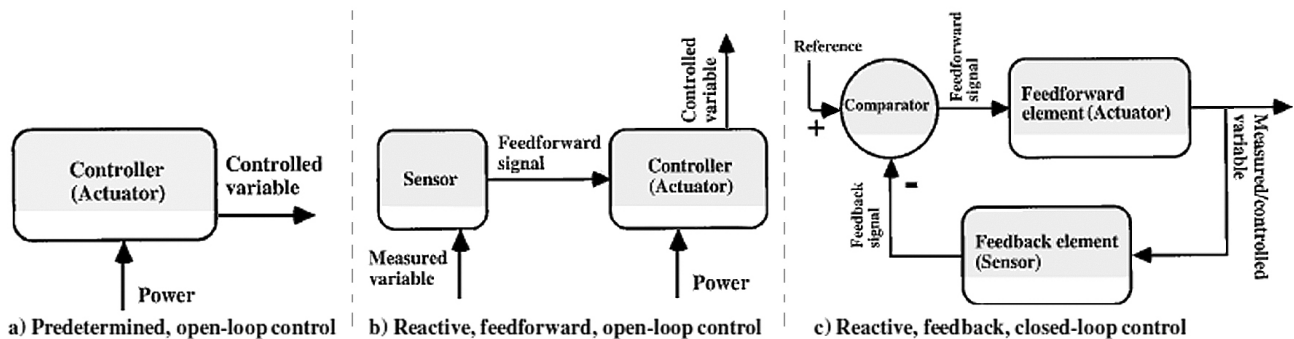


Figura 1.1: Metodi di controllo attivo del flusso.

L'immagine 1.1 sintetizza le diverse tecniche di controllo attivo [8], dalla più semplice alla più complessa.

Il controllo predeterminato fornisce semplicemente una quota di energia al fluido attraverso un attuatore. La bontà di questo tipo di congegni è valutata sul flusso, solo al termine dall'effetto generato. Di questa categoria fa parte il metodo delle onde viaggianti o *traveling waves*. Alcuni lavori recenti [19, 3] dimostrano che l'introduzione a parete di un'onda di velocità sinusoidale, è capace di modificare notevolmente le strutture turbolente dello strato limite e portare ad un risparmio energetico del 23%.

Concettualmente simile è il controllo di flusso tramite parete oscillante. Alcune specifiche oscillazioni trasversali infatti, tendono a separare i vortici longitudinali dalle strisce a bassa velocità, per merito dell'ispessimento del substrato viscoso [18]. Questo si traduce in una diminuzione del 30% delle fluttuazioni a parete e una riduzione del 40% dell'attrito.

Nel caso di controllo reattivo in *feedforward*, alcuni parametri del flusso vengono anticipatamente stimati attraverso l'ausilio di sensori e questo permette di calibrare l'azione da esercitare sul sistema. Alcuni esempi sono:

l'aspirazione e soffiaggio di getti sintetici, attraverso piccoli fori normali alla parete. Questa tecnica consente di modificare completamente le dinamiche del flusso e può essere impiegata per ridurre l'attrito fino al 25%.

L'EMHD, acronimo che indica il controllo di flussi ionizzati tramite forze di volume, generate attraverso l'applicazione di campi magnetici.

Il controllo reattivo in *feedback* ha comportato un notevole sforzo accademico per la costruzione di modelli matematici validi. Le applicazioni di queste teorie in campo aerodinamico, implicano che gli attuatori e i sensori siano piccoli, molto numerosi e collocati necessariamente sulla superficie a contatto col fluido.

In questo senso, un ritrovato tecnologico compatibile con questi requisiti, è rappresentato dai *micro electro-mechanical systems*, o più semplicemente MEMS. Grazie alle nanotecnologie è diventato possibile disporre di attuatori e sensori dell'ordine dei  $\mu\text{m}$ . Poiché i MEMS sono oggetti controllabili elettronicamente, è intuibile la potenza del loro impiego per svariati tipi di flusso, a costi energetici contenuti.

Questo elaborato si colloca nell'ambito del controllo attivo di una corrente, attraverso la generazione di forze di volume, direttamente all'interno del fluido. Gli obiettivi in ambito aeronautico si confermano essere la riduzione di resistenza, il controllo della separazione e l'incremento di portanza. Tuttavia la versatilità di queste tecnologie amplifica notevolmente il campo d'interesse delle applicazioni industriali. Analogamente ai già citati sistemi EMHD, il flusso sarà fatto transitare all'interno di un campo elettrico (e non magnetico). Il fluido, nel nostro caso l'aria, verrà resa elettro-magneticamente sensibile attraverso un processo di ionizzazione.

## 1.2 Applicazioni industriali dei plasmi

l'attore principale di queste nuove tecniche di *flow control* è il plasma o altrimenti detto "quarto stato" della materia.

Il plasma ha le sembianze di un gas, nel quale però vi sono disciolte in percentuale variabile (ma non trascurabile), particelle aventi carica elettrica non nulla. Elettroni e gli ioni per l'appunto, rendono elettricamente conduttivo questo speciale gas che si trova ora assoggettato a reagire sotto l'influenza di un campo elettro-magnetico.

Il nome plasma fu utilizzato dal chimico statunitense Irving Langmuir nel 1928. Lo usò per indicare ciò che in realtà era stato scoperto tempo prima (1879) da Sir William Crookes il quale ideò per primo, quel tubo luminoso che ora è giusto ritenere l'antenato delle lampade a fluorescenza.

Tornando invece a tempi recenti possiamo dire che, le varie applicazioni facenti uso di plasmi, non hanno comunque riguardato il *flow control* fino ai primi anni '90. A livello industriale infatti la tecnologia che sfrutta la ionizzazione di un fluido, era maggiormente impiegata per il trattamento o la modifica delle condizioni superficiali dei materiali. Infatti, la generazione di una scarica in un gas chimicamente inerte, produce una quantità di specie atomiche e ioniche chimicamente attive, che interagiscono fortemente con la superficie dei materiali modificandone le proprietà connesse. Gli esempi sono: pulizia e sterilizzazione di superfici, deposizione di rivestimenti sottili di diverso tipo per incrementare durezza e conducibilità, incisioni di precisione nanometrica per la fabbricazione di microprocessori (*etching*), ossidazione o passivazione di superfici e verniciatura di superfici metalliche e ceramiche.

Oltre ad applicazioni inerenti ai trattamenti superficiali, il plasma ha trovato spazio anche in altri processi industriali tra cui la trasformazione e l'abbattimento di gas inquinanti, la produzione di ozono, la tecnica di taglio al plasma, la propulsione spaziale.

Inoltre, i fulmini nell'atmosfera terrestre sono effettivamente un reattore al plasma naturale. Il loro bagliore luminoso, sia nel visibile che soprattutto nell'ultravioletto, ci richiama ad una applicazione che sfrutta appunto l'emissione di luce; ovvero i familiari schermi al plasma [13]. In questo ultimo decennio, una nuova applicazione del plasma ha guadagnato notevole importanza in ambito aeronautico, parliamo appunto dell'attuatore al plasma per l'*airflow control*. La caratteristica principale di questo processo sta nel convertire direttamente l'energia, da elettrica a cinetica, senza l'ausilio di parti meccaniche. Inoltre, poiché i tempi di risposta dell'attuatore

possono essere estremamente contenuti (nell'ordine dei nanosecondi), è consentito immaginare sviluppi futuri nell'ambito di tecniche per controlli di flusso in *real-time* ad alte frequenze [2].

L'attuatore in generale è costituito da degli elettrodi posti ad una certa distanza, ai quali viene applicata una forte tensione che determina la ionizzazione del gas all'interno del campo. Il plasma, essendo in parte composto da elementi aventi carica elettrica, è soggetto ad una forza di volume che genera una velocità indotta del fluido, spesso chiamata vento ionico o vento elettrico.

Perché le condizioni del plasma siano ottimali ai nostri fini, la tensione richiesta sugli elettrodi può arrivare a decine di  $kV$  sia in CC che CA (da 50 Hz a 500 kHz), mentre le densità di corrente non superano i pochi mA/m. Le diverse combinazioni tra questi parametri determinano vari regimi di scarica elettrica, a seconda del grado di ionizzazione a cui viene portata l'aria. In ambito aeronautico, il plasma che si cerca di ottenere è di tipo "non termico" (cap.2). Questo è possibile in quanto la potenza elettrica in gioco è bassa e la maggior parte di essa viene assorbita nella produzione di elettroni spaiati e in minoranza, per il riscaldamento del gas.

Le potenzialità di questa tecnologia, hanno portato allo sviluppo di un intero settore di ricerca detto elettro-aerodinamica. Questa branca multidisciplinare studia e utilizza il processo di produzione del vento ionico, come meccanismo utile a modificare il flusso d'aria intorno ad un oggetto [11]. L'attuatore può ad esempio essere impiegato per:

- controllo della transizione di strati limite, da regime laminare a turbolento
- riduzione della resistenza di forma ritardando la separazione della corrente
- diminuzione di perdite di carico
- stabilizzazione di flussi turbolenti per ridurre vibrazioni e rumore.

Sebbene dopo alcuni studi dei primi anni 2000, si suppose che la validità di questi attuatori potesse essere sfruttata solo fino a correnti di 30 m/s, oggi alcune ricerche portano questo limite a 110 m/s [14]. Il tipo di attuatore che recentemente ha catalizzato gli interessi dei ricercatori è detto DBD (*dielectric barrier discharge*) e la sua peculiarità è quella di interporre una barriera tra gli elettrodi, che inibisce la formazione indesiderata dell'arco elettrico.

Tuttavia non mancano sviluppi e aggiornamenti anche per gli attuatori più classici che si basano su scarica a corona in corrente continua. Prima degli anni '90 solo pochi lavori furono



pubblicati a riguardo di questo tipo di *flow control*. L'argomento emerse verso metà anni '90, in particolare per merito di due gruppi di ricerca. Il primo faceva capo all'università di Poitiers in Francia e si dedicava maggiormente allo sviluppo di attuatori in CC a corona. Il secondo era invece composto da studiosi americani dell'università di Tennessee ed era diretto da J Roth, collaboratore della NASA. Gli americani partirono da alcuni studi sulla decontaminazione dei gas attraverso il plasma e casualmente scoprirono il Dielectric Barrier Discharge (DBD). Come nel passato, ancora oggi sono molti gli aspetti dove bisogna fare chiarezza a riguardo dei meccanismi che regolano il vento ionico. Su un aspetto però gli studiosi sembrano concordare, infatti, pensando di costruire un attuttore ideale, il maggiore contributo di velocità raggiungibile è di circa 10 m/s.

## 1.3 Obiettivo

Dalla metà degli anni '90 ad oggi, gli attuatori al plasma hanno guadagnato una considerevole attenzione e diversificato gli aspetti su cui fare ricerca.

A seguito della pubblicazione di risultati di alto rilievo e d'un interesse internazionale sempre crescente, questo lavoro rappresenta anche un'opportunità di confronto per queste tecnologie, con la comunità scientifica.

L'obiettivo generale di questa tesi è quello di approfondire la conoscenza sugli attuatori al plasma di concezione aerodinamica.

Oltre alla comprensione degli aspetti teorici, il lavoro prevede un'ampia parte a carattere sperimentale dove il proposito è attrezzarsi, al fine di compiere una verifica in galleria del vento sul dispositivo al plasma progettato e realizzato.

Il tipo di attuttore che si vuole riprodurre è del tipo a corona, alimentato in corrente continua ed è composto da due elettrodi che verranno adeguatamente posizionati sul dorso di un profilo alare NACA 0013. In particolare, la fase di laboratorio prevede lo studio di quei parametri, geometrici ed elettrici, che influenzano la capacità di risposta del congegno.

## 1.4 Struttura del lavoro

Questa tesi si divide sostanzialmente in tre macro-aree.

Nella prima parte vengono descritti i meccanismi elettrici e meccanici che regolano il comportamento di entrambi i tipi di attuttore al plasma. Al termine di questa parte vengono presentati

alcuni dei risultati più significativi, raggiunti nell'ultimo decennio da parte dei maggiori esperti del settore. Ad esempio si riportano esperimenti condotti sia in presenza che in assenza di vento relativo, allo scopo di evidenziare il comportamento di questi dispositivi, al variare di alcuni parametri come anche le condizioni al contorno.

La seconda parte riguarda la fase operativa. Qui viene descritto tutto ciò che è stato calcolato e realizzato, al fine di allestire una prova in galleria del vento dell'attuatore al plasma. A partire dalla manutenzione della galleria, passando per il progetto dell'attuatore e dei componenti ad esso subordinati, per poi accennare alla fase realizzativa delle parti riportate nelle tavole in appendice.

La terza parte è dedicata al *flow control* vero e proprio. Si tratta della raccolta dei risultati ottenuti attraverso le prove in galleria del vento. Inoltre sono state fatte delle riprese e vengono mostrate delle foto, per documentare l'effettiva riuscita del progetto. Infine viene fatta una valutazione conclusiva sull'operato e si traggono alcune considerazioni a proposito di quale potrebbe essere una direzione da seguire, per sviluppare maggiormente questa tecnologia in ambito aeronautico.

## Capitolo 2

# ATTUATORI AL PLASMA PER *L'AIRFLOW CONTROL*

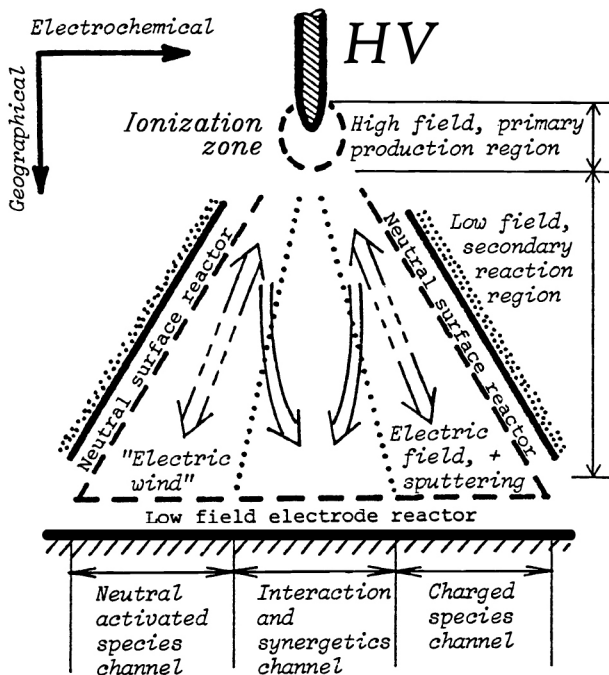
Prendiamo in esame il caso in cui abbiamo due elettrodi piani, posti ad una certa distanza fra loro, ai quali viene applicata una differenza di potenziale in corrente continua. Fin tanto che il gradiente di tensione si mantiene basso, l'aria interposta fra le piastre metalliche resta inerte e impedisce il passaggio di corrente. Non appena la forza del campo elettrico supera il valore di rigidità dielettrica dell'aria, si innesca un arco elettrico che chiude il circuito.

L'interesse in questo contesto, pone l'accento sulla fisica di ciò che avviene poco prima della formazione dell'arco, ovvero in quelle fasi in cui c'è comunque un passaggio di corrente ma a regimi d'intensità molto minore (tra i Nanoampere ( $nA$ ) e i Microampere ( $\mu A$ )). In questo caso si parla di *non-thermal plasma discharge* a pressione atmosferica, o più semplicemente di scarica elettrica a corona. Ai nostri fini, il vantaggio è riscontrabile nell'assenza dell'arco elettrico (alte temperature, struttura a filamento) ma soprattutto alla continua e determinante presenza del vento ionico. Diventa dunque cruciale indagare sul meccanismo elettrico che genera e sostiene la presenza del plasma, allo scopo di migliorare l'efficienza degli attuatori e conseguentemente quella del *flow control*.

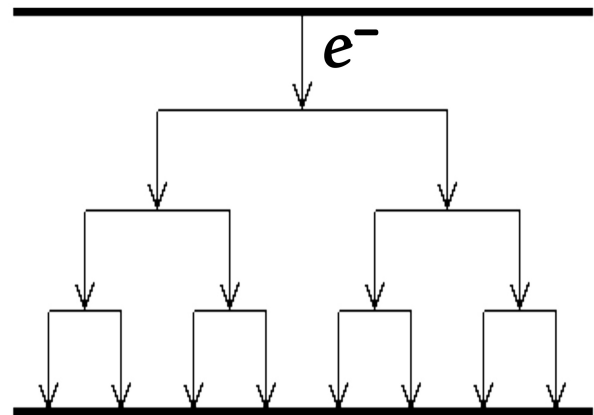
Questo meccanismo viene spesso descritto col termine *Townsend Discharge* dal nome del fisico che dedicò, agli inizi del secolo scorso, buona parte della sua carriera per caratterizzare la conduzione elettrica dei gas.

## 2.1 Scarica di Townsend in corrente continua

Il meccanismo, chiamato anche *Avalanche Breakdown*, spiega come gli ioni e gli elettroni all'interno del plasma, per effetto del campo elettrico, vengano accelerati verso l'elettrodo di segno opposto causando collisioni con altri atomi e molecole. L'energia scambiata nei vari urti può liberare nuovi elettroni e dunque si attiva un processo di moltiplicazione che di fatto auto-sostiene la corona elettrica. Non appena il valore di tensione viene riportato ad un livello sufficientemente basso, l'*Avalanche Breakdown* non ha più abbastanza energia per sostenersi e si determina la ricombinazione tra ioni ed elettroni ("attachment").



(a) Point-to-plate corona discharge conformation



(b) Townsend avalanche mechanisms

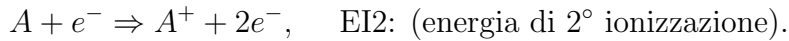
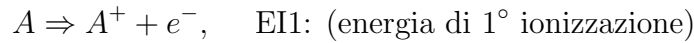
Figura 2.1: Townsend discharge. In (a) si evidenzia la presenza della *ionization zone* mentre in (b) è schematizzata la moltiplicazione degli elettroni liberi nel processo di ionizzazione

### 2.1.1 L'energia di ionizzazione

Quanto più l'elettrodo ad alta tensione HV è di forma sottile o affusolata, tanto più il gradiente elettrico verrà a concentrarsi maggiormente nel suo intorno. Questo primo tratto prende il nome di "ionization zone", dove peraltro il numero di ioni è da considerarsi dello stesso ordine

di quello degli elettroni liberi. Possiamo ritenere che questa zona di maggiore energia comporti una forte eccitazione delle molecole del gas e che quindi, per effetto fotoelettrico, vengano liberati i primi elettroni, "primary electrons".

Volendo semplificare il concetto di innesco, le fasi consecutive sono: eccitazione di atomi e molecole per effetto del potenziale elettrico  $\Rightarrow$  passaggio di alcune particelle ad un livello energetico minore (rilassamento elettronico)  $\Rightarrow$  conseguente emissione di un fascio di fotoni UV  $\Rightarrow$  energia fotonica assorbita da un'altra molecola che può espellere un elettrone (foto-elettrone).



L'energia impiegata per la foto-ionizzazione è detta anche primaria in quanto riguarda la prima fase di ionizzazione del plasma. Successivamente, sui foto-elettroni può essere spesa l'energia secondaria che dà luogo alla moltiplicazione a valanga.

E' interessante osservare che la scarica a corona, può avvenire per entrambe le polarità di voltaggio dell'elettrodo HV. Il meccanismo chimico-fisico però cambia; in un caso avremo una produzione prevalente di cationi, nell'altro di anioni.

Le due fasi energetiche appena descritte, producono nel gas quel livello di ionizzazione cosiddetto "debole", necessario per consentire il passaggio di corrente. Volendo valutare nell'insieme la spesa energetica, dobbiamo considerare l'impiego di tensioni molto elevate nell'ordine di decine di  $kV$ , ma anche tener conto che le intensità di corrente siano molto basse, ad esempio 10 microampere ( $\mu A$ ). Possiamo dedurre che le potenze elettriche d'impiego restino basse. Per il regime di corona elettrica da noi auspicato, parliamo di valori di  $P_{elec} = 300 \text{ mW cm}^{-2}$  circa [10, 16].

A seconda della quantità di energia elettrica trasformata in energia termica, i plasmi sono detti "thermal" o "non-thermal". In realtà la classificazione non si riferisce direttamente alla temperatura media del plasma ma bensì alla presenza o meno, di equilibrio termodinamico tra ioni ed elettroni. Infatti il grado di ionizzazione di un plasma dipende prevalentemente dalla temperatura dei suoi elettroni e quando ad esempio l'energia fornita al sistema diminuisce, essi diminuiscono di temperatura e tendono a ricombinarsi con gli ioni circostanti.

Per via della piccola massa, gli elettroni arrivano velocemente ad equilibrio termico fra di loro.

Mentre invece, soprattutto per gas debolmente ionizzati, è meno scontato che l'equilibrio sia raggiunto tra elettroni e ioni (o molecole). In tal caso si è in presenza di un plasma “non termico”.

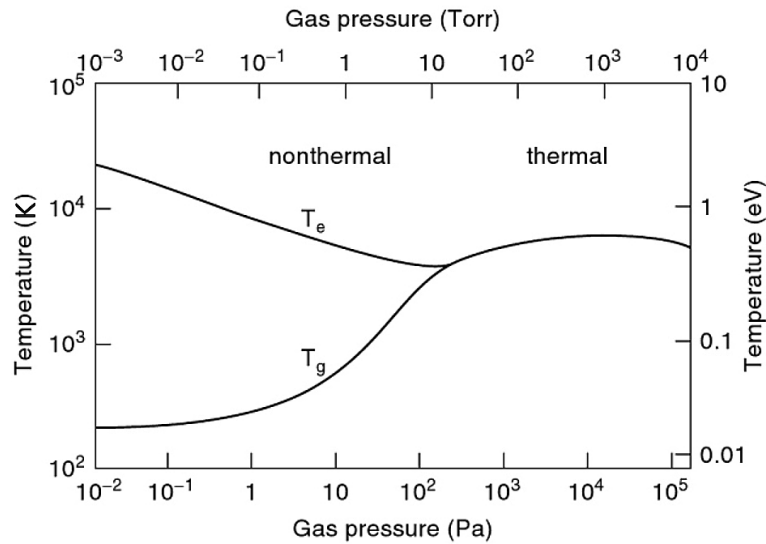


Figura 2.2: Comportamento della temperatura degli elettroni “ $T_e$ ” e del gas “ $T_g$ ” per una scarica ad arco, in funzione della pressione [10].

Nel grafico 2.2 possiamo notare come fino ad una certa pressione, in regime di arco elettrico, il gas non sia in equilibrio. Questo è esattamente ciò che si verifica nell’attuatore al plasma per applicazione aeronautica. Macroscopicamente, il volume di gas coinvolto dalla scarica elettrica è circa a temperatura ambiente, mentre i suoi elettroni possono anche raggiungere svariate centinaia di °C.

Un ulteriore aspetto elettrico che verrebbe da considerare, riguarda il fatto di avere a che fare con cariche elettriche in movimento. Un flusso di corrente elettrica infatti genera un campo magnetico, che a sua volta esercita la forza di Lorentz su ogni particella portatrice di carica e in movimento. La forza di Lorentz come noto è proporzionale al campo magnetico, alla densità e velocità di carica. Considerando che i processi in questione sfruttano plasma debolmente ionizzato e densità di corrente molto basse, gli effetti indotti dal campo magnetico possono essere tralasciati [2].

## 2.2 La corona e il DBD

I meccanismi di ionizzazione di un gas, oltre a dipendere da vari parametri atmosferici, hanno nature diverse, soprattutto a seconda delle dimensioni e dei ruoli che giocano gli elettrodi. La scarica a corona che si crea, può quindi essere generalmente classificata come negativa o positiva. In ambito di corrente continua, la scarica che spinge il plasma verso il catodo ( $-$ ) è detta “corona positiva”, viceversa quella che lo muove in direzione opposta (verso l’anodo  $(+)$ ), si chiama “corona negativa”. L’elettrodo che si trova a potenziale maggiore in valore assoluto, è generalmente quello delegato alla produzione di elettroni primari.

Le differenti corone, producono anche effetti chimici e fluidodinamici macroscopicamente diversi e quindi, diventa rilevante progettare il giusto tipo di corona in funzione della sua applicazione. Per un attuatore al plasma ad esempio, come vedremo si preferisce sfruttare la corona positiva.

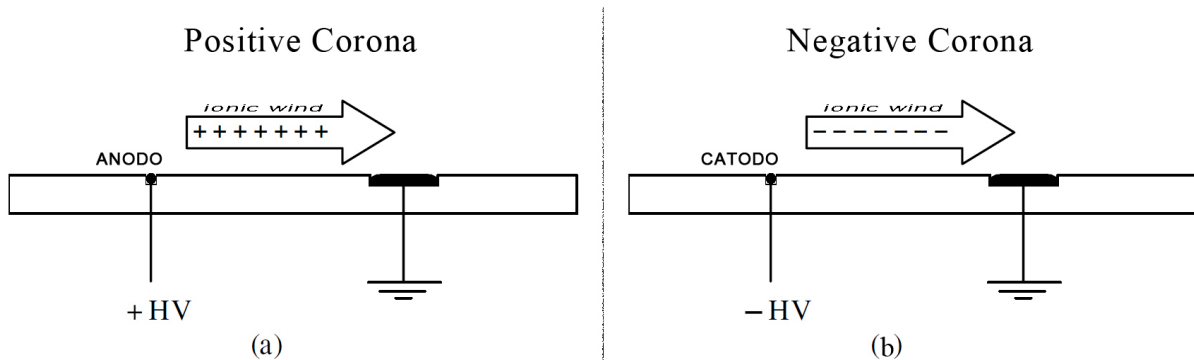


Figura 2.3: Tipo della corona: positiva (a), negativa (b)

### 2.2.1 Corona positiva

La corona positiva, per essere efficace, deve avere le seguenti caratteristiche: anodo di dimensioni ridotte a tensione elevata, catodo notevolmente più grande a tensione nulla o leggermente negativa. Alcuni ricercatori come E. Moreau o G. Artana confermano, attraverso i loro esperimenti [16, 2], che imponendo al catodo un potenziale *leggermente* negativo, si riducono i disturbi sulla tensione collegati alla "messa a terra" e, come detto da Goldman nel 1985 [9], si favorisce la formazione di *streamer*. In questi casi si parla di **corona bipolare**. Altri studi invece [11] dichiarano che questa configurazione ha l'effetto di concentrare maggiormente il

campo elettrico vicino alla superficie dielettrica. Questo si traduce in una maggiore iniezione di energia cinetica, nella parte di strato limite più vicina a parete.

Lo ione<sup>+</sup> e l'elettrone sono ora spaiati e vicini all'anodo. Essi, grazie alla forza di Coulomb non si ricombinano, ma anzi si allontanano rapidamente per direzioni opposte. L'elettrone accelera diretto all'anodo mentre il catione è respinto verso il catodo. Lungo il movimento di entrambe le particelle, ci sono principalmente tre meccanismi che determinano l'effetto Townsend:

- **Collisioni  $e^-$** : l'elettrone diretto verso l'anodo, collide in modo anelastico con altre molecole. Se il campo elettrico è abbastanza forte, l'energia cinetica acquisita da  $e^-$  tra un urto e l'altro, può superare quella di ionizzazione della molecola scontrata. A questo punto una nuova coppia spaiata *ione-elettrone* può essere generata e il meccanismo innesca la *valanga*. In un gas in condizioni standard, il cammino libero medio è dell'ordine di qualche micron e sarà quindi necessario un campo di  $10^4$  V/cm per dare inizio al processo di moltiplicazione. Il numero di coppie spaiate, generate dall'elettrone per unità di percorrenza, è descritto dal coefficiente di ionizzazione  $\alpha_N$ , o altrimenti detto 1<sup>o</sup> coefficiente di townsend. E poiché il cammino libero medio scala con l'aumento di densità, possiamo scrivere

$$\alpha_N = \alpha_N(E/\rho)$$

- **Collisioni  $A^+$** : Townsend ipotizza che anche i cationi, accelerati dalla forte repulsione dell'anodo, possano collidere con altre molecole di massa simile e generare ulteriori coppie spaiate *ione-elettrone*. Il contributo di questa ionizzazione è associato al 2<sup>o</sup> coefficiente di ionizzazione  $\alpha_P$ .
- **Sputtering**: questo fenomeno descrive la possibilità di emettere elettroni da parte del catodo. La quantità di moto dello ione, dà il contributo maggiore ai fini del vento ionico ma non solo. La stessa particella infatti, a fine corsa impatta con l'elettrodo e libera altri elettroni utili per la causa dell'*avalanche multiplication*. Il coefficiente  $\epsilon$  in questo caso descrive il numero medio di elettroni rilasciati dal catodo, in funzione alla densità di corrente.

L'elettrone ha un rapporto "*carica/massa*" di gran lunga superiore allo ione e dunque ha un coefficiente di ionizzazione molto maggiore.  $\alpha_N \gg \alpha_P$ .



### 2.2.2 Corona negativa

La corona negativa si genera con un piccolo catodo collegato ad una forte tensione negativa, mentre l'anodo è messo "a terra". Il meccanismo di sustentazione è più complesso e le applicazioni di questo tipo di corona sono per lo più in campo chimico. Gli elettroni sono in numero maggiore, vengono emessi per la maggior parte direttamente dal catodo e hanno energia minore. Essi dipartono dal catodo e creano solo alcuni disaccoppiamenti come in precedenza, ma piuttosto, si combinano con molecole di tendenza elettronegativa come ossigeno e vapore. Si formano quindi anche ioni negativi. Aumentando il voltaggio si genera una scarica periodica altrimenti della "Trichel pulse". Aumentando ulteriormente il campo elettrico gli ioni negativi diventano predominanti e compare similmente a prima un regime di *glow*. La differenza più marcata sta nel fatto che lo spessore della superficie plasmatica è superiore a causa di una dispersione maggiore del campo elettrico. Questo induce velocità minori in prossimità dello strato limite e pertanto, in ambito aerodinamico, si preferisce la configurazione in corona positiva.

### 2.2.3 DBD, *Dielectric barrier discharge*

L'attuatore DBD, può essere sostanzialmente visto come un condensatore alimentato in corrente alternata, con valore di tensione tale da indurre la ionizzazione ciclica dell'aria. La disposizione degli elettrodi è tipicamente asimmetrica, con interposto fra di essi uno strato di materiale dielettrico.

Gli attuatori a barriera dielettrica possono funzionare per frequenze da 50 Hz a 500 kHz e sono impiegati in numerose applicazioni industriali grazie alla loro semplicità ed economicità. Vista la presenza della barriera, la corrente continua non potrebbe portare alla liberazione di cariche elettriche per generare il plasma; la corrente alternata invece crea una successione di microscariche distribuite casualmente in spazio e tempo [16]. Un esempio di configurazione classica di attuatore al plasma DBD è mostrata in figura 2.4(a). Ciascun elettrodo è esposto al flusso d'aria e su entrambi i lati avremo la formazione di plasma e del relativo vento ionico.

Se invece si vuole impedire che il fenomeno coinvolga anche la superficie inferiore dell'oggetto in prova, bisognerà incapsulare nel dielettrico tutto l'elettrodo preposto per la messa a terra 2.4(b). Il comportamento degli attuatori DBD è ovviamente sensibile sia a parametri geometrici che elettrici. Il grafico in figura 2.5 rappresenta il valore di corrente in funzione del tempo ed è relativo a questa configurazione: elettrodi in alluminio lunghi 20 mm, lamina dielettrica in vetro di spessore 5 mm, distanza orizzontale tra elettrodi 5 mm.

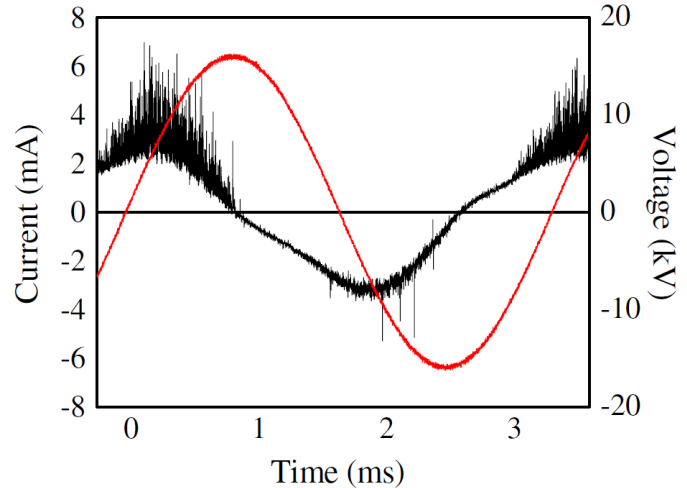
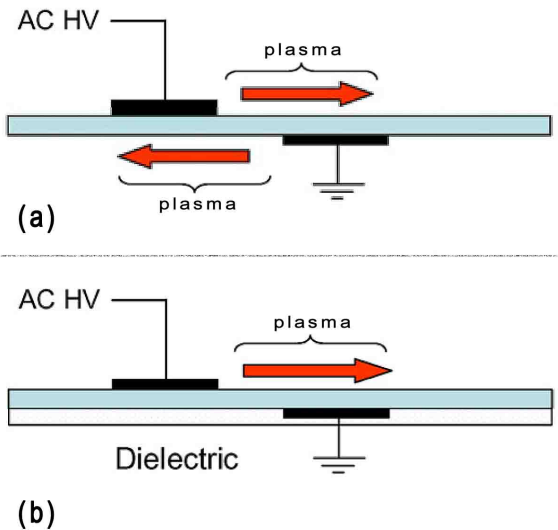


Figura 2.4: Configurazioni di attuatori DBD: (a) classica, (b) incapsulata. Figura 2.5: Microscariche di corrente e relativa tensione di alimentazione vs tempo.

I Parametri elettrici sono:  $V=20$  kV,  $f=300$  Hz. La frequenza in questa prova è stata tenuta relativamente bassa per evidenziare il comportamento della corrente tra mezzo-ciclo positivo e negativo.

Le brevi pulsazioni che si notano nel mezzo-ciclo positivo indicano la presenza delle microscariche o altrimenti dette *streamers*. Nella parte negativa invece la corrente sembra più omogenea, questo perché siamo in presenza di un elettrodo incapsulato. Enloe [6] diede nel 2004 una spiegazione fisica dell'attuatore DBD, alla quale è riferibile anche la figura 2.6.

Sostanzialmente dice che nella fase in cui l'elettrodo esposto è negativo (fig.(a)), avviene da esso una emissione di elettroni, i quali formano delle cariche che si depositano sulla superficie dielettrica. Quando la polarità si inverte (fig.(b)), gli elettroni depositati ripercorrono il plasma generando il vento ionico nella direzione opposta.

Anche Corke [5] si esprime a riguardo dicendo che, seppur la superficie a valle all'elettrodo AC-HV è in condizione di non penetrabilità, ciò che avviene è assimilabile ad un risucchio delle linee di flusso in prossimità dello strato dielettrico.

Con l'aumento del voltaggio o della frequenza elettrica, si possono instaurare fenomeni più incontrollabili come filamenti di corrente o archi. Dopo vari esperimenti, Pons in un articolo del 2005 espresse delle considerazioni riguardo ad alcuni parametri che incidono sul del DBD:

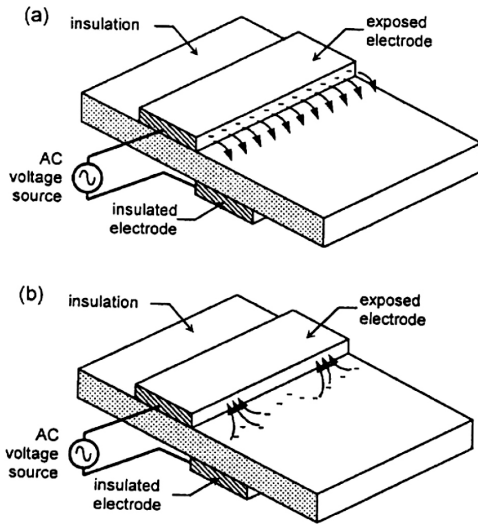


Figura 2.6: Ciclo della carica sulla superficie dielettrica, per DBD.

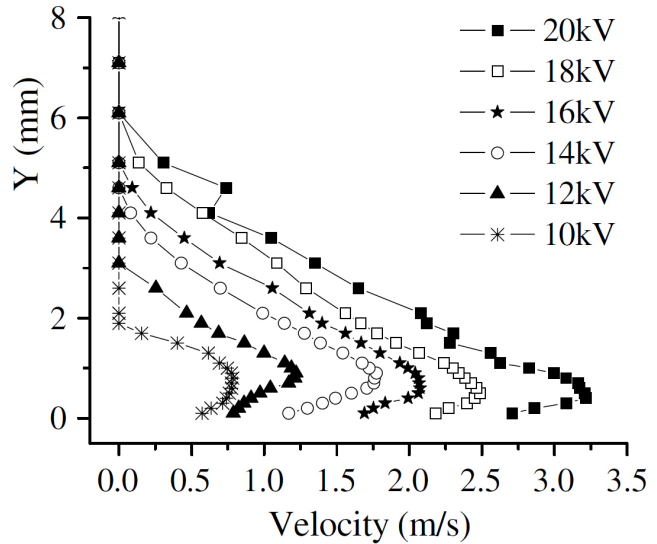


Figura 2.7: Profili di velocità ricavati con un Pitot, per diversi voltaggi.

- In configurazione classica (fig.2.4(a)), ovvero senza elettrodi incapsulati, la velocità indotta dall'elettrodo messo a terra, è leggermente inferiore a quella raggiunta in prossimità dall'elettrodo ad alta tensione.
- Come per l'attuatore a corona, la quantità di moto generata, parte dall'elettrodo esposto alla corrente e va verso la parete. Questo significa che la scarica induce una depressione sulla superficie dielettrica.
- La velocità ionica maggiore è sempre raggiunta nel punto limite di estensione del plasma, in direzione della flusso. Ovvero circa alla fine dell'elettrodo messo a terra.
- Per frequenze elettriche tra 300 e 700 Hz e tensioni superiori ai 20 kV, la velocità massima di vento ionico si trova a 0.5 mm dalla parete ed aumenta linearmente con l'aumento di tensione (fig. 2.7).

La figura 2.7 mostra vari profili di velocità in funzione della relativa tensione, per un attuatore posto in aria calma a 300 Hz. La velocità massima di vento ionico per ogni profilo, si attesta in questo caso, di poco sotto ad 1 millimetro da parete. Riguardo a quest'ultimo punto, altri studi invece mostrano che la  $Y$  relativa alla massima  $V_G$ , può anche presentarsi a quote sensibilmente diverse, fino a 2 mm dalla parete.

Questa ambiguità, come trattato da Moreau in un articolo del 2005 [15], tocca in realtà un aspetto fondamentale per gli sviluppi futuri degli attuatori al plasma, sia a corona che a DBD. La distanza a parete in cui l'attuatore opera il suo effetto maggiore, diventa infatti fondamentale soprattutto per l'efficacia di questi dispositivi, in applicazioni di tipo aeronautico. Questo parametro non è dunque da considerare intrinseco al meccanismo di scarica ma anzi, è indubbiamente legato al setting di prova ed alla tecnologia realizzativa dell'attuatore.

## 2.3 Vento ionico e qualche esperimento

Come appena trattato, la ionizzazione della zona adiacente alla corona, implica il movimento e le collisioni tra gli oggetti portatori di carica. Gli elettroni, avendo una massa estremamente inferiore ad anioni e cationi, per effetto del campo elettrico subiscono accelerazioni e velocità molto alte. Questo però ai fini del vento ionico, è un aspetto scatenante ma percentualmente irrilevante sulla velocità indotta. Infatti il fenomeno dell'*electric wind* dipende esclusivamente dal movimento delle particelle più grosse, degli ioni.

*Ionic wind* come anche *coulombian electro-convection*, sono sinonimi che descrivono lo stesso principio causato effettivamente dalla legge di Coulomb. La prima teoria formulata per la velocità della corrente indotta " $V_G$ " risale a Robinson nel 1961.

$$V_G = k \times \sqrt{\frac{i}{\rho \mu}}, \quad (2.1)$$

dove  $k$  è una costante che dipende dalla forma degli elettrodi,  $i$  è la corrente mediata nel tempo,  $\rho$  è la densità del gas e  $\mu$  la mobilità ionica.

Questa formula mostra in particolare che la velocità del vento ionico dipende dalla radice quadrata della corrente e inoltre tiene anche conto che la velocità degli ioni, non è da confondere con quella del gas. Infatti la mobilità ionica è definita come  $\mu = V_d / E$ , dove  $E$  è il campo elettrico e  $V_d$  è la velocità di deriva ovvero la velocità media degli ioni che tiene conto degli urti.

Ai nostri fini, il valore di velocità che ci interessa, è quello del flusso d'aria nel complesso. E' noto che, perchè l'aria possa condurre corrente elettrica, è sufficiente che il suo grado di ionizzazione sia dell'1%. Ciò significa che il vento ionico, coinvolge il movimento degli ioni tanto quanto quello di un'enorme quantità di particelle neutre che, per muoversi, devono ricevere quantità di moto attraverso gli urti [16, 2].

Nel 1993 l'espressione di  $V_G$  è stata modificata da parte di chi sostiene una teoria leggermente più completa. Ovvero che il fenomeno dipenda dal trasporto uniforme degli ioni ma anche dal numero di *streamer* che si propagano nella sezione di scarica " $A_G$ ", in relazione alla distanza fra gli elettrodi " $d$ ". In sostanza la formula è stata riscritta come:

$$V_G = \sqrt{\frac{id}{\rho \mu A_G}}, \quad (2.2)$$

Gli *streamer* sono dei filamenti preferenziali di corrente spessi circa  $30 \mu\text{m}$  che si estendono *solitari*, da un elettrodo all'altro alla velocità di  $10^6 \text{ m/s}$  [9], concentrando l'opera di ionizzazione sulla regione di fluido immediatamente a valle. Essi caratterizzano un regime di scarica chiamato per l'appunto *streamer* e sono maggiormente presenti in caso di corona bipolare.

Il dibattito nella comunità scientifica resta ancora aperto anche se recenti studi sembrano confermare che  $V_G$  dipenda dalla combinazione di entrambi i meccanismi (ioni e *streamers*) e che dunque l'espressione più corretta sia quest'ultima.

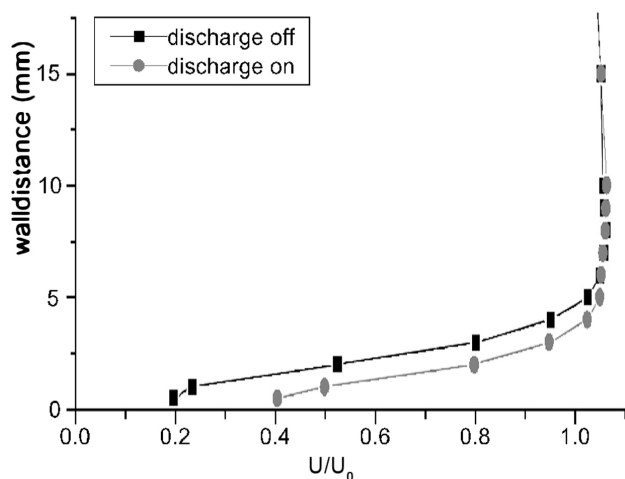


Figura 2.8: Profilo di velocità a metà *gap* di scarica, per  $U_0 = 14 \text{ m/s}$

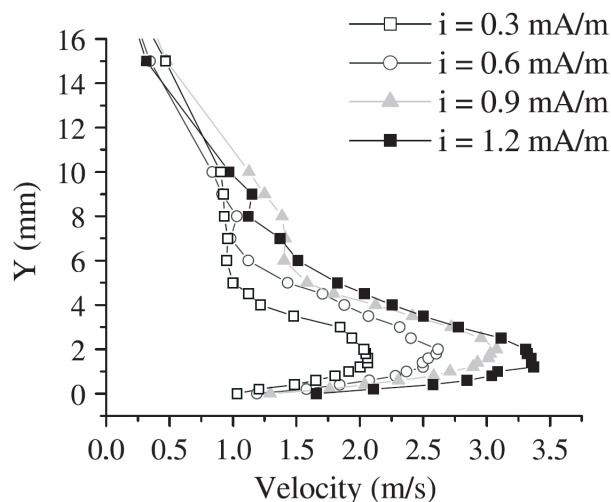


Figura 2.9: Profilo dello strato limite per diverse  $i$  di corrente, in assenza di vento.

Le figure 2.8 e 2.9 sono relative a due esperimenti distinti. Entrambe mostrano come i vantaggi ottenuti attraverso gli attuatori al plasma, influiscano notevolmente sul profilo di velocità all'interno dello strato limite.

Nella prova in figura 2.8, l'attuatore è immerso in una corrente asintotica di  $14 \text{ m/s}$ , eppure il suo effetto è ancora ben distinguibile. Fino ad una quota di  $10 \text{ mm}$  infatti possiamo dire che

il guadagno di velocità, a parità di distanza dalla parete, è di circa il 25%. Questi risultati sono stati ottenuti con due elettrodi in configurazione "wire-to-plate", distanti 38 mm e montati *flush* su una lamina piana ad incidenza nulla (figura 2.10 (a)). Il filo, ovvero l'anodo, coincide col bordo d'attacco. Il profilo di velocità è stato preso a circa metà del *gap* (20 mm dal b.a.).

La seconda immagine (figura 2.9) riporta un profilo dello strato limite ricavato sperimentalmente con un pitot posto a 10 mm prima del catodo. La configurazione degli elettrodi è riportata in figura 2.16(a), l'anodo ha diametro 0.6 mm e il catodo 2 mm. La prova è stata condotta in assenza di vento asintotico e per quattro densità di corrente crescenti. I risultati migliori sono stati trovati in corrispondenza del passaggio di corrente maggiore, in accordo con la legge di  $V_G$  enunciata in precedenza. Inoltre possiamo dire che per, ogni prova condotta, il valore massimo di guadagno  $V_G$  si trova in corrispondenza di 1 mm dalla parete.

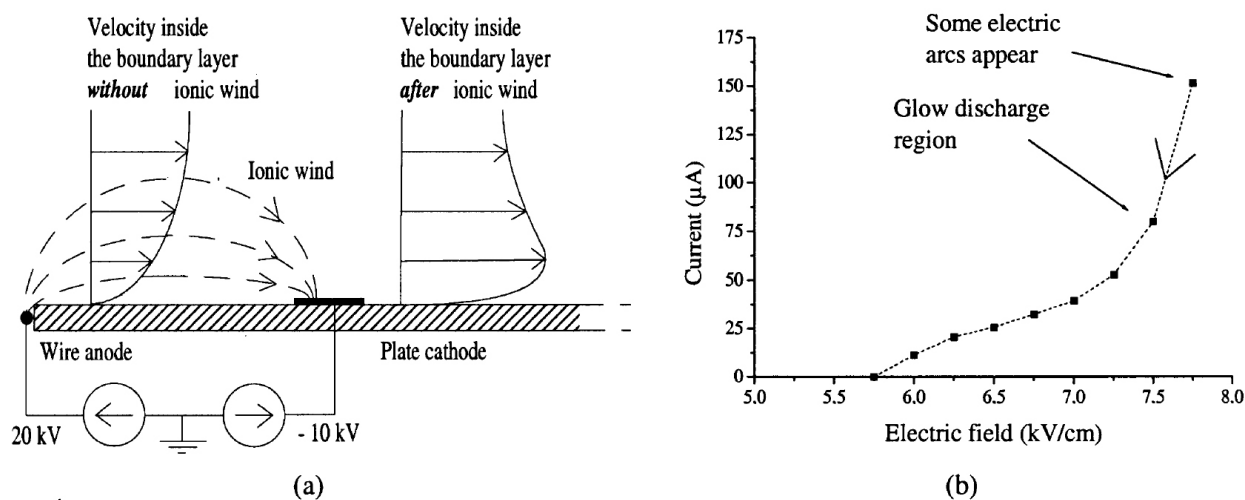


Figura 2.10: Schema della configurazione di setup (a) e relativa curva Densità di corrente vs Campo elettrico (b)

Altre prove sono state condotte per approfondire il comportamento del campo elettrico "E" nell'intorno del punto di maggiore efficienza dell'attuatore al plasma. In particolare riporto un esperimento fatto nel 2001 [11]. Lo schema è medesimo ad una delle prove illustrate in precedenza, con la differenza che la caratterizzazione dell'attuatore è effettuata in aria calma. Configurazione di *set up* e risultati della prova sono riportati in figura 2.10. Confrontando gli esiti con altri esperimenti simili, come ad esempio quello rappresentato in figura 2.12 e risalente al 2005 [15], possiamo dire che i comportamenti sono notevolmente simili. E' soprattutto

interessante notare come la densità di corrente presenti un brusco aumento attorno al valore di campo di  $7.5kV/cm$ , in entrambe le curve. Questa non linearità, insita nel meccanismo di ionizzazione in aria, identifica infatti la soglia di passaggio tra il regime di scarica ricercato nel flow control (*glow*) e un regime di scarica più instabile e sgradito. Questi aspetti sono trattati più approfonditamente nella sezione "Regimi di scarica".

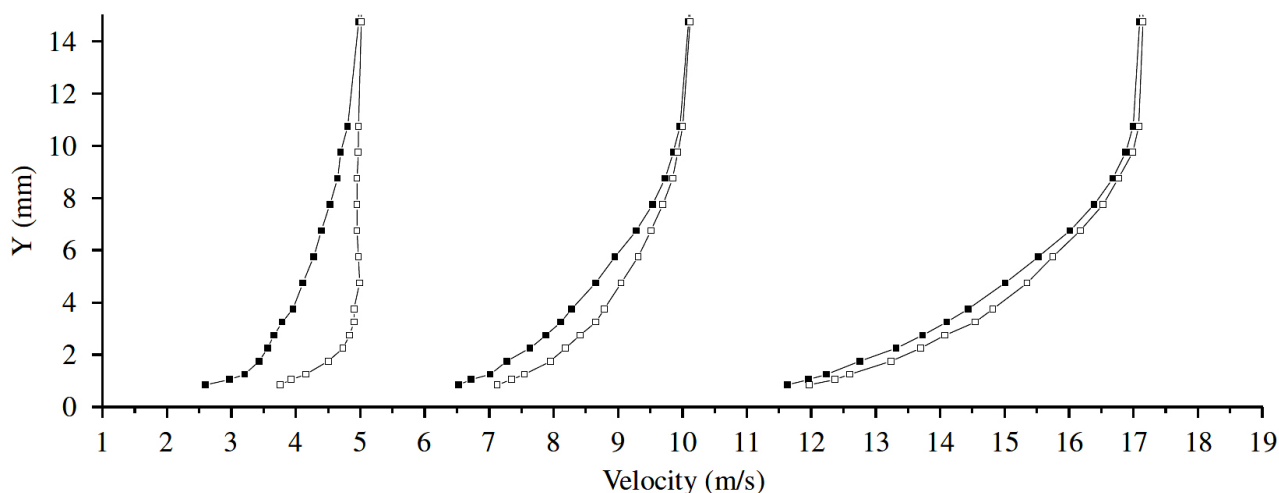


Figura 2.11: Profilo di velocità per vento a 5, 10 e 17 m/s con attuatore acceso e spento.

In un articolo del 2006 Moreau [15] riporta alcune prove sull'effetto di un attuatore a corona positiva, in funzione della velocità asintotica della corrente. Questo tema è di grande attualità soprattutto per comprendere fino a che punto, l'efficacia di queste tecnologie al plasma, può contribuire per il *flow control*. La figura 2.11 mostra tre diversi profili di velocità a parete, relativi rispettivamente a 5, 10 e 17 m/s di vento asintotico, per attuatore sia acceso che spento.

## 2.4 Regimi di scarica

Il comportamento della corrente varia soprattutto in relazione al valore di alta tensione. La curva inerente a questo fenomeno, riportata in figura 2.12, è relativa ad un esperimento del 2005 condotto in corrente continua, per una tra le configurazioni maggiormente studiate in letteratura [15](figura 2.16 a). Gli elettrodi sono costituiti da due fili di diverse dimensioni, posizionati in altrettanti solchi ricavati ad hoc in una superficie di plexiglas. La distanza tra

loro è di  $40\text{ mm}$  e il catodo, invece che essere "messo a terra", è posto a  $-10\text{ kV}$  mentre la tensione dell'anodo viene progressivamente alzata.

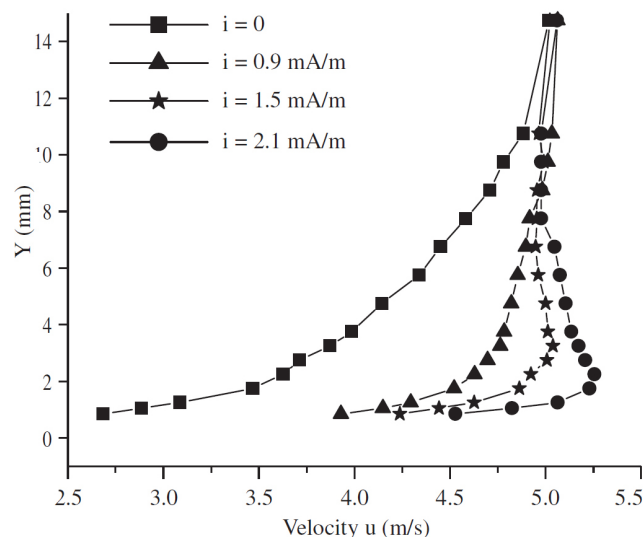
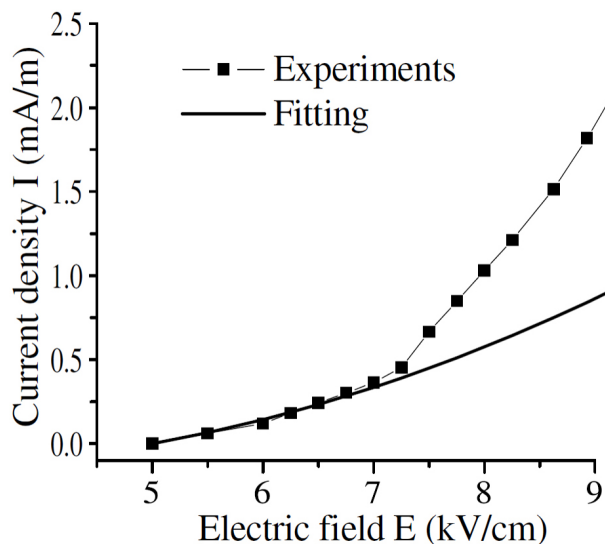


Figura 2.12: Legge di densità di corrente vs campo elettrico, per una scarica a corona.

Figura 2.13: Profilo di velocità nello strato limite per diverse densità di  $I$  e  $U_0 = 5\text{ m/s}$

Il grafico affianco (fig. 2.13) mostra in parallelo, quello che accade al profilo di velocità nello strato limite, all'aumentare della densità di corrente, per una velocità asintotica  $U_0 = 5\text{ m/s}$ . A seconda della densità di corrente, possiamo identificare cinque regimi di scarica differenti [16, 2].

- **Regime Spot:** la scarica è concentrata solo su alcuni punti ben definiti dell'anodo. Spesso questi *spots* sono visibili e aumentano in numero all'aumentare della tensione in *HV*. La densità di corrente resta minore di  $0,2\text{ mA m}^{-1}$  e il vento ionico è da considerarsi trascurabile.
- **Regime Streamer:** aumentando leggermente la tensione, diverse luminescenze isolate coinvolgono entrambi gli elettrodi. La densità di corrente per questo range non va oltre  $0,6\text{ mA m}^{-1}$ . Gli *spots* sono più marcati e sembrano accendersi e spegnersi lungo ambo i fronti. Per  $I$  crescenti, i bagliori diventano chiaramente distinguibili e si allungano verso l'elettrodo opposto formando delle linee di ionizzazione preferenziale, gli *streamer*. La superficie di ionizzazione diventa spesso visibile ma in modo discontinuo e disomogeneo. Questo fenomeno si mantiene parallelo alla superficie dielettrica e circoscritto all'interno



del sottile strato di plasma. In letteratura, questo tipo fenomeno viene anche detto *Onset Streamer*.

- **Regime *Glow*:** questo è l'ultimo livello in cui le condizioni della scarica sono sia "non-termiche" che stabili. La densità di corrente può superare  $1 \text{ mA m}^{-1}$  e quindi il vento ionico prodotto è di maggiore intensità. Il grado di ionizzazione del fluido è il più elevato, considerando quelli a distribuzione uniforme. Su tutta (o buona parte) la superficie tra gli elettrodi, è visibile un sottile film a luminescenza ultravioletta accompagnato da un distinto ronzio di fondo. In questo regime alcuni parametri come l'umidità relativa o la finitura degli elettrodi, acquistano di rilevanza (segue approfondito). Il regime *glow* talvolta viene anche chiamato *Proper Corona*.
- **Regime *Filamentary*:** Aumentando ulteriormente l'intensità del campo elettrico, il *glow* diventa intermittente e si alterna con un regime non più a distribuzione superficiale uniforme. Il passaggio di corrente si concentra in alcuni filamenti che lambiscono ancora la superficie del dielettrico. Il vento ionico si mantiene di forte intensità ma le temperature della zona coinvolta si innalzano bruscamente e il fenomeno diventa velocemente incontrollabile. Questa fase viene anche chiamata *Breakdown Streamer*.
- **Regime *Arc*:** a questo stadio l'intensità di corrente è almeno di tre ordini di grandezza maggiore rispetto al *glow* e si concentra in uno o pochi archi. Le traiettorie della corrente elettrica sono tridimensionali e ingovernabili; anche il vento ionico perde d'intensità e regolarità. Possiamo ugualmente sentir parlare a questo proposito di regime *Spark*.

Come vedremo in seguito, la presenza di un flusso d'aria che investe l'attuatore, ne aumenta fortemente la stabilità in ogni regime. E' dunque giusto osservare che nella fase di caratterizzazione di un attuatore al banco (in aria calma), i regimi enunciati in precedenza sono più ravvicinati e la transizione ad uno stato di scarica meno stabile è maggiormente riscontrabile.

## 2.5 Stabilità della corona

Diversi studi realizzati attorno al 2005 [16, 15], si sono occupati di mettere in relazione il comportamento della superficie di scarica con alcune caratteristiche atmosferiche. Non a caso, il valore di rigidità dielettrica di  $3 \text{ kV/mm}$ , è relativo ad aria secca e pressione standard. E' noto

che umidità, pressione e temperatura, seppur con sensibilità diverse, influiscano sulla stabilità della corona. Allo stesso scopo sono stati fatti accertamenti riguardo all'influenza di parametri geometrici come la distanza e la forma degli elettrodi. Per comprendere meglio i risultati ottenuti da queste ricerche, è importante definire cosa si intende per stabilità di scarica. La stabilità di una corona elettrica è evidentemente connessa con l'andamento nel tempo dell'intensità di corrente, a differenza di potenziale costante.

Osservando le relative figure 2.14, riferite ai regimi protagonisti nella formazione di vento ionico (*streamer*: da 0.2 a 0.5 mA m<sup>-1</sup> ; *glow*: da 0.5 a qualche mA m<sup>-1</sup>), possiamo notare come la corrente sia formata da due componenti: un segnale portante associabile al trasporto costante degli ioni e una componente oscillante che si ritiene causata dalla propagazione discontinua degli *streamer*. Senza dilungarci, possiamo notare come la componente oscillante cresca con l'aumento d'intensità del campo elettrico, fino a determinare l'indesiderato (e immediato) passaggio da regime *glow* ad arco elettrico.

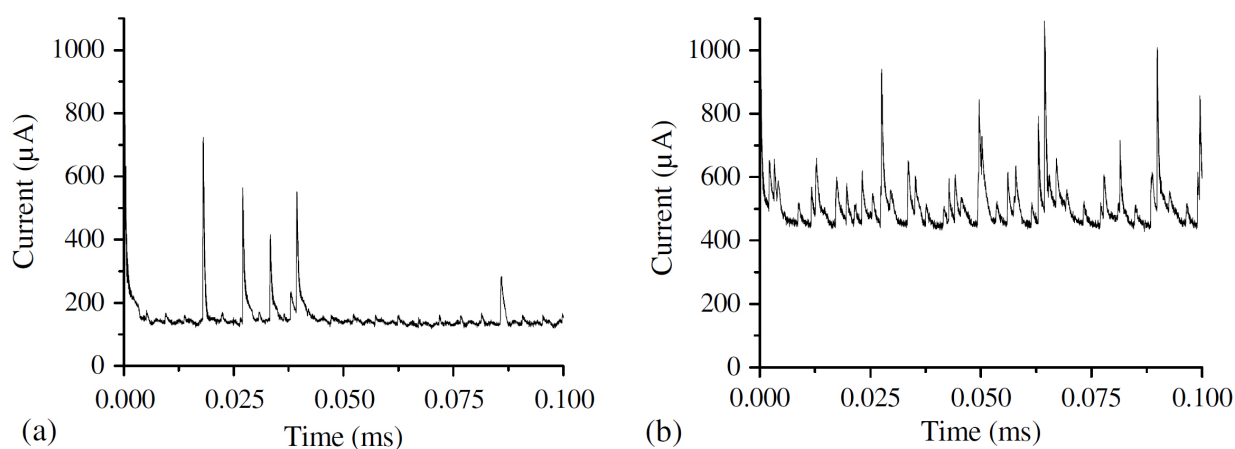


Figura 2.14: Oscillazioni della corrente di scarica a vari regimi

In sostanza la stabilità di una corona elettrica è tanto maggiore quanto, il setting sui parametri geometrici ed atmosferici, ne limita la transizione ad arco elettrico.

I risultati più interessanti sono sostanzialmente cinque:

- La scarica è più stabile se l'anodo è di dimensioni molto più piccole rispetto al catodo
- Il valore di temperatura atmosferica non ha effetti apprezzabili sulla scarica, fino alla soglia di circa 60°C. La pressione invece riveste un ruolo fondamentale.

- Come prevedibile, la scarica è meno stabile per valori alti di umidità. Quando infatti nell'aria è presente un eccesso di  $H_2O$  e l'umidità relativa è maggiore del 55%, durante la ionizzazione c'è una maggiore produzione di ioni  $OH^-$ , i quali vengono attratti dall'anodo provocando un vento ionico contrario [15].
- Le proprietà della scarica elettrica dipendono altresì fortemente dalla superficie dielettrica interposta fra gli elettrodi.
- Nel caso in cui la scarica avvenga all'interno di aria in movimento (come per le applicazioni di *flow control*), il meccanismo di *avalanche multiplication* subisce una gradita alterazione che, in generale, tende a ritardare la transizione da *glow* ad arco.

Un esperimento molto interessante del 2002 [16], che raccoglie i risultati nella figura 2.15, può aiutarci a motivare questo ultimo punto. Per un attuatore piano, posto in aria calma, si son scelti due valori di campo elettrico tali che generassero una scarica, ma in assenza di vento ionico "Velocity  $U_0 = 0$ ". Appena è stata data una velocità al flusso allineata con gli elettrodi, essi hanno incrementato (quasi linearmente) il passaggio di corrente. Questo significa che, per raggiungere ad esempio un regime di *glow* in presenza di una corrente d'aria (rispetto ad aria calma), servirà fornire meno energia potenziale al sistema. Questo si traduce in una minore eccitazione del gas, da cui consegue una minore componente di corrente oscillante, a tutto vantaggio della stabilità della scarica.

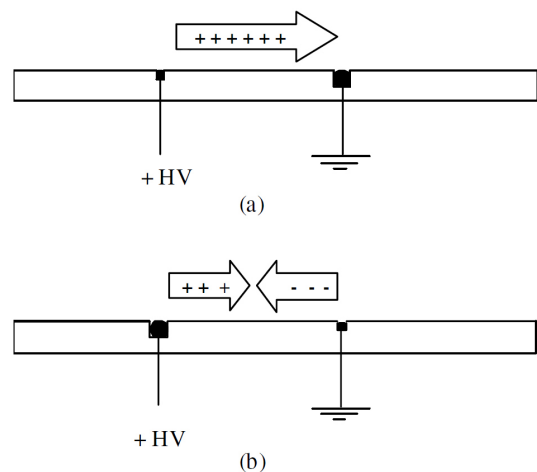
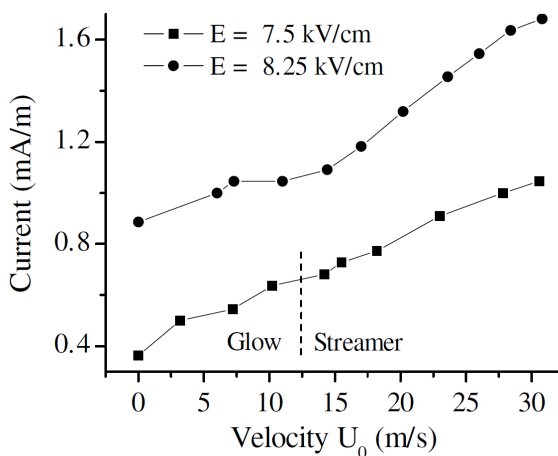


Figura 2.15: Intensità di corrente per un campo dato e  $U_0$  crescente.

Figura 2.16: *Electric wind* con anodo fine (a); con catodo fine (b).

L'osservazione inerente alle dimensioni geometriche degli elettrodi, è invece diretta conseguenza del fatto che, in aria, gli ioni positivi vengono prodotti più facilmente rispetto agli ioni negativi [16]. La configurazione ottimale per il *flow control* risulta essere dunque *positive corona* con anodo sottile e catodo notevolmente più grande (fig.2.16).

# Capitolo 3

## GALLERIA DEL VENTO

### 3.1 Descrizione generale

Questo lavoro di ricerca sugli attuatori al plasma, non si è limitato ad approfondire solo gli aspetti teorici dalla materia. Sono state incluse infatti anche le fasi di progettazione, realizzazione e verifica di un dispositivo a scarica in corrente continua. La galleria del vento resa disponibile per le prove pratiche, è un modello tedesco della ditta Elektron, progettata dall'Ing. Herbert Brause. Questa galleria sebbene non sia di recente concezione (1975 circa), presenta una notevole cura nei dettagli. Dopo l'opera di pulizia e manutenzione, e per merito agli attuatori al plasma, è tornata tornata in funzione.

Il target delle applicazioni consentite da questa galleria è di tipo didattico in quanto, sia le dimensioni della camera di prova che i numeri di Reynolds raggiungibili sono relativamente limitati. L'immagine 3.1 mostra la galleria, successivamente alle opere di manutenzione e adeguamento, svolte a causa del disuso prolungato e di alcune necessità operative specifiche.

Come si può notare dall'immagine, sebbene la galleria è del tipo *circuito aperto*, il condotto di scarico è costituito da un tubo di diametro ridotto (8 cm) al quale può essere collegata una prolunga per l'espulsione dei gas in altro ambiente. Il motivo di ciò, riguarda la caratteristica principale della galleria, ovvero quella di permettere la visualizzazione del flusso in camera di prova, tramite filetti di fumo. Oltre alla necessità di scaricare in altro ambiente il fumo (prodotto dalla combustione di olio), dal capitolo 2 ricordiamo anche che una scarica a corona libera tra l'altro Ozono, gas dannoso se respirato in concentrazione maggiore di  $0,2 \text{ mg/m}^3$ .

Le dimensioni della camera di prova sono espresse in figura 3.2: Larghezza=525 mm, Altezza=



Figura 3.1: Galleria del vento.

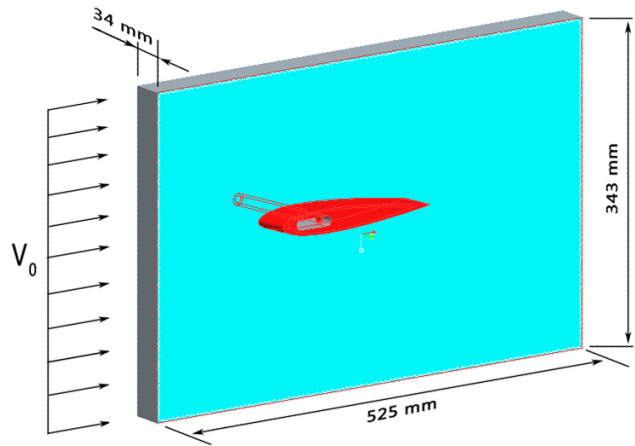


Figura 3.2: Dimensioni della camera di prova.

za=343 mm, Profondità= 34mm. La geometria così assottigliata consente una approssimazione del flusso d'aria, in prima istanza, bidimensionale. L'accesso alla camera di prova è consentito dalla mobilità della parete posteriore della galleria. Come descriverò più avanti, questo pannello incernierato era originariamente fatto in acciaio, quindi assolutamente incompatibile con applicazioni in presenza di plasma. E' stato dunque necessario progettare una corrispondente versione in plexiglas.

La qualità di vena di cui disponiamo, non è probabilmente da ritenere eccellente. Uniformità di corrente, stazionarietà e livello di turbolenza sono inficiati da alcuni aspetti come: vibrazioni della ventola, strati limite accentuati da irregolarità, effetto di bloccaggio verticale ma soprattutto, da un condotto di scarico che dal punto di vista aerodinamico presenta notevoli forzature concettuali (fig.3.3).

Dopotutto dobbiamo anche ricordare che in questa fase del lavoro, i risultati principali sull'attuatore al plasma, sono costituiti da un giudizio di tipo qualitativo. Questo implica come priorità, quella di disporre di un flusso a regime quanto più regolare, per consentire una visualizzazione definita dei filetti fluidi attorno al modello di prova. Questa prerogativa conta anche sulla presenza di una doppia griglia in serie, posta a monte dell'imbocco d'aspirazione, per uniformare il più possibile la corrente. Come vedremo dalle immagini nel capitolo 5, la regolarità del flusso è sufficientemente verificata

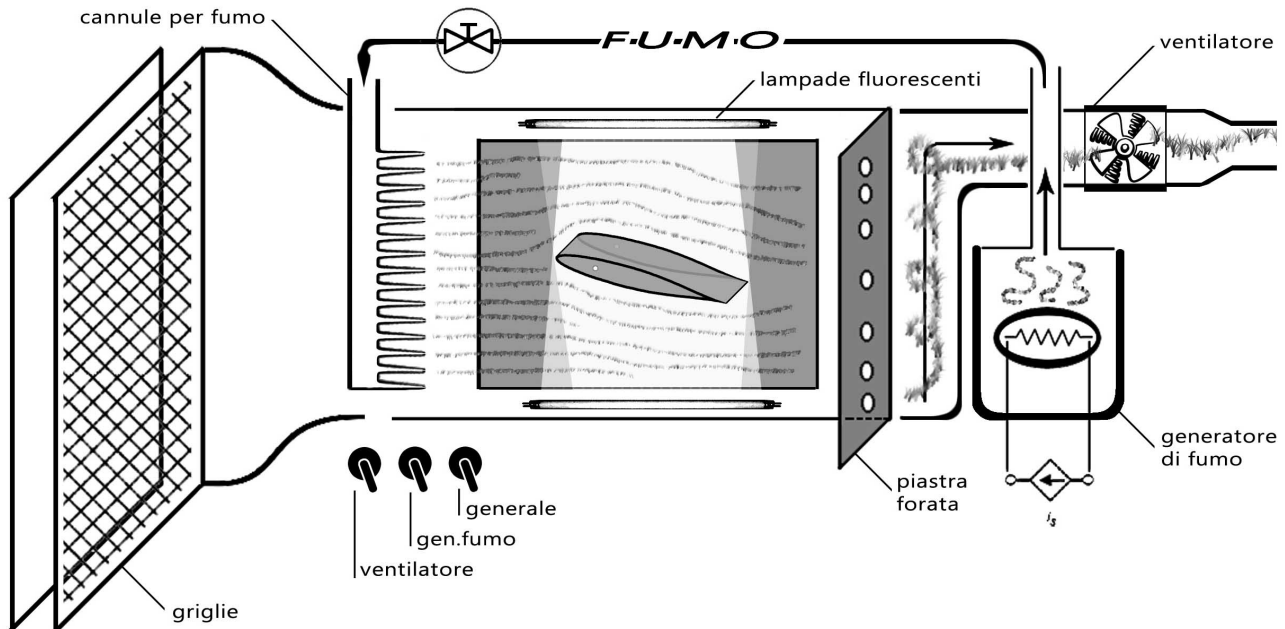


Figura 3.3: Schema semplificato della galleria.

### 3.1.1 Pulizia e manutenzione

Come detto, l'opera di restauro della galleria, seppur poco interessante dal punto di vista scientifico, ha comportato una notevole mole di lavoro. La causa principale è da attribuire proprio alla peculiarità della galleria e quindi al fumo. Possiamo ritenere che in passato si siano utilizzati oli più inquinanti, più pesanti e con residui di combustione maggiori. Il tempo di inutilizzo ha fatto il resto, incrostando i residui dell'olio su tutte le superfici e, aspetto peggiore, ostruendo ogni cannula adibita alla fuoriuscita dei fili di fumo (fig. 3.4).

Un'altra parte dell'*insieme galleria*, particolarmente malmessa e danneggiata, era il generatore di fumo. Esso, come mostra la figura 3.5, è costituito da una base metallica cava e da un cilindro di vetro chiuso superiormente da una piastra.

All'interno della base, c'è un disco di ferro, contenente a *sandwich* una resistenza che ne genera il surriscaldamento. Il coperchio ha un piccolo serbatoio che regola la caduta delle gocce d'olio sul disco caldo, dal quale si libera il fumo che a sua volta viene pompato nelle cannule in camera di prova. Oltre a presentare ovviamente cumuli di olio secco notevoli, il generatore aveva la resistenza danneggiata che quindi impediva il funzionamento. Attraverso una morsatura

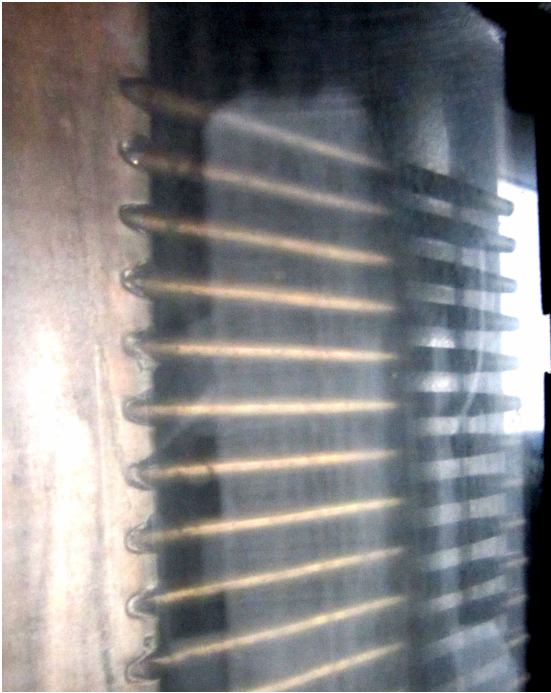


Figura 3.4: Cannule per l'iniezione di fili di fumo nella corrente d'aria.



Figura 3.5: Generatore di fumo a paraffina liquida.

speciale è stato possibile renderlo nuovamente operativo.

## 3.2 Impianto elettrico

L'impianto elettrico della galleria è stato concettualmente mantenuto identico a quello originale. Lo schema in figura 3.6 lo riassume nel completo. L'alimentazione alla galleria è fornita dalla linea elettrica standard  $220\text{ V}$  per  $50\text{ Hz}$ . Poiché l'intensità di corrente dichiarata è di  $1,7\text{ A}$ , la potenza assorbita dalla galleria è di  $\simeq 370\text{ W}$

Come anticipato in precedenza, la resistenza del generatore di fumo era danneggiata ed è stata riparata. Altre parti elettriche invece, hanno necessitato una sostituzione ex novo. Ad esempio gli interruttori di comando, le prese di alimentazione e tutta la parte relativa all'illuminazione della camera di prova. Quest'ultima infatti ha richiesto un adeguamento a causa della irreperibilità di tubi fluorescenti di vecchia concezione.



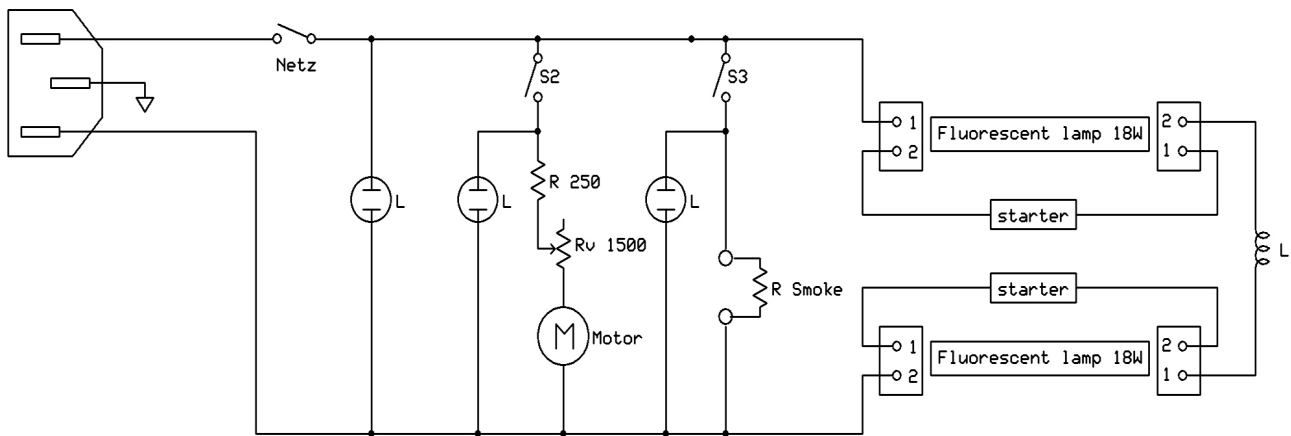


Figura 3.6: Schema dell'impianto elettrico della galleria didattica.

### 3.3 Prove preliminari e velocità in centro vena

A revisione completata, sono state fatte alcune prove senza modello in camera di prova, per verificarne il corretto funzionamento della galleria. In questa fase è stata regolata una valvola sulla mandata del fumo per migliorarne la visualizzazione.

Servendoci di un anemometro a film caldo, abbiamo provveduto ad inserire la sonda nel foro adibito al perno che sostiene il provino. Si è inoltre regolato il reostato per massimizzare la potenza del ventilatore dopo di che è stato possibile rilevare la velocità massima del vento a centro vena. La galleria, nel primo momento di accensione, presenta degli effetti dissipativi di tipo elettrico che si ripercuotono sulla velocità. Una volta che l'impianto è andato a regime, la velocità dell'aria si attesta su 1,35 m/s.

# Capitolo 4

## FASE DI PROGETTO E REALIZZAZIONE

### 4.1 Modello strumentato con attuatore al plasma

In primo luogo, la fase di progetto del modello strumentato con attuatore al plasma, ha riguardato la scelta del profilo aerodinamico sul quale lavorare. Sono stati osservati i seguenti requisiti:

- buon comportamento della separazione ad alte incidenze e a bassi numeri di Reynolds,
- semplicità dei processi di lavorazione per la riproduzione in laboratorio del modello in scala,
- buon compromesso sulle le dimensioni fisiche del modello, per ottenere  $Re$  elevato ma ugualmente evitare un eccessivo bloccaggio in camera di prova.

Il campo di scelta si è ristretto tra i seguenti profili:

- Simmetrici: NACA0012, NACA0013 e NACA0014.
- A regine di bolla lunga: NACA66221, NACA66418, NACA65421, NACA65618, NACA, Wortmann FX 62-k-131 e Althaus.

Infine, il profilo NACA 0013 è stato *eletto* su tutti grazie alla semplicità costruttiva, alla possibilità di comparare le informazioni reperite in letteratura e inoltre, grazie alla simmetria sarà

#### 4.1. MODELLO STRUMENTATO CON ATTUATORE AL PLASMA

consentito verificare esattamente l'angolo d'incidenza nulla in base alla visualizzazione delle linee di corrente. Avendo ritenuto di limitare lo spessore massimo del modello a 2 cm, la corda  $C$  è risulta:

$$C = \tau_{MAX}/0,13 \Rightarrow C = 153,8mm.$$

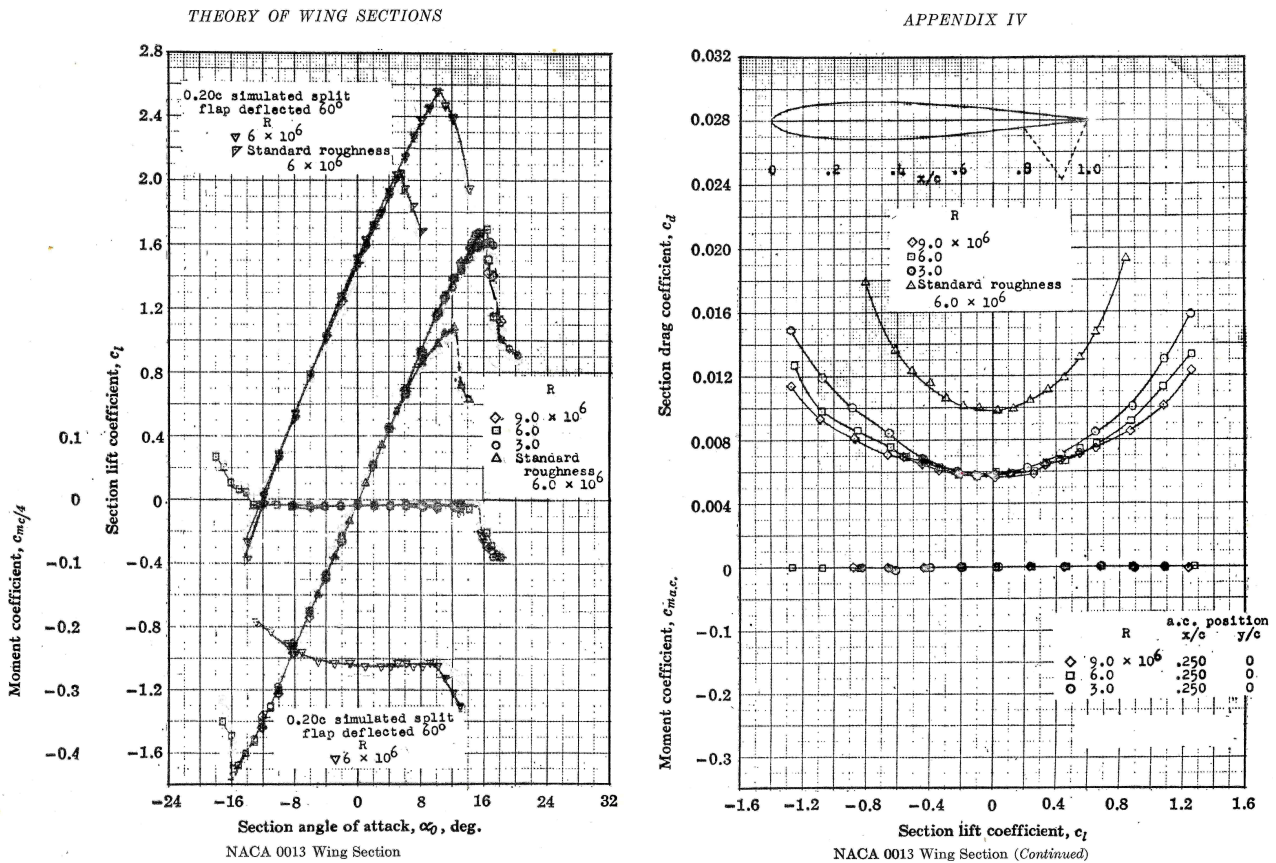


Figura 4.1: Prestazioni del profilo NACA 0013.

Il punto di applicazione dell'attuatore, è dipeso prevalentemente dalle caratteristiche aerodinamiche del profilo.

Nel nostro caso l'obiettivo dichiarato era quello di ritardare il più possibile la separazione del flusso per alte incidenze. Per far questo, sebbene non sia una scelta obbligata, si è stabilito di posizionare l'attuatore in modo da agire direttamente nel punto di separazione.

Come primo passo, è stato innanzitutto possibile provare direttamente il profilo in galleria e, attraverso le visualizzazioni della corrente, stimare il punto di separazione corrispondente alla relativa incidenza.

Di seguito si riportano le istantanee del flusso attorno al profilo, per angoli di incidenza a intervalli di  $5^\circ$  fino ad  $\alpha_{MAX} = 40^\circ$ .

### 4.1.1 Punto d'applicazione dell'anodo

Come si può notare dalle visualizzazioni (fig. 4.2), lo stallo del profilo avviene tra i  $10^\circ$  e i  $15^\circ$ . Questo è in accordo con le curva sperimentale [1] in figura 4.1 seppur il confronto non è relativo ai medesimi numeri di Reynolds.

Più precisamente possiamo notare che aumentando l'incidenza, la bolla di separazione avanza verso il bordo d'attacco fino a degenerare in un punto di separazione definitiva. Dopo i  $15^\circ$  infatti, il flusso non tenta nemmeno più di riattaccare, compiendo la sua transizione direttamente da strato limite laminare a scia turbolenta. E' altrettanto evidente che per incidenze più elevate, tra circa  $15$  e  $20^\circ$ , il flusso segue ancora per un breve tratto la *prua* del profilo. Ad esempio a  $20^\circ$  il distacco del fluido (fig. 4.3) sembra avvenire a circa il 10% di  $C$  dal b.a. Dai  $25^\circ$  in su abbiamo una separazione netta di bordo d'attacco.

Queste analisi ci hanno aiutato a determinare il punto esatto d'applicazione dell'attuatore al plasma. Come già visto, si tratta di applicare due elettrodi sulla superficie aerodinamica, in direzione trasversale alla corrente (ipotesi 2D  $\rightarrow$  flusso longitudinale). Quando l'aria lambisce il dorso del profilo, incontra un primo elettrodo che sarà quello denominato HV o di alta tensione (fig. 2.1).

Come riscontrato in alcuni esperimenti effettuati da Artana nel 2002 [2] e più recentemente da Mestiri (2010)[14] possiamo affermare che, per gli attuatori in corrente continua a corona positiva, il contributo maggiore di vento ionico è localizzato molto più vicino all'anodo, dove la repulsione dei cationi è più forte. Il dato è riferito a circa il 10-15% del *gap* a partire dall'anodo e man mano che si procede verso il catodo (b.u.), il vento ionico perde d'intensità.

Se ad esempio, come effettivamente assumeremo, si desidera lavorare su un'incidenza  $\alpha$  pari a  $20^\circ$ , procediamo col visualizzare il dettaglio del b.a. (fig. 4.3) per individuare approssimativamente il punto di separazione. Sebbene la definizione della distanza fra gli elettrodi verrà trattata più avanti, possiamo comunque anticipare che il *gap* di progetto non potrà superare i 3 cm. Questo è semplicemente dovuto ad un limite di tipo strumentale in quanto il regime di *glow* richiede circa  $7,5kV/cm$  [16] ed il nostro generatore di tensione può produrne un massimo di 25kV.



4.1. MODELLO STRUMENTATO CON ATTUATORE AL PLASMA

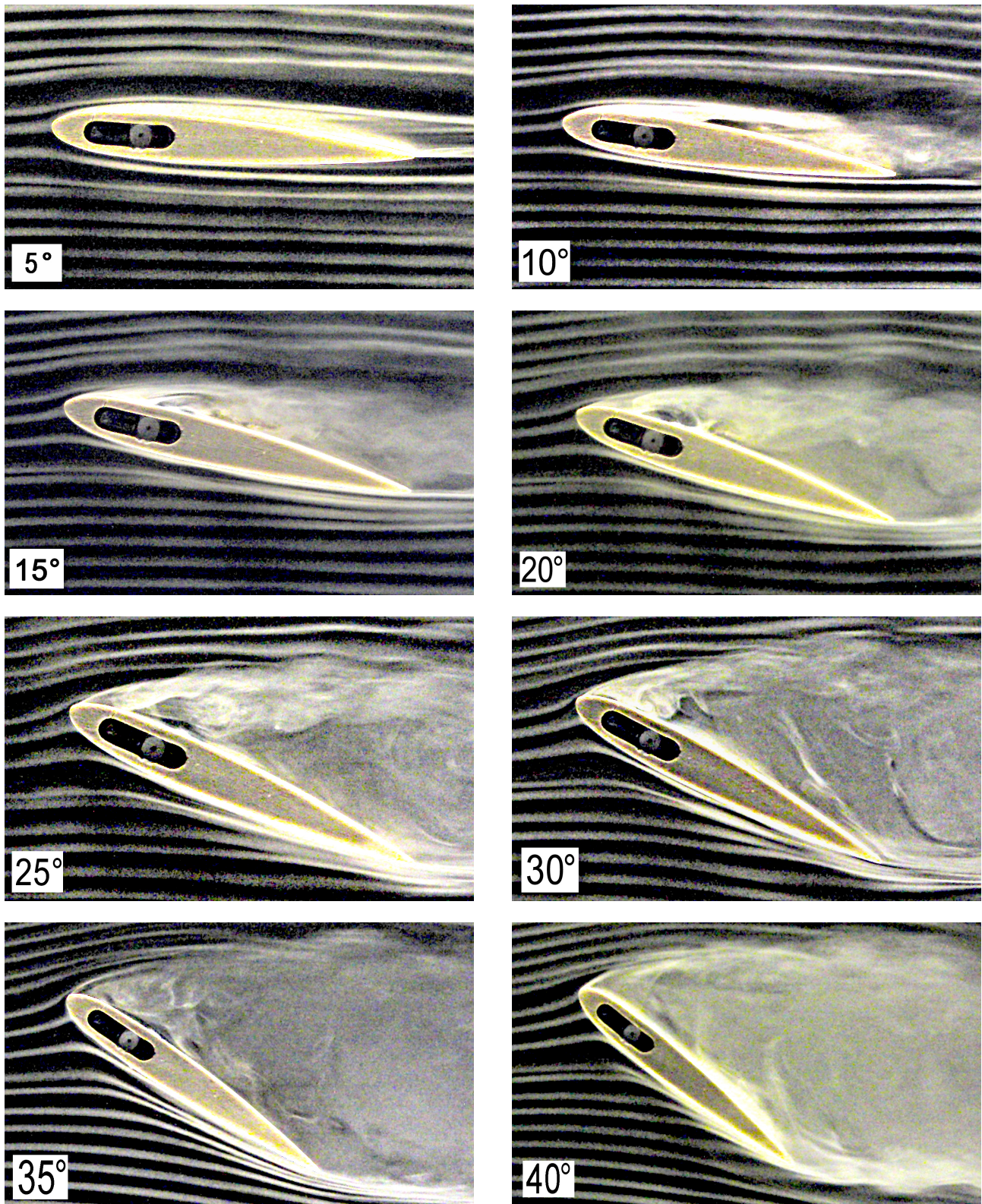


Figura 4.2: Caratterizzazione del profilo 0013,  $U_0 = 1,3 \text{ m/s}$



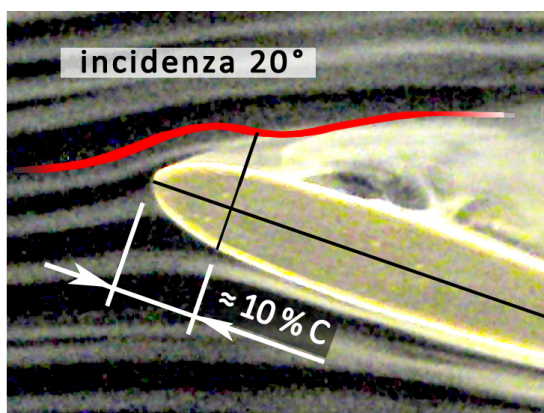


Figura 4.3: Particolare della separazione a  $20^\circ$ .

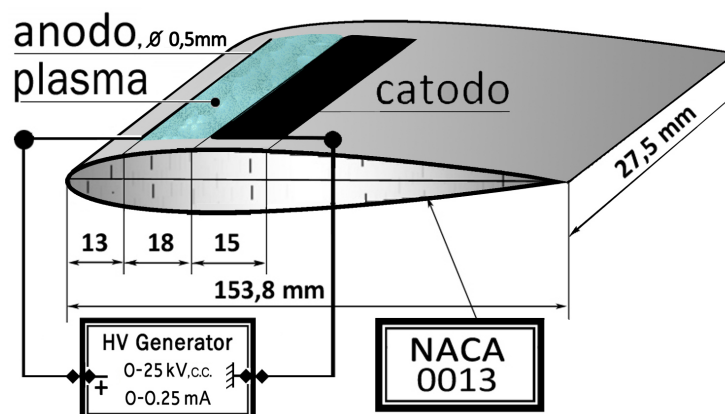


Figura 4.4: Schema stilizzato progetto attuatore.

Se ad esempio  $d$  fosse proprio 3 cm, potremmo affermare che l'induzione di vento ionico più consistente avvenga a circa 3 mm dall'anodo. Se nel nostro caso, come detto, l'obiettivo è quello di ottenere il picco dell'attuatore al 10% dal b.a. ( $\simeq 16\text{mm}$ )(fig.4.3), vorrà dire che l'anodo dovrà essere posizionato 2-3 mm più a monte (fig.4.4).

**\* Porremo quindi l'anodo a 13 mm dal b.a.**

#### 4.1.2 Distanza fra gli elettrodi

Per determinare la distanza alla quale posizionare gli elettrodi abbiamo utilizzato la relazione (4.1) nel cap. 2, che lega la distanza  $d$  alla velocità del gas  $V_g$ .

Prima di svolgere due calcoli è giusto fare alcune considerazioni. Presupponiamo di voler mettere alla prova l'attuatore per incidenze altrimenti proibitive, escludendo tuttavia come punto di progetto, le situazioni estreme in cui la separazione è sulla linea di bordo d'attacco.

Dal paragrafo precedente si sono individuati:

- 1) angolo di incidenza  $20^\circ$
- 2) zona di separazione attorno al 10% di  $C$  ( $\simeq 16\text{mm}$ ).

Il progetto sarà riferito a quest'ultima stazione, dove evidentemente dovremo massimizzare l'iniezione di vento ionico, per colmare il più possibile la discrepanza con la  $U_e$  esterna (fig.4.5).

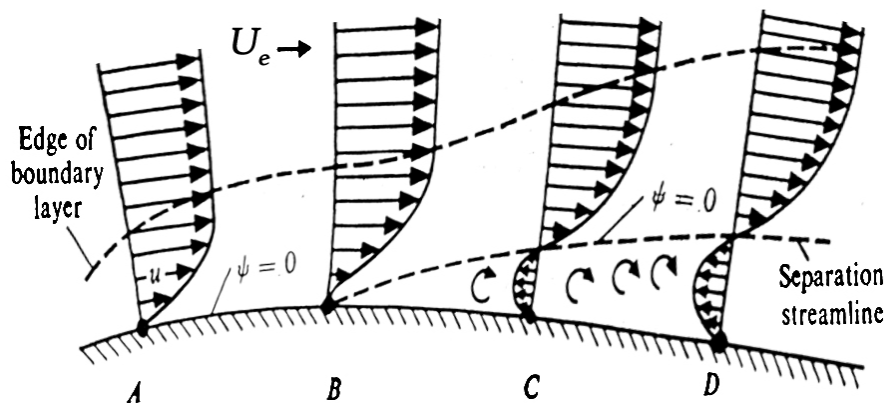


Figura 4.5: Profili di velocità di S.L. nell'intorno del punto di separazione "B".

Quanto più l'attuatore riuscirà a ripristinare nello strato limite (in C e D, fig.4.5), una velocità paragonabile a quella esterna, tanto più la separazione verrà ritardata.

A questo punto si richiede la determinazione di  $U_e$  ossia la velocità esterna allo strato limite, nel punto di progetto. Sfruttando l'ipotesi precedentemente introdotta di corrente non ancora separata, come mostrato in figura 4.3 entro il 10% o come schematizzato in figura 4.5 nel tratto A - B, possiamo utilizzare un software tipo Xfoil con correzione per S.L., per stimare il flusso attorno al b.a.

Fin tanto che il flusso non separa o evidenzia zone di ricircolo, il comportamento di questo software è da ritenere attendibile. Di fatto è anche giusto osservare che in generale, in questa fase preliminare di ricerca, risulta fisiologico dover leggermente semplificare alcuni aspetti.

Nel nostro caso, i dati inseriti nel programma Xfoil sono i seguenti:

*Profilo 0013 ;  $Re = 20000$  ; incidenza  $\alpha = 20^\circ$*

tenendo conto che la nostra  $U_0 = 1,35$  m/s, i risultati sono:

al 10% C ,  $U_e = 2,25 U_0 \Rightarrow U_e = 3,04$  m/s

al 20% C ,  $U_e = 1,90 U_0 \Rightarrow U_e = 2,57$  m/s

A riguardo della  $U_0$  bisogna però notare che, ad elevate incidenze come  $20$  o  $30^\circ$ , l'effetto di *bloccaggio* potrebbe non essere trascurabile in quanto la galleria è sostanzialmente bidimensionale e le pareti laterali del profilo, confinano direttamente con lo strato limite sulle pareti della camera di prova. Questo significa che il bloccaggio non dipende più dal rapporto fra le aree, libera e bloccata, ma solo dal rapporto fra le loro altezze. Gli unici dati che ci servono sono

l'altezza della camera di prova  $H = 343 \text{ mm}$  e la corda del profilo alare  $C = 153,8 \text{ mm}$ . Poiché le prove ad alta incidenza sono vitali per questo lavoro, andremo a considerare i bloccaggi ad entrambe le incidenze:

$$\begin{aligned} \alpha 20^\circ: C \sin 20^\circ = 53 \text{ mm} &\rightarrow \frac{153,8}{153,8-53} = 1,18 \rightarrow U_e = 1,18 \times 2,57[\text{m/s}] = 3,03 \text{ m/s} \\ \alpha 30^\circ: C \sin 30^\circ = 77 \text{ mm} &\rightarrow \frac{153,8}{153,8-77} = 1,29 \rightarrow U_e = 1,29 \times 3,04[\text{m/s}] = 3,92 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

Il nostro obiettivo diventa quindi trovare un setting teorico che possa dare origine ad una velocità del gas  $V_g$  di almeno 4 m/s. La stima dell'intensità di corrente  $I$  è calcolabile attraverso la relazione proposta da Goldman [9], dove le variabili sono esclusivamente il voltaggio e la distanza fra gli elettrodi. Si ritiene infatti che per campi unipolari a tensione  $V_A$  assegnata, l'intensità  $I$  non possa eccedere un certo limite di saturazione detto  $I_{SAT}$ .

$$V_G = \sqrt{\frac{I_{SAT} d}{\rho \mu A_G}}, \quad I_{SAT} \simeq \frac{2 \mu \epsilon_0 V_A^2}{d}, \quad (4.1)$$

relazione quest'ultima, nella quale  $\mu$  è la mobilità ionica dell'aria pari a  $2 \times 10^{-4} [\text{m}^2/\text{V s}]$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 [\text{pF/m}]$  è la permittività elettrica e  $V_A [\text{kV}]$  è il voltaggio assoluto ai capi degli elettrodi.

Una stima ragionevole può essere fatta anche per la distanza fra gli elettrodi  $d$  la quale, per influire in modo sostanziale sulla corrente esterna, deve essere almeno il doppio dello spessore dello strato limite. Nel caso in cui ci riferiamo all'aria in atmosfera standard,  $I_{SAT}$  si può riscrivere in forma semplificata come:

$$I_{SAT} \simeq \frac{4 V_A^2}{d}, \quad \text{con} \quad V_A = d E_0, \quad (4.2)$$

dove  $E_0 \simeq 8 \text{ kV/cm}$ , rappresenta il valore standard di tensione disruptiva in aria secca.

Possiamo adesso semplificare ulteriormente  $I_{SAT}$  e riscrivere la relazione di  $V_G$ , evidenziandone la dipendenza dalla coordinata  $x$  all'interno del *gap* di scarica.

$V_G$  risulta dipendente da tutti i parametri stimati fin d'ora, con un'unica riserva per il termine  $A_G$ .

$$I_{SAT} \simeq 4 d E_0^2 \rightarrow V_G(x) = \sqrt{\frac{4 d E_0^2}{\rho \mu A_G(x)}}. \quad (4.3)$$



$A_G$  è detta sezione di scarica, ovvero una ipotetica superficie, riferita ad una data  $x$  e orientata in modo normale alle linee di flusso del campo elettrico (fig. 4.7). Questa area delimita sostanzialmente la parte di fluido maggiormente ionizzata, combinata con la parte di campo elettrico maggiormente intenso.

L'altezza di questa sezione “ $h$ ”, definisce il così detto *layer* di scarica.

Soprattutto per la scarica a corona positiva, possiamo affermare che la distribuzione di campo elettrico sulla sezione, si intensifica maggiormente vicino alla parete [16], per tanto  $h$  può essere assimilata con il valore di  $\delta_{s.l.}$  in quel preciso punto. Infatti, sebbene il campo elettrico possa riuscire a ionizzare una ristretta parte di fluido esterno allo s.l., queste particelle cariche, per effetto della  $U_e$  verrebbero trascinate via dalla corrente senza così contribuire alla stabilità della scarica. La dimensione trasversale di  $A_G$  invece è pari all'estensione in apertura degli elettrodi e quindi assimilabile alla larghezza del profilo alare di 27,5 mm.

Possiamo inoltre considerare che dove il campo  $E$  è più intenso, le linee di flusso sono maggiormente concentrate. Questo implica una sezione  $A_G$  minore e, per la conservazione della quantità di moto, un vento ionico  $V_G$  maggiore.

Attraverso Xfoil, si è proceduto nel determinare lo spessore di strato limite, con i medesimi parametri adottati in precedenza: sezione in esame al 10% dal b.a., profilo calettato a 20° e  $Re = 20000$ . Il programma ha decretato uno spessore  $\delta_{s.l.} \simeq 8\text{ mm}$ , il che sembra adeguato considerando un numero di  $Re$  così basso.

Questo ci consente di completare le stime dipendenti da  $\delta_{s.l.}$ :

- **gap:**  $d = \delta_{s.l.} \times 2.25 \rightarrow d = 8[\text{mm}] \times 2.25 = 18\text{ mm}$ ,
- **tensione assoluta:**  $V_A = d \times E_0 \rightarrow V_A = 2[\text{cm}] \times 8[\text{kV/cm}] = 16\text{ kV}$ .

A questo punto abbiamo valutato ogni *ingrediente* e siamo in grado di stimare la velocità  $V_g$ : La figura 4.7 riassume la geometria della superficie di scarica, mentre affianco nella tabella 4.6 si riporta il setting dei parametri stimati per la determinazione di  $V_g$ .

**\* Realizzeremo quindi l'attuatore ponendo il catodo a 18 mm dall'anodo.**

E' stato inoltre possibile compiere a priori, una verifica teorica sulla bontà dell'attuatore così progettato, tramite il numero *elettro-idrodinamico*  $N_{EHD}$ .

Diversi autori si servono infatti di questo numero, per caratterizzare le condizioni elettro-

d [cm]	$E_0$ [kV/cm]	b [mm]	h [mm]
1.8	8	27.5	8
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [m <sup>2</sup> /V s]	$A_G$ [mm <sup>2</sup> ]	$V_A$ [kV]
1.125	$2 \cdot 10^{-4}$	220	14.4
Vento Ionico [m/s]		4.093 $\approx$ 4	

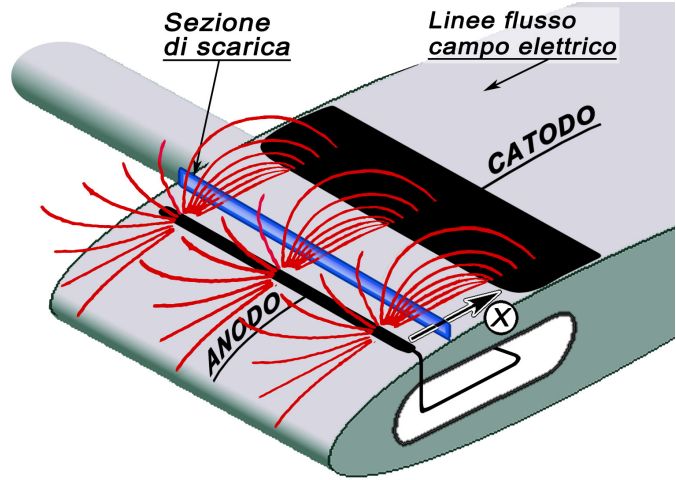


Figura 4.6: Tabella riassuntiva sulle stime dei parametri di progetto.

Figura 4.7: Schema delle dimensioni del *layer* di scarica.

idrodinamiche della corrente.  $N_{EHD}$  è un numero adimensionale che relaziona la forza di volume generata dalla scarica con l'effettiva inerzia del gas da controllare, è definito come:

$$N_{EHD} = \frac{I}{l \rho \mu u^2}, \quad (4.4)$$

dove  $I$  è l'intensità di corrente assoluta,  $\rho$  è la densità dell'aria,  $l$  la lunghezza dell'elettrodo,  $\mu$  è la mobilità ionica e  $u$  la velocità del flusso d'aria, ovvero la nostra  $U_e$ .

Da questa definizione possiamo dedurre che per  $N_{EHD} \rightarrow 0$  il flusso verrà sempre meno influenzato dal vento ionico  $V_G$ . Al contrario, quanto più  $N_{EHD} \rightarrow \infty$ , tanto maggiore sarà la superiorità di  $V_G$  rispetto al flusso indisturbato, determinando quindi una capacità di *flow control* sempre maggiore.

Si può assumere che per  $N_{EHD} > 1$ , l'efficienza dell'attuatore sia da considerare buona. Quindi deve essere:  $I/(l \rho \mu) > u^2$  [15].

Da questa ultima scrittura possiamo considerare che, ponendoci nel caso di  $I$  fissa, l'attuatore sarà tanto più efficiente quanto più la  $u$  sarà piccola. Questo mostra quale sia l'importanza di mantenere la scarica elettrica vicino a parete, dove grazie allo strato limite la  $u \rightarrow 0$ .

Calcoliamo  $N_{EHD}$ , nel nostro caso, attraverso i seguenti valori:

- $l = 27,5 \text{ mm}$
- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

- $\mu = 2 \times 10^{-4} m^2/(V s)$
- $u = Ue \simeq 4 m/s$
- $I_{SAT} [\mu A] \simeq \frac{4V_A^2 [kV^2]}{d [mm]} \rightarrow I_{SAT} \simeq \frac{4(8 \times 1,8)^2}{18} \simeq 46 [\mu A] = 0,046 mA$ ,

dove nella  $I_{SAT}$  al numeratore compare la stima di  $V_A$  attraverso il campo elettrico disruptivo  $E_0 = 8 kV/cm$  e la distanza tra gli elettrodi è volutamente in [cm],  $d = 1,8 cm$ .

$$N_{EHD} = \frac{0,046}{27,5 \times 1.225 \times 2 \times 10^{-4} \times 4^2} \simeq 1,7$$

Da questo possiamo dire che, se l'opera propriamente realizzativa sarà rigorosa, ci possiamo aspettare un attuatore discretamente efficiente.

### 4.1.3 Fase realizzativa

Il profilo è stato ricavato da una tavoletta di balsa di spessore 20 mm, pari allo spessore massimo del profilo. Dopo aver verificato il parallelismo tra le facce laterali e l'apertura nominale di 27.5 mm, la prima operazione è stata quella di tracciare l'esatta forma del profilo 0013 su ambo i lati. Grazie alle proprietà della balsa è stato possibile sgrossare il materiale in eccesso tramite un cutter. Per l'opera di finitura superficiale si è fatto ricorso a vari tipi di carta vetrata e ad un piano di riscontro con una squadretta per verificare i vari parallelismi e le perpendicolarità fra le superfici.

Il profilo è stato successivamente forato trasversalmente ( $\phi = 10 mm$ ) in corrispondenza del 30% da b.a., consentendo l'innesto di un tubo in alluminio per il supporto e la rotazione del provino in galleria del vento. All'interno del tubo verrà poi fatto passare il filo di alta tensione che, attraverso la saldatura porterà l'anodo sul dorso, per poi terminare annegato nel legno, in un foro cieco sulla faccia opposta. E' stato inoltre necessario applicare una protezione alla superficie di balsa attraverso un film di vernice siliconica ad alta rigidità dielettrica (90 kV/mm), allo scopo di neutralizzare la porosità del legno e soprattutto, migliorare le caratteristiche di isolamento elettrico.

Per mantenere invariate le misure esterne del profilo, la saldatura è stata alloggiata in un solco laterale prodotto col la fresatrice. Il catodo invece è costituito da un nastro adesivo di alluminio dello spessore di 0,05 mm, accuratamente sagomato. Durante le prove il catodo è stato più

volte sostituito per ricercare la geometria che consentisse una maggiore stabilità della scarica.

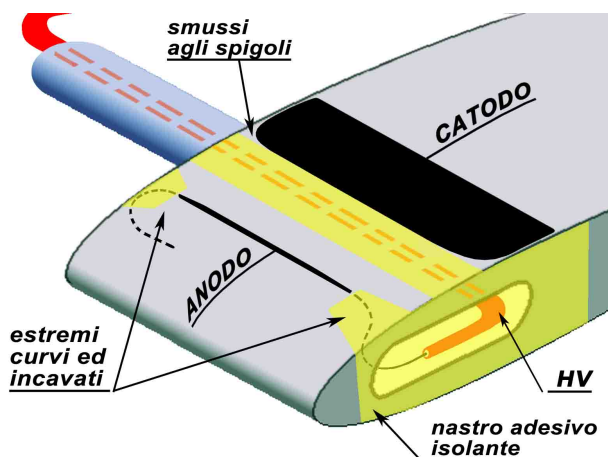


Figura 4.8: Accorgimenti migliorativi per la stabilità di scarica.

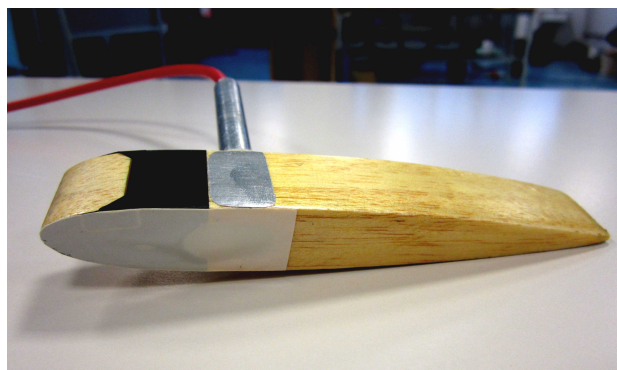


Figura 4.9: Attuatore al plasma montato su NACA 0013.

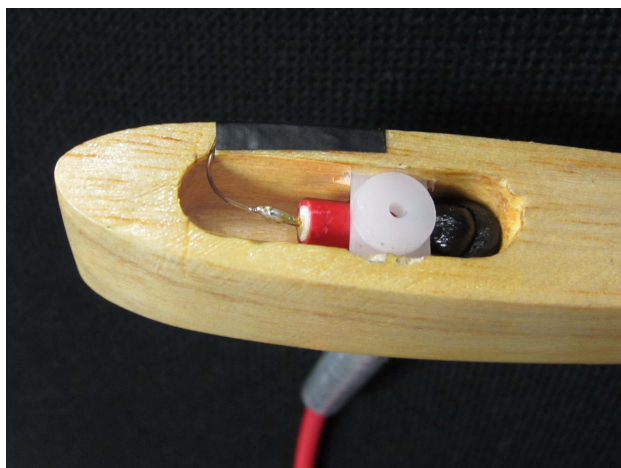


Figura 4.10: Particolare sulla saldatura tra cavo HV e anodo a filo,  $\phi = 0,5\text{ mm}$ .



Figura 4.11: Particolare posteriore del profilo. Il catodo è collegato al tubo che fa da *terra*.

La figura 4.10 mostra il particolare della saldatura posta all'interno del provino, mentre nella figura 4.8 si possono notare gli accorgimenti adottati per ridurre al minimo l'accumulo di carica sugli elettrodi. Inoltre, a causa del basso allungamento, l'effetto tridimensionale sul campo elettrico era tanto accentuato quanto indesiderato, così si è provveduto ad applicare del nastro isolante per schermare le fonti di tridimensionalità.

## 4.2 Pannello posteriore della camera di prova

Il pannello posteriore alla camera di prova corrisponde all'unica via d'accesso della galleria, per la sostituzione dei modelli sperimentali. La versione originale, in dotazione alla galleria è fatta interamente in acciaio. Poiché l'attuatore al plasma lavora a tensioni di decine di kV ed è a stretto contatto con le pareti della camera, è stato necessario riprogettare e sostituire la parte con una versione in plexiglass.

Questo pannello, oltre a permettere l'accesso in galleria, ha la funzione di sostenere il provino attraverso un perno. Quest'ultimo è solidale con una puleggia che, grazie ad un rimando, consente il controllo dell'incidenza per mezzo di una manopola. La realizzazione del pannello ha richiesto l'incollaggio, mezzo di resina epossidica, di tre strati:

**primo** - Strato in plexiglas di spessore 5 mm. La parte è quella rivolta verso l'interno della galleria, che successivamente è stata opacizzata con carta vetrata e annerita con vernice satinata RAL 9005, per ridurre gli effetti di riflessione della luce all'interno della camera di prova. Al centro del rettangolo è praticato un foro di 20 mm per consentire il vincolo del modello.

**secondo** - Strato in alluminio di spessore 1 mm. Questa parte irrobustisce il pannello e consente con precisione il suo appoggio alla galleria. Sullo spigolo di base è avvitata una cerniera che vincola il pannello ma ne consente l'apertura. In corrispondenza del foro è stata praticata una finestra quadrata di 180 mm, per evitare di avere parti metalliche vicine all'attuatore.

**terzo** - Finestra di plexiglas di spessore 10 mm, incollata nell'intaglio del pannello di alluminio. Questa parte aumenta di fatto lo spessore sul quale appoggerà il perno del profilo e irrobustisce la zona in cui manca lo strato metallico.

Avendo scelto di non variare la concezione del meccanismo di controllo sul provino, si è provveduto a sostituire anch'essa, con parti realizzate in nylon pressofuso. I componenti realizzati per il meccanismo sono:

- Una boccola dedicata al foro sul pannello, per regolare l'attrito ed adattare perfettamente l'accoppiamento tra il perno del profilo e la parete di plexiglas.
- Una ruota di 124 mm di diametro e 9 mm di spessore, attraverso la quale veniva rimandata la regolazione di incidenza del modello. La ruota di nylon è collegata attraverso una

cinghia elastica, ad una puleggia più piccola, solidale con la manopola di regolazione posta sul fronte della galleria. La moltiplica è  $M = 2,5$ , ciò significa che per  $10^\circ$  della manopola il profilo ne ruota 4.

- Una staffa che sostiene tutto il meccanismo, sulla quale grava il peso della ruota e in parte il peso del profilo. La staffa garantisce anche la perpendicolarità tra il perno del profilo e la direzione verticale della galleria.

Nelle figure 4.12 e 4.13 è riportato l'insieme del pannello e del meccanismo. Per eventuali chiarimenti consultare le tavole in appendice.

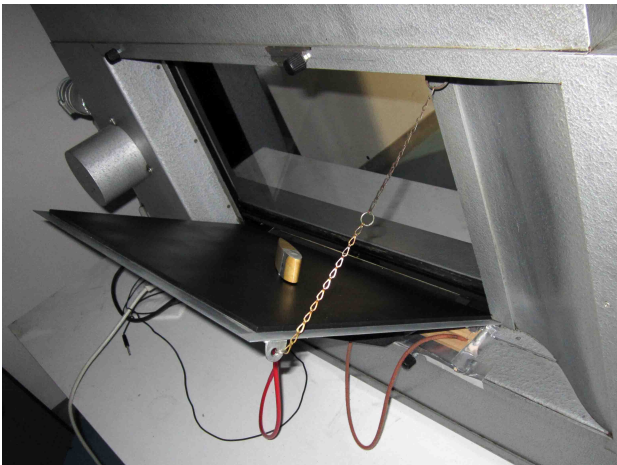


Figura 4.12: Pannello posteriore aperto per consentire il montaggio del modello.

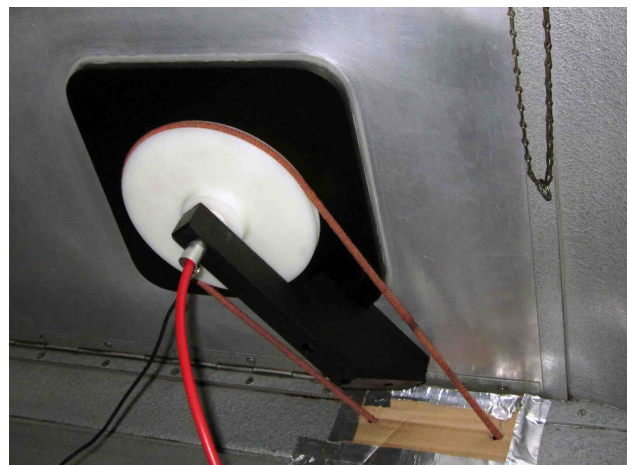


Figura 4.13: Puleggia di regolazione dell'incidenza.

### 4.3 Collimatori di luce

Come già visto nella sezione 3.2, la galleria è dotata di due tubi a fluorescenza esterni alla camera di prova che illuminano verso il centro, dal piano superiore e da quello inferiore. Poiché la galleria è a camera chiusa, la luce è fatta filtrare attraverso due superfici di vetro. La funzione principale dei due fasci luminosi è quella di mettere in risalto i fili di fumo, aumentandone il contrasto di visualizzazione.

In questo senso, si è operata una modifica migliorativa, con l'obiettivo di ridurre lo spessore del

fascio di luce, limitando anche le riflessioni in camera da parte delle pareti.

Sono stati per questo progettati due collimatori che riducono l'angolo di luce che chiamiamo  $\chi$ . Il loro posizionamento è obbligato dalla breve distanza che separa il tubo fluorescente dalla superficie che delimita camera. Il collimatore è composto da due profili a L, affiancati e bloccati fra loro ad una certa distanza "t". Regolando quest'ultima si determina lo spessore di fascio voluto, come mostrato in figura 4.14. Sostanzialmente lo spessore di illuminazione richiesto deve corrispondere alla larghezza della camera di prova e capitare sulla mezzeria. Il dimensionamento di  $t$  richiede i seguenti dati:

- **distanza** fra tubo luminoso e provino,  $H=173$  mm
- **larghezza** camera di prova,  $b=34$  mm
- **altezza** del profilo a L,  $a=10$  mm.

$$\chi = \arctan H/b \simeq 11^\circ \rightarrow t = a \tan(\chi/2), t \simeq 2, mm$$

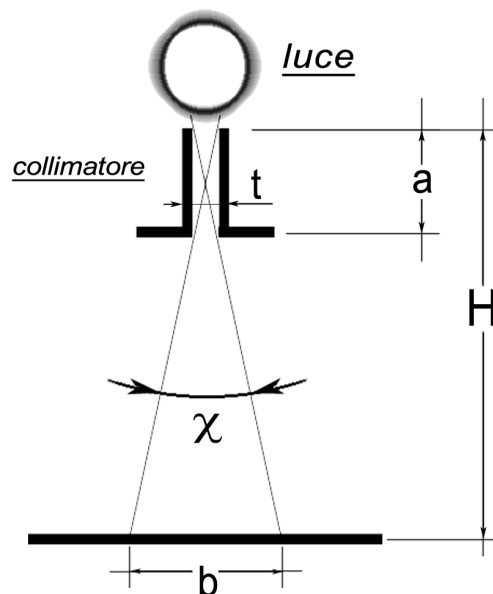


Figura 4.14: Schema del collimatore di luce.

# Capitolo 5

## PROVE

### 5.1 Caratterizzazione dell'attuatore in assenza di vento

Come abbiamo avuto modo di trattare nel capitolo 2, il fenomeno del vento ionico non può essere considerato né costante, né tanto meno lineare, in funzione di  $U_0$ . Gli autori dei principali esperimenti nel settore però, hanno spesso condotto delle prove sull'attuatore in assenza di vento.

Dal punto di vista pratico, sebbene il meccanismo di ionizzazione risulti più imprevedibile, da queste prove al banco si possono comunque trarre delle considerazioni sulla bontà del dispositivo realizzato.

Un eventuale miglioramento sulla stabilità di scarica in aria calma, è certamente di buon auspicio per le successive prove ad  $U_0 > 0$ . La letteratura in campo elettrico, descrive ampiamente il comportamento della scarica nei suoi vari regimi, e dunque le nostre valutazioni visive hanno potuto assumere un determinato significato. Nel nostro caso, questa fase preliminare ha potuto servirsi di una camera oscura, nella quale eravamo facilitati a cogliere la comparsa dei vari tipi di bagliore.

Nella sequenza di figura 5.1, sebbene la qualità non sia ottima, si possono notare tutti i regimi di scarica, dallo *spot* all'arco.

E' interessante confermare come i primi *spots* avvengano maggiormente sull'elettrodo attivo, ovvero l'anodo. Come si evince dalle immagini, le fasi di *streamer* e di *glow* sono abbastanza simili, infatti la regolazione del voltaggio, non permetteva una netta distinzione fra i due regimi. Successivamente, spesso in modo repentino e senza apporto di tensione, avveniva la



5.1. CARATTERIZZAZIONE DELL'ATTUATORE IN ASSENZA DI VENTO

---

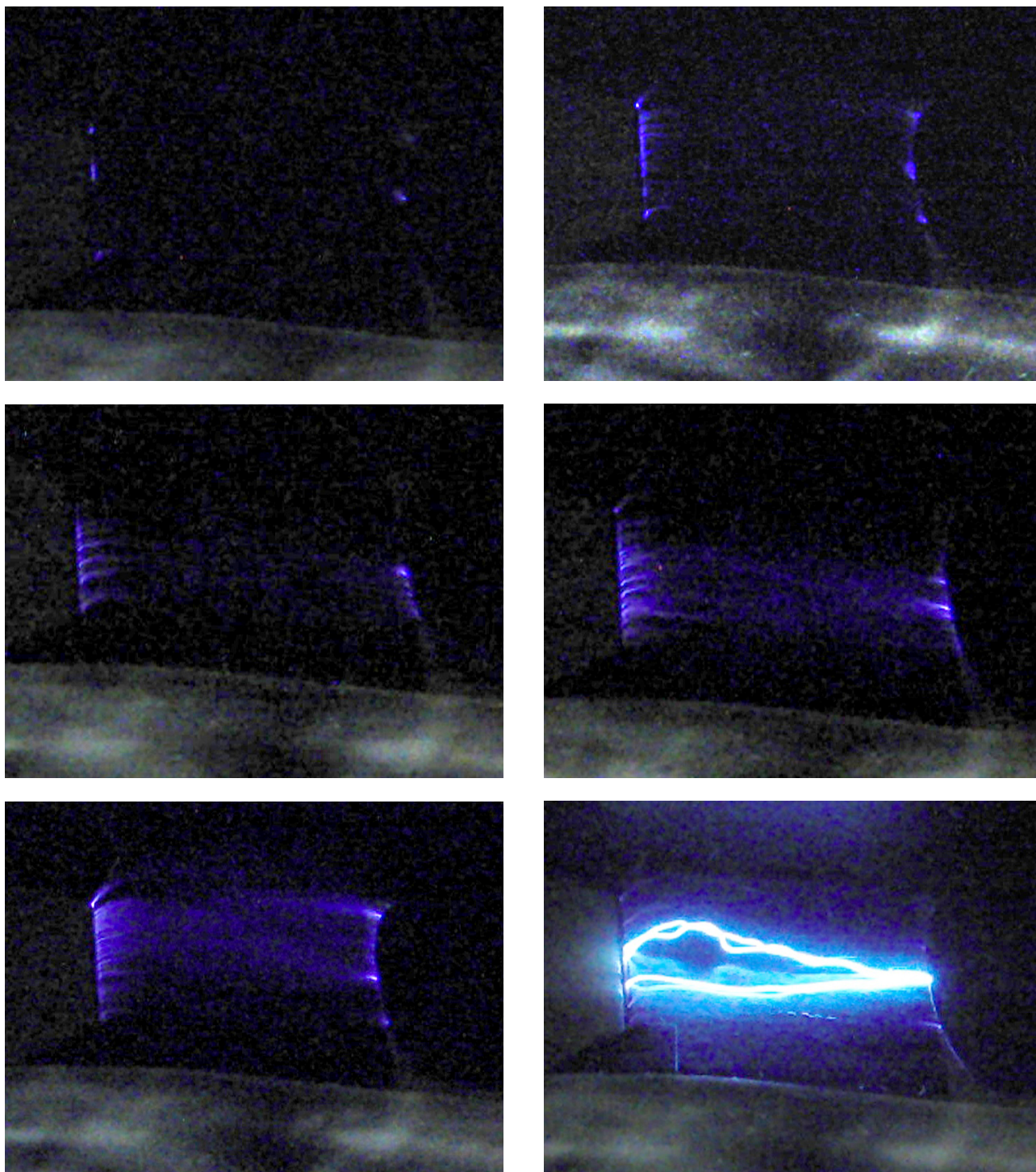


Figura 5.1: Caratterizzazione dell'attuatore al banco,  $V_0 = 0$

transizione ad arco. Per questi motivi, nelle prove in aria calma, l'obiettivo principale non era quello di raggiungere una piena stabilità del regime di *glow*. L'attenzione è stata invece rivolta maggiormente nella verifica di una completa luminescenza su ambo gli elettrodi, in regimi di scarica inferiore.

In un primo momento infatti, la scelta è stata quella di posizionare il catodo, esattamente allineato e parallelo all'anodo. Quest'ultimo aveva invece le estremità incavate nel legno. Ma la corona si stabiliva comunque in prevalenza sugli spigoli degli elettrodi. Successivamente, grazie a queste verifiche, è stato possibile apportare ripetute modifiche sia all'anodo che al catodo, per arrivare alla configurazione ottimale di figura 4.9.

Queste modifiche, come mostrato nel paragrafo 4.1.3, sono state necessarie anche a causa della ridotta apertura del profilo che dunque ha portato ad una spiccata tridimensionalità delle linee di flusso del campo elettrico.

## 5.2 Prova dell'attuatore in galleria

Secondo quanto detto in sezione 2.5, le prove sono avvenute solo se l'umidità relativa segnalata dal nostro igrometro, era inferiore al 55%. La serie di immagini riportate in figura 5.2, si riferisce alle seguenti condizioni di prova:

- $V_0 = 1,35 \text{ m/s}$
- $Re = \frac{\rho V_0 C}{\mu}$ ,  $Re = \frac{1,225 \cdot 1,35 \cdot 0,154}{1,78 \times 10^{-5}} = 14451 \simeq 14500$
- Temperatura,  $T = 21,2^\circ\text{C}$
- Umidità Relativa,  $\phi = 55\%$

Si può notare che la vena fluida, grazie all'attuatore, è in grado di riattaccare fino ad un angolo di incidenza massimo di  $34^\circ$ . Ben  $20^\circ$  oltre lo stallo nominale sia dichiarato che verificato.

Com'è possibile accertare dal filmino, l'azionamento del generatore da *off* a *on*, provoca una deviazione delle linee di corrente in modo pressoché istantaneo. Questo conferma le aspettative introdotte in sezione 1.2, ovvero la possibilità di impiegare gli attuatori al plasma per applicazioni di *flow control* dinamico in *real-time*.



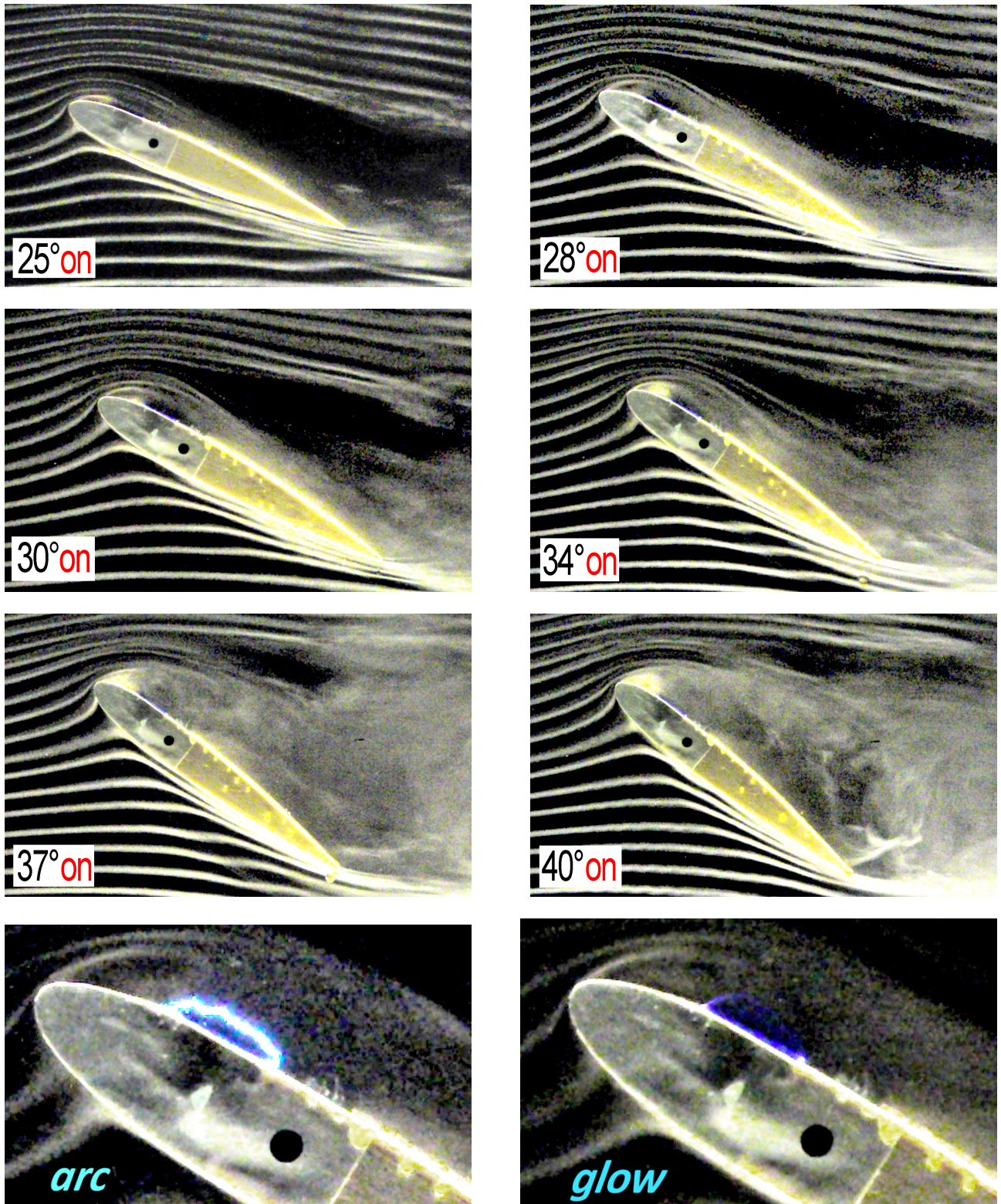


Figura 5.2: Caratterizzazione dell'attuatore sul profilo 0013,  $V_0 = 1,3 \text{ m/s}$

# Capitolo 6

## CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

### 6.1 Conclusioni

Una prima semplice constatazione, riguarda l'effettiva possibilità odierna di allestire un esperimento in laboratorio aerodinamico, per applicazioni al plasma.

Si dispone dunque di una attrezzatura adeguata, che comprende la galleria del vento a camera di prova isolata ed una camera oscura dove compiere le visualizzazioni.

A posteriori, visti i buoni risultati, si può anche dire di aver acquisito un *know-how* adeguato, per il progetto e la realizzazione pratica di un attuatore al plasma.

Certamente la strumentazione della galleria può essere arricchita. Per esempio con una bilancia per misure dirette sulle forze aerodinamiche o magari, realizzare la predisposizione per effettuare misure di pressione con un tubo di pitot.

Il modello strumentato con attuatore al plasma, è stato successivamente provato attraverso l'attrezzatura dedicata. Possiamo anche qui accertare che il sistema è globalmente efficace e che ogni parte della galleria del vento (Cap. 3 e 4) ha funzionato regolarmente come da progetto: dalla puleggia per regolare l'incidenza del profilo ai collimatori di luce, fino ad apprezzare particolari come l'opacizzazione del pannello posteriore della camera di prova che ha consentito di svolgere delle ottime riprese, limitando ogni effetto di riflessione della luce.

Infine, poiché il sistema di prova è risultato efficiente e l'attuatore al plasma è stato rea-

lizzato in modo scrupoloso, le prove hanno consentito di confermare le aspettative riguardo a questo tipo di dispositivi. Il profilo, che di norma presenta uno stallo brusco poco sotto i  $15^\circ$  d'incidenza, ha mostrato grazie dell'attuatore, un riattacco netto del flusso di corrente fino ad un angolo massimo di  $34^\circ$ . Ben  $20^\circ$  oltre l' $\alpha_{STALL}$  nominale del NACA 0013.

Anche la velocità con la quale l'attuatore attiva il controllo, risulta molto elevata; la deflessione delle linee di corrente, avviene quasi istantaneamente con l'azionamento del generatore.

### 6.1.1 Considerazioni ad alta velocità

Tutti gli studi sugli attuatori al plasma concordano sul dire che il vento ionico cresce principalmente con l'aumento della densità di corrente. Negli attuatori a corona, la corrente cresce aumentando il voltaggio, nei DBD,  $I$  cresce sia col voltaggio che con la frequenza della corrente alternata. Moreau, interpolando i suoi dati, propone che  $V_G \sim I^{1/2}$ .

Ma è altrettanto vero che per ottenere il vento ionico, è necessario che la scarica sia diffusa uniformemente all'interno di uno strato di plasma, distribuito nella superficie tra gli elettrodi. E' infatti assodato che, appena il regime passa a filamentare o ad arco, la corrente aumenta d'intensità ma il vento ionico cala.

Per l'aria a pressione atmosferica, possiamo sostanzialmente affermare che queste tecnologie sembrano essere limitate, dall'incapacità della scarica di oltrepassare stabilmente la soglia di 2 mA/m, corrispondenti ad un campo elettrico anch'esso limitato a circa 8 kV/cm.

E così la mobilità ionica, ovvero il cuore della tecnologia, diventa dunque un valore costante che al massimo può raggiungere i  $2 \times 10^{-4} [m^2/V s]$ . Questo, per un campo elettrico di 8kV/cm, corrisponde ad una velocità di deriva ionica  $V_d \simeq 120 m/s$ .

Stiamo affermando che, gli ioni delegati ad incrementare la velocità del flusso nel quale sono immersi, corrono a velocità tutto sommato non abnormi. Quindi se pensiamo alle applicazioni aeronautiche, verrebbe da chiedersi: come può un oggetto che va a 120 m/s pensare di controllarne un altro, che spesso va a velocità anche maggiori?

La risposta è che, non a caso questi attuatori hanno mostrato splendidi risultati, quando impiegati in zone di corrente separata o all'interno di strati limite.

Per questo potremmo azzardarci a dire che, l'efficacia degli attuatori al plasma il ambito aeronautico non può essere trascurata, avendo sempre a che fare con oggetti che presentano uno

strato limite. Quella parte di fluido che tende a velocità uguale a zero, può sempre essere incrementata.

In un recente articolo di Moreau [15] viene affermato che, per utilizzare questi dispositivi in campo aeronautico, sarebbe necessario riuscire a produrre lo strato di plasma nell'interno del primo decimo di millimetro dello strato limite. A fronte di queste considerazioni, la nuova domanda diventa dunque: come possiamo creare un tipo di scarica che concentri il più possibile il campo elettrico, e dunque il plasma, verso la parete?

In parte la tecnica del DBD risponde a questa domanda, infatti i risultati sono di un 30-40% migliori rispetto alla scarica a corona. Ma certamente anche altri aspetti potranno essere migliorati e sviluppati.

Se ipotizzassimo ad esempio di produrre un attuatore al plasma con degli elettrodi di tipo MEMS? Teoricamente potremmo pensare di modificare un flusso ad altissime velocità.

## 6.2 Sviluppi

In riferimento al plasma per il *flow control*, ci sarebbero alcuni aspetti a cui quasi nessuno fa cenno sebbene non siano marginali. Come abbiamo visto, finora questa tecnologia potrebbe essere largamente utile, soprattutto per corpi a bassi numeri di Reynolds. Sebbene il consumo energetico non sia un fattore limitante, ci sarebbero almeno altri tre effetti che per ora sembrano fortemente limitanti:

- ⇒ problemi legati all'influenza di agenti atmosferici sulla scarica,
- ⇒ problemi di sicurezza legati ad avere elettrodi scoperti a decine di kV,
- ⇒ problemi di manutenzione frequente a causa della corrosione accelerata degli elettrodi.

Se si vuole che questa tecnologia possa essere adoperata maggiormente per applicazioni aerodinamiche, è necessario che lo sviluppo vada anche in questa direzione. Successivamente, nel caso in cui questi impedimenti trovassero un'adeguata soluzione, gli attuatori grazie alla loro semplicità ed economicità potrebbero diffondersi molto rapidamente.

Certamente, rimanendo nell'ambito didattico, sarebbe molto interessante poter proseguire la ricerca progettando un attuatore DBD, oppure pensare di realizzare un multi-attuatore, ovvero un congegno formato da più attuatori disposti a cascata e collegati in serie, in modo da deviare la corrente in più punti.

# Elenco delle figure

1.1	Metodi di controllo attivo del flusso. . . . .	6
2.1	Townsend discharge. In (a) si evidenzia la presenza della <i>ionization zone</i> mentre in (b) è schematizzata la moltiplicazione degli elettroni liberi nel processo di ionizzazione . . . . .	13
2.2	Comportamento della temperatura degli elettroni " $T_e$ " e del gas " $T_g$ " per una scarica ad arco, in funzione della pressione [10]. . . . .	15
2.3	Tipo della corona: positiva (a), negativa (b) . . . . .	16
2.4	Configurazioni di attuatori DBD: (a) classica, (a) incapsulata. . . . .	19
2.5	Microscariche di corrente e relativa tensione di alimentazione vs tempo. . . . .	19
2.6	Ciclo della carica sulla superficie dielettrica, per DBD. . . . .	20
2.7	Profili di velocità ricavati con un Pitot, per diversi voltaggi. . . . .	20
2.8	Profilo di velocità a metà <i>gap</i> di scarica, per $U_0 = 14 \text{ m/s}$ . . . . .	22
2.9	Profilo dello strato limite per diverse $i$ di corrente, in assenza di vento. . . . .	22
2.10	Schema della configurazione di setup (a) e relativa curva Densità di corrente vs Campo elettrico (b) . . . . .	23
2.11	Profilo di velocità per vento a 5, 10 e 17 m/s con attuatore acceso e spento. . . . .	24
2.12	Legge di densità di corrente vs campo elettrico, per una scarica a corona. . . . .	25
2.13	Profilo di velocità nello strato limite per diverse densità di $I$ e $U_0 = 5 \text{ m/s}$ . . . . .	25
2.14	Oscillazioni della corrente di scarica a vari regimi . . . . .	27
2.15	Intensità di corrente per un campo dato e $U_0$ crescente. . . . .	28
2.16	<i>Electric wind</i> con anodo fine (a); con catodo fine (b). . . . .	28
3.1	Galleria del vento. . . . .	31
3.2	Dimensioni della camera di prova. . . . .	31
3.3	Schema semplificato della galleria. . . . .	32

3.4	Cannule per l'iniezione di fili di fumo nella corrente d'aria. . . . .	33
3.5	Generatore di fumo a paraffina liquida. . . . .	33
3.6	Schema dell'impianto elettrico della galleria didattica. . . . .	34
4.1	Prestazioni del profilo NACA 0013. . . . .	36
4.2	Caratterizzazione del profilo 0013, $U_0 = 1,3 \text{ m/s}$ . . . . .	38
4.3	Particolare della separazione a $20^\circ$ . . . . .	39
4.4	Schema stilizzato progetto attuatore. . . . .	39
4.5	Profili di velocità di S.L. nell'intorno del punto di separazione "B". . . . .	40
4.6	Tabella riassuntiva sulle stime dei parametri di progetto. . . . .	43
4.7	Schema delle dimensioni del <i>layer</i> di scarica. . . . .	43
4.8	Accorgimenti migliorativi per la stabilità di scarica. . . . .	45
4.9	Attuatore al plasma montato su NACA 0013. . . . .	45
4.10	Particolare sulla saldatura tra cavo HV e anodo a filo, $\phi = 0,5 \text{ mm}$ . . . . .	45
4.11	Particolare posteriore del profilo. Il catodo è collegato al tubo che fa da <i>terra</i> . . . . .	45
4.12	Pannello posteriore aperto per consentire il montaggio del modello. . . . .	47
4.13	Puleggia di regolazione dell'incidenza. . . . .	47
4.14	Schema del collimatore di luce. . . . .	48
5.1	Caratterizzazione dell'attuatore al banco, $V_0 = 0$ . . . . .	50
5.2	Caratterizzazione dell'attuatore sul profilo 0013, $V_0 = 1,3 \text{ m/s}$ . . . . .	52



# Bibliografia

- [1] I. H. Abbott and A. E. von Doenhoff. *Theory of wing sections*. McGraw-Hill Book Company, Inc, 1st edition, 1949.
- [2] G. Artana, J. D’Adamo, L. Léger, E. Moreau, and G. Touchard. Flow control with electrohydrodynamic actuators. *AIAA J.*, 40(9):1773–1779, 2002.
- [3] F. Auteri, A. Baron, M. Belan, G. Campanardi, and M. Quadrio. Experimental assessment of drag reduction by traveling waves in a turbulent pipe flow. *Phys. Fluids*, 22(11):115103/14, 2010.
- [4] K.S. Choi, X. Yang, and B. R. Clayton. Turbulent drag reduction using compliant surfaces. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 453:2229–2240, 1997.
- [5] T.C. Corke, P.O. Bowles, C. He, and E.H. Matlis. Sensing and control of flow separation using plasma actuators. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369(1940):1459–1476, 2011.
- [6] C.L. Enloe, T.E. McLaughlin, R.D. VanDyken, K.D. Kachner, E. J. Jumper, T.C. Corke, M. Post, , and O. Haddad. Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: geometric effects. *AIAA J.*, 42(3):595–604, 2004.
- [7] M. Gad-el Hak. *Flow Control – Passive, Active and Reactive Flow Management*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [8] M. Gad-el Hak. Flow Control: the Future. *J. Aircraft*, 38(3):402–418, 2001.
- [9] M. Goldman, A. Goldman, and R. S. Sigmond. The corona discharge, its properties and specific uses. *Pure & Appl. Chem.*, 57(9):1353–1362, 1985.
- [10] John Ernest Harry. *Introduction to Plasma Technology*. Wiley-VCH, 1st edition, 2010.

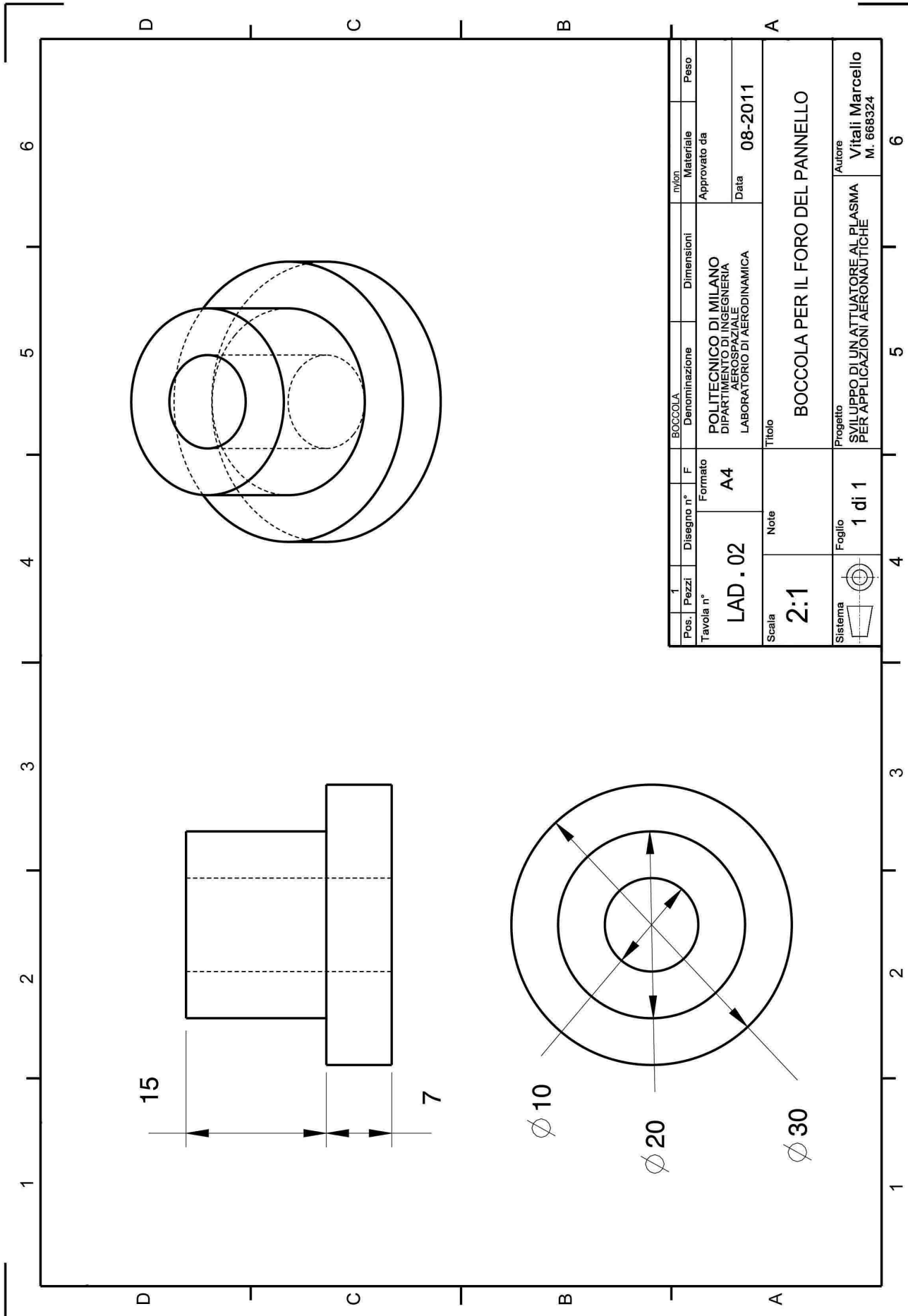
- [11] L. Léger, E. Moreau, G. Artana, and G. Touchard. Influence of a dc corona discharge on the airflow along an inclined flat plate. *J. Electrostatics*, 51–52:300–306, 2001.
- [12] J. Lumley. Drag reduction in two-phase and polymer flows. *Physics of Fluids*, 20(10):64, 1977.
- [13] Andrea Macchi. Scariche di plasma per applicazioni tecnologiche. Technical report, polyLAB, CNR-INFN, Dip. Fisica, 56127 Pisa, 2007.
- [14] R. Mestiri, R. Hadaji, and S. Ben Nasrallah. An experimental study of a plasma actuator in absence of free airflow: Ionic wind velocity profile. *Phys. Plasmas*, 17(18):7, 2006.
- [15] E. Moreau, R. Sosa, and G. Artana. Effect of a dc surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25 m/s. *J. Electrostatics*, 64(3–4):215–225, 2006.
- [16] Eric Moreau. Airflow control by non-thermal plasma actuators. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40:605–636, 2007.
- [17] Y. Peet, Y. Sagaut, and P. Charron. Turbulent Drag Reduction using Sinusoidal Riblets with Triangular Cross-Section. *AIAA Paper 2008-3745*, June 2008.
- [18] M. Quadrio. Drag reduction in turbulent boundary layers by in-plane wall motion. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369(1940):1428–1442, 2011.
- [19] M. Quadrio, P. Ricco, and C. Viotti. Streamwise-traveling waves of spanwise wall velocity for turbulent drag reduction. *J. Fluid Mech.*, 627:161–178, 2009.


# Appendice

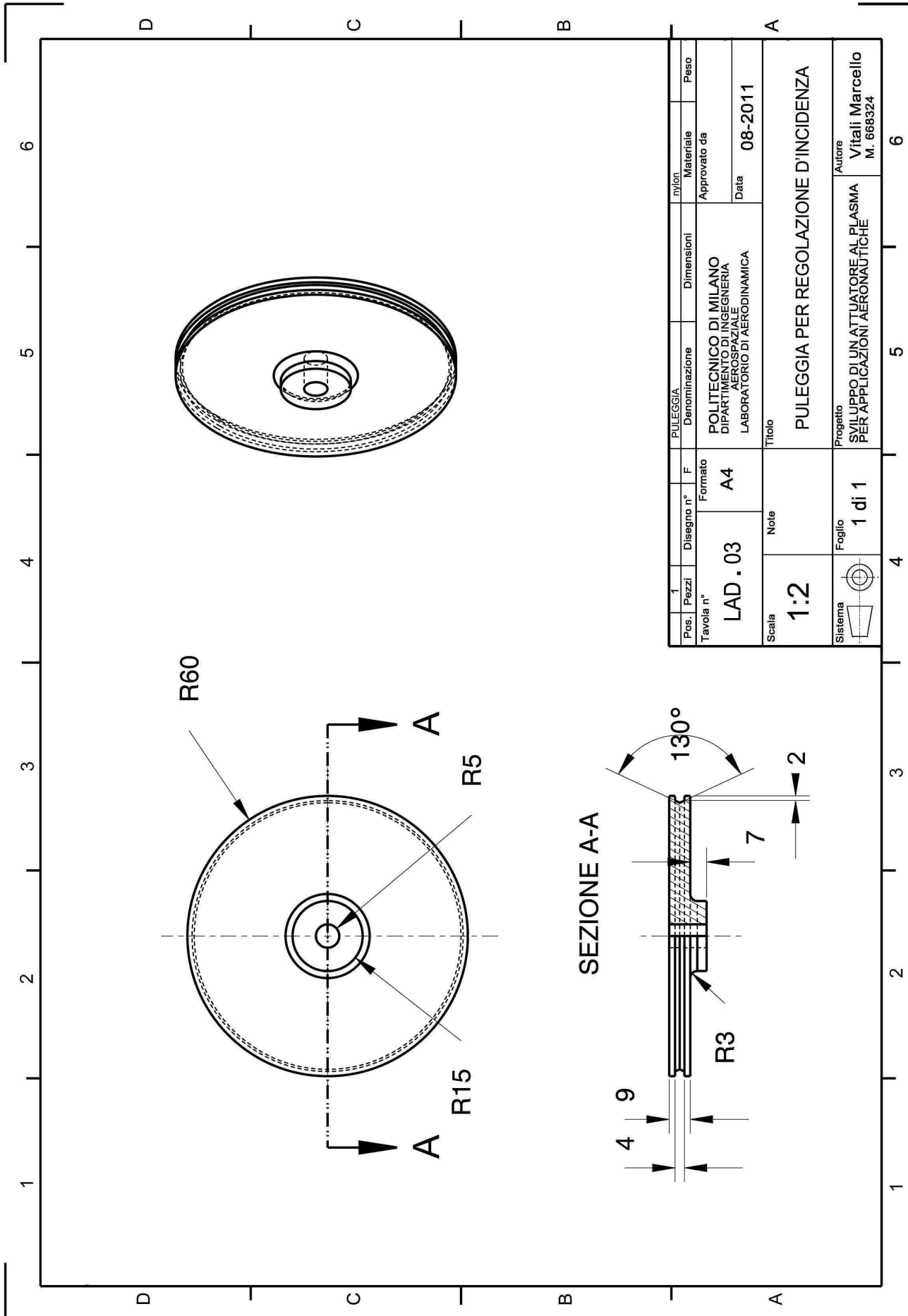
## Tavole progettuali

Sono riportate di seguito le tavole tecniche relative ai componenti più significativi che hanno richiesto un nuovo progetto. In particolare ci riferiamo alle parti del pannello posteriore della camera di prova e al profilo alare NACA 0013. La realizzazione dei pezzi è avvenuta interamente del laboratorio aerodinamico ed è stata curata dall'autore di questa tesi, sotto la supervisione del Co-relatore Prof. Marco Belan.



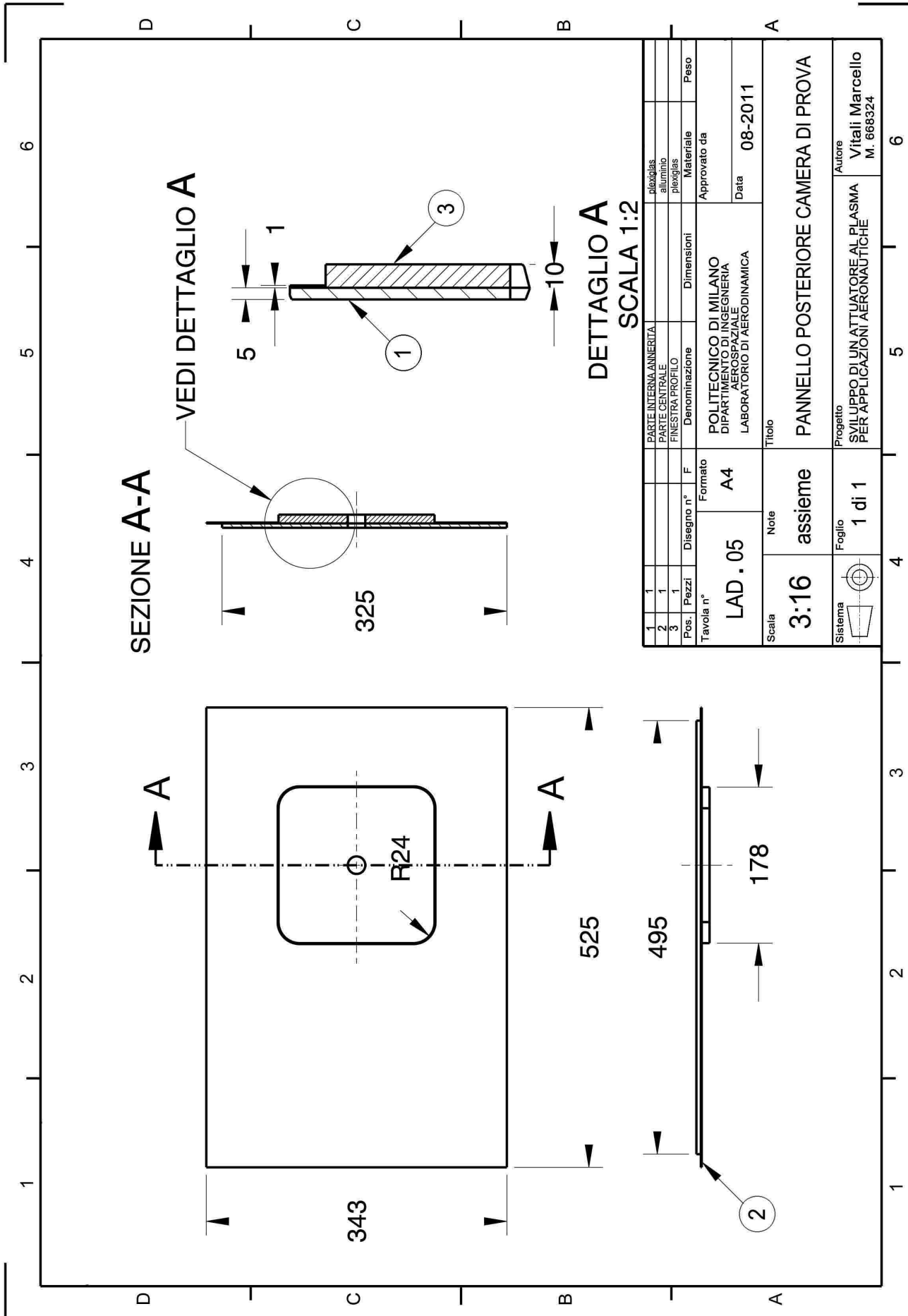


1	Pos.   Pezzi	Disegno n°	F	BOCCOLA	Dimensioni	Materiali	Peso
	Tavola n°	LAD . 02	Formato	Denominazione	Approvato da		
	Scala	2:1	A4	POLITECNICO DI MILANO DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AEROSPAZIALE LABORATORIO DI AERODINAMICA	Data		
	Sistema	1 di 1	Note	BOCCOLA PER IL FORO DEL PANNELLO			
	Foglio	1 di 1	Titolo	BOCCOLA PER IL FORO DEL PANNELLO			
			Progetto	Autore			
			SVILUPPO DI UN ATTUATORE AL PIASMA PER APPLICAZIONI AERONAUTICHE		Vitali Marcello M. 668324		



1	Pos. Pezzi	Disegno n°	F	PUEGGIA	Dimensioni	nylon	Peso
LAD . 03	Tavola n°	Formato	A4	POLITECNICO DI MILANO DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AEROSPAZIALE LABORATORIO DI AERODINAMICA	Approvato da	08-2011	
1:2	Scala	Note		Titolo PUEGGIA PER REGOLAZIONE D'INCIDENZA			
	Sistema	Foglio	1 di 1	Progetto SVILUPPO DI UN ATTUATORE AL PIASMA PER APPLICAZIONI AERONAUTICHE			
				Autore Vitali Marcello M. 668324			





1	1	PARTI INTERNA, ANNERITA	acciaio						
2	1	PARTI CENTRALE	alluminio						
3	1	FINISTRA PROFILO	piegafias						
Pos.   Pezzi		Denominazione	Dimensioni	Materiale		Peso			
Tavola n°		LAD . 05	Formato	POLITECNICO DI MILANO DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AEROSPAZIALE LABORATORIO DI AERODINAMICA		Approvato da			
Scala		3:16	Note	Pannello posteriore camera di prova		Data			
Sistema		1 di 1	Foglio	Pannello posteriore camera di prova		08-2011			
Progetto		Sviluppo di un attuatore al plasma per applicazioni aeronautiche		Autore		Vitali Marcello M. 668324			



