

**POLITECNICO DI MILANO**  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica  
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali



# Ottimizzazione geometrica di attuatori al plasma

Relatore: Prof. Marco Belan

Tesi di Laurea di:  
Antonio Nistoro, matricola 784587  
Federico Messanelli, matricola 783472

Anno Accademico 2013-2014



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>xiv</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Flow control . . . . .	2
1.1.1 Gli obiettivi del controllo . . . . .	2
1.1.2 Il controllo passivo . . . . .	3
1.1.3 Il controllo attivo . . . . .	5
<b>2 Attuatori al Plasma</b>	<b>11</b>
2.1 Caratteristiche degli attuatori a corona . . . . .	11
2.1.1 Principi di funzionamento: la scarica nei gas rarefatti . . . . .	13
2.1.2 Principi di funzionamento: la scarica a pressione atmosferica . . . . .	17
2.1.3 Principi di funzionamento: scarica di superficie . . . . .	21
2.1.4 Modello teorico e numerico . . . . .	28
2.1.5 Studio delle prestazioni al variare dei parametri di funzionamento . . . . .	30
2.1.6 Dipendenza dagli agenti esterni . . . . .	35
2.2 Caratteristiche degli attuatori DBD . . . . .	40
2.2.1 Caratteristiche generali e principi di funzionamento . . . . .	42
2.2.2 Modello teorico e numerico . . . . .	51
2.2.3 Studio delle prestazioni al variare dei parametri di funzionamento elettrici e geometrici . . . . .	55
2.2.4 Dipendenza dagli agenti esterni . . . . .	66
<b>3 Set-up sperimentale</b>	<b>69</b>
3.1 Gallerie del vento . . . . .	69
3.2 Profili . . . . .	73

## INDICE

---

3.3	Attuatori . . . . .	75
3.3.1	Corona . . . . .	75
3.3.2	DBD . . . . .	76
3.3.3	Forma degli elettrodi . . . . .	79
3.4	Strumenti di misura . . . . .	80
3.4.1	Misure elettriche . . . . .	80
3.4.2	Misure aerodinamiche e visualizzazioni . . . . .	82
<b>4</b>	<b>Risultati e discussioni</b>	<b>85</b>
4.1	Prove al banco . . . . .	85
4.2	Visualizzazioni . . . . .	89
4.2.1	Considerazioni preliminari . . . . .	89
4.2.2	Modellazione del fenomeno . . . . .	91
4.2.3	Risultati . . . . .	93
4.3	Pesate . . . . .	101
4.3.1	Descrizione dei principi fisici di funzionamento . . . . .	101
4.3.2	Modellazione del fenomeno . . . . .	103
4.3.3	Procedura operativa . . . . .	103
4.3.4	Risultati . . . . .	107
4.3.5	Analisi delle incertezze . . . . .	122
4.3.6	Confronto con la letteratura . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>125</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>129</b>
<b>A</b>	<b>Applicazioni degli attuatori al plasma</b>	<b>141</b>
A.1	Applicazioni industriali . . . . .	141
A.1.1	Trattamenti superficiali . . . . .	141
A.1.2	Taglio al plasma . . . . .	142
A.1.3	Il plasma come igrometro . . . . .	143
A.2	Applicazioni aerodinamiche . . . . .	143
A.2.1	Controllo della separazione su profili . . . . .	144
A.2.2	Plasma flap . . . . .	147
A.2.3	Controllo su corpi tozzi e riduzione del rumore . . . . .	148
A.2.4	Altre applicazioni . . . . .	150
<b>B</b>	<b>Altri attuatori al plasma</b>	<b>151</b>
<b>C</b>	<b>Disegni e schemi di circuiti</b>	<b>153</b>

<b>D</b>	<b>Curve di portanza</b>	<b>159</b>
D.1	Corona . . . . .	159
D.2	DBD . . . . .	166

## INDICE

---

# Elenco delle figure

1.1	Obiettivi del controllo . . . . .	3
1.2	Strategie di controllo . . . . .	4
1.3	Schiera di generatori di vortici su un'ala . . . . .	6
1.4	Metodologie di controllo attivo . . . . .	7
1.5	Attuatore per controllo con getti sintetici . . . . .	9
2.1	Schema di un tubo di scarica a bassa pressione . . . . .	14
2.2	Curva caratteristica tensione-corrente . . . . .	14
2.3	Esempio di apparato sperimentale per la realizzazione di una scarica a corona . . . . .	17
2.4	Schema di una tipica configurazione <i>point-to-plate</i> . . . . .	18
2.5	Curva $V - I$ per una configurazione <i>needle-to-plate</i> in condizioni di aria secca a pressione ambiente . . . . .	19
2.6	Corrente di scarica in funzione del tempo con densità di corrente media $1.5 \text{ mA/m}$ . . . . .	21
2.7	Sezione di un attuatore a corona <i>wire-to-plate</i> per la generazione di una scarica superficiale . . . . .	21
2.8	Velocità massima in funzione della densità di corrente media . . . . .	24
2.9	Schema dell'azione del vento ionico sul profilo di velocità . . . . .	24
2.10	Profili di velocità e corrente di scarica in assenza di flusso esterno . . . . .	25
2.11	Profili di velocità con attuatore spento e acceso con $U_\infty$ pari a 5, 10 e $17 \text{ m/s}$ . . . . .	26
2.12	Calcolo del numero elettroidrodinamico in funzione di $U_\infty$ . . . . .	26
2.13	Differenza di velocità media nel campo di moto . . . . .	27
2.14	Campo di moto con attuatore off e on ad un'incidenza di $15.8^\circ$ e $Re = 133333$ . . . . .	27
2.15	Visualizzazione di una corrente a $0.35 \text{ m/s}$ su una lastra piana inclinata di $30^\circ$ . . . . .	31
2.16	Configurazioni di attuatori a corona di tipo aeronautico . . . . .	31
2.17	Effetto del diametro degli elettrodi . . . . .	32
2.18	Curve V-I per differenti valori della distanza inter-elettrodo . . . . .	32

## ELENCO DELLE FIGURE

---

2.19	Corrente in funzione della velocità al variare del campo elettrico	33
2.20	Geometria <i>meshata</i> . . . . .	34
2.21	Velocità massima in funzione della corrente al variare delle dimensioni della griglia . . . . .	34
2.22	Riduzione di resistenza su lamina piana . . . . .	35
2.23	Curva V-I per diversi valori della pressione esterna . . . . .	36
2.24	Effetto della temperatura sulla corrente di scarica . . . . .	37
2.25	Curva V-I parametrizzata sull'umidità relativa . . . . .	37
2.26	<i>Onset</i> e <i>disruptive voltage</i> al variare dell'umidità relativa . . .	38
2.27	PMMA . . . . .	39
2.28	Vetro . . . . .	39
2.29	Pyrex . . . . .	40
2.30	Massimi valori di corrente in funzione dell'umidità relativa . .	40
2.31	Influenza del flusso esterno sulla scarica . . . . .	41
2.32	Rappresentazione schematica e fotografia di un DBD . . . . .	43
2.33	Grafico della tensione e della corrente nel tempo . . . . .	44
2.34	Grafico della tensione e della corrente nel tempo . . . . .	45
2.35	Regimi di scarica . . . . .	45
2.36	Differenza di potenziale fra l'elettrodo esposto e il dielettrico .	48
2.37	Rappresentazione schematica del funzionamento del DBD . . .	48
2.38	Distribuzione spaziale e temporale della forza elettroidrodina- mica . . . . .	49
2.39	Andamento temporale della forza elettroidrodinamica . . . . .	50
2.40	Profili di velocità indotta dal DBD . . . . .	51
2.41	Campi di velocità medi nel tempo . . . . .	51
2.42	Evoluzione temporale del campo di velocità totale (U) . . . . .	52
2.43	Modello a elementi concentrati . . . . .	53
2.44	Velocità indotta al variare della distanza fra gli elettrodi . . .	57
2.45	<i>Body force</i> al variare della tensione e della distanza fra gli elettrodi . . . . .	57
2.46	Velocità indotta al variare della lunghezza dell'elettrodo inferiore	58
2.47	Efficienza elettromeccanica . . . . .	58
2.48	Velocità indotta al variare della tensione e dello spessore del dielettrico . . . . .	59
2.49	Valore della spinta a cui avviene la saturazione per diversi tipi di dielettrico . . . . .	59
2.50	Spinta prodotta al variare dello spessore dell'elettrodo esposto	60
2.51	Confronto fra diversi regimi di scarica utilizzando elettrodi piani e cilindrici . . . . .	61
2.52	Velocità indotta misurata al variare della distanza dall'elettro- do per $y = 0.9 \text{ mm}$ . . . . .	62



2.53	Efficienza elettromeccanica al variare del diametro dell'elettrodo e per differenti tensioni . . . . .	62
2.54	Attuatori con elettrodi a serpentina ed elettrodo seghettato . . . . .	63
2.55	Spinta prodotta utilizzando una geometria seghettata . . . . .	63
2.56	Forza prodotta dal DBD al variare di tensione e frequenza e immagini del plasma a saturazione . . . . .	65
2.57	Schema del segnale di alimentazione <i>unsteady</i> . . . . .	65
2.58	Velocità indotta da quattro attuatori in serie e ionizzazione parassita . . . . .	66
2.59	Estensione del plasma e portata massica al variare della pressione . . . . .	67
2.60	Velocità indotta dal DBD al variare della pressione per differenti gas . . . . .	68
2.61	Velocità orizzontale indotta dal DBD al variare della distanza dall'elettrodo, per differenti valori di umidità relativa . . . . .	68
3.1	Galleria del vento per visualizzazioni . . . . .	70
3.2	Schema della galleria del vento per le visualizzazioni . . . . .	71
3.3	Schema della galleria del vento per le pesate . . . . .	72
3.4	Curva di taratura velocità - tensione . . . . .	73
3.5	Profilo NACA0015 per le prove di pesata . . . . .	74
3.6	Scatola e circuito di alimentazione e pilotaggio del DBD . . . . .	78
3.7	Alcuni attuatori utilizzati per le prove di visualizzazione . . . . .	79
3.8	Amperometro . . . . .	81
3.9	Schema della bilancia aerodinamica a tre componenti . . . . .	82
4.1	Tensione e corrente misurate sul DBD . . . . .	87
4.2	Corrente misurata nella scarica a corona . . . . .	87
4.3	Fotografie degli attuatori funzionanti . . . . .	89
4.4	Curve del coefficiente di portanza di un profilo NACA0013 al variare dell'incidenza, per diversi numeri di Reynolds . . . . .	92
4.5	Curve del coefficiente di portanza per un profilo NACA0012 al variare dell'incidenza, per diversi numeri di Reynolds . . . . .	92
4.6	Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore a corona spento e acceso a diverse incidenze . . . . .	94
4.7	Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore a corona spento e acceso a diverse incidenze . . . . .	95
4.8	Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore a corona spento e acceso a diverse incidenze . . . . .	96
4.9	Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore DBD spento e acceso a diverse incidenze . . . . .	98
4.10	Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore DBD spento e acceso a diverse incidenze . . . . .	99

## ELENCO DELLE FIGURE

---

4.11	Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore DBD spento e acceso a diverse incidenze . . . . .	100
4.12	Linee di campo e curve iso-potenziali del campo elettrico per un attuatore a corona dotato di punte . . . . .	102
4.13	Principio di funzionamento del DBD come generatore di vortici	103
4.14	Curve $C_L - \alpha$ per NACA0015 ai diversi numeri di Reynolds .	104
4.15	Profilo e attuatore a corona in galleria del vento . . . . .	105
4.16	Curve di portanza per l'attuatore C7 collocato al 10% della corda e per tre differenti velocità in galleria . . . . .	109
4.17	Curve di portanza per l'attuatore D6 collocato al 10% della corda e per tre differenti velocità in galleria . . . . .	110
4.18	Confronto delle curve di portanza per l'attuatore C5 al 10% e al 40% della corda a $7.5 \text{ m/s}$ . . . . .	111
4.19	Curva di resistenza e polare dell'attuatore C5 per $U = 7.5 \text{ m/s}$ e $x/c = 10\%$ . . . . .	112
4.20	Corona: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare della lunghezza delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 40\%$ ) . . . . .	114
4.21	Corona: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare della lunghezza delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 10\%$ ) . . . . .	114
4.22	DBD: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare della lunghezza delle punte per $Re = 35000$ . . . . .	115
4.23	Corona: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare del numero delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 40\%$ ) . . . . .	117
4.24	Corona: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare del numero delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 10\%$ ) . . . . .	117
4.25	DBD: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare del numero delle punte per $Re = 35000$	118
4.26	Corona: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare della posizione in corda . . . . .	119
4.27	Corona: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare del Reynolds parametrizzato sul numero di punte . . . . .	120
4.28	Corona: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare del Reynolds parametrizzato sulla lunghezza delle punte . . . . .	121
4.29	DBD: $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare del numero di Reynolds per l'attuatore D6 . . . . .	122
5.1	Confronto del $\Delta C_{L_{max\%}}$ al variare del numero di Reynolds tra corona e DBD . . . . .	127
A.1	Andamento della corrente per diversi valori di temperatura e pressione . . . . .	143
A.2	Effetto di un attuatore a corona sul flusso attorno a un profilo NACA 0013 . . . . .	144

A.3	Confronto fra coefficienti di (a) portanza e (b) resistenza su un NACA 0015 al variare del <i>duty cycle</i> per il flusso base, attuazione stazionaria e instazionaria a un'incidenza di $16^\circ$ . . .	146
A.4	Andamento del coefficiente di portanza al variare dell'incidenza su un NACA 0015 nel caso di attuazione spenta, stazionaria e instazionaria . . . . .	146
A.5	Andamento del coefficiente di portanza al variare dell'incidenza su un NACA 0015 nel caso di attuazione DBD al bordo d'uscita . . . . .	147
A.6	Illustrazione della coppia di attuatori usati per il controllo del rollio su un'ala bidimensionale . . . . .	148
A.7	Visualizzazioni a fili di fumo attorno a un cilindro . . . . .	149
A.8	Effetto dell'attuazione (stazionaria e instazionaria) sul SPL ( <i>sound pressure level</i> ), rappresentativo del rumore . . . . .	150
B.1	Schema di funzionamento di un attuatore <i>sparkjet</i> . . . . .	152
B.2	Schema di un attuatore <i>sliding discharge</i> . . . . .	152
C.1	<i>End plate</i> . . . . .	153
C.2	Profilo NACA0015 . . . . .	154
C.3	Perno . . . . .	155
C.4	Circuito di alimentazione dell'attuatore a corona . . . . .	156
C.5	Circuito di alimentazione e pilotaggio del DBD . . . . .	157
C.6	Forma degli elettrodi per le prove di pesata . . . . .	158
D.1	Curve $C_L - \alpha$ con attuatore C1 off e on, $x/c = 10\%$ . . . . .	159
D.2	Curve $C_L - \alpha$ con attuatore C2 off e on . . . . .	160
D.3	Curve $C_L - \alpha$ con attuatore C3 off e on . . . . .	161
D.4	Curve $C_L - \alpha$ con attuatore C4 off e on . . . . .	162
D.5	Curve $C_L - \alpha$ con attuatore C5 off e on . . . . .	163
D.6	Curve $C_L - \alpha$ con attuatore C6 off e on . . . . .	164
D.7	Curve $C_L - \alpha$ con attuatore C7 off e on . . . . .	165
D.8	Curve $C_L - \alpha$ con attuatori DBD off e on al 10% della corda .	166
D.9	Curve $C_L - \alpha$ con attuatori DBD off e on al 10% della corda .	167

## ELENCO DELLE FIGURE

---

# Elenco delle tabelle

2.1	Valori di velocità, potenza elettrica, potenza meccanica ed efficienza al variare del <i>gap</i> tra gli elettrodi per una scarica di volume . . . . .	33
3.1	Caratteristiche geometriche degli attuatori provati . . . . .	80
4.1	Caratteristiche elettriche tipiche degli attuatori provati . . . . .	88
4.2	Valori del $\Delta C_{L_{max}}$ percentuale per gli attuatori a corona . . . . .	108
4.3	Valori del $\Delta C_{L_{max}}$ percentuale per gli attuatori DBD . . . . .	108

## Sommario

Lo scopo di questo lavoro di tesi è la caratterizzazione sperimentale di attuatori al plasma, di tipo corona e DBD (Dielectric Barrier Discharge), ed una valutazione delle loro prestazioni nell'ambito del controllo della separazione su profili aerodinamici ad alto angolo di incidenza. In particolare viene introdotta ed ottimizzata una geometria innovativa a punte triangolari per gli elettrodi. Un'indagine approfondita sull'efficacia di tale configurazione per attuatori a corona, ed in particolare l'ottimizzazione della geometria delle punte, non è mai stata effettuata in maniera dettagliata prima di questo lavoro di tesi. Vengono effettuate delle visualizzazioni a fili di fumo per  $Re \approx 14000$  al fine di caratterizzare qualitativamente il comportamento degli attuatori e la loro efficacia nel posticipare lo stallo. Quindi è svolto uno studio parametrico sulla lunghezza e sul numero delle punte, validato quantitativamente attraverso prove di pesate aerodinamiche in galleria del vento su un profilo NACA0015 per tre numeri di Reynolds ( $Re \approx 35000$ ,  $Re \approx 50000$  e  $Re \approx 70000$ ). I risultati ottenuti indicano una superiorità della geometria innovativa per entrambi i tipi di attuatori rispetto alle configurazioni tradizionali.

**Keywords:** Attuatori al plasma, Corona, DBD, Controllo attivo del flusso, Ritardo dello stallo, Elettrodi a punte.

## Abstract

The aim of this work is to experimentally characterize plasma actuators, both corona and DBD (Dielectric Barrier Discharge) types, in order to evaluate their performance as flow control devices on aerodynamic airfoils at high angles of attack. It is introduced and optimized an innovative serrated geometry for the electrodes. A detailed analysis of the effectiveness of this geometrical configuration for corona plasma actuators, and in particular the optimization of the serrated geometry, has never been performed before this thesis. Smoke visualizations are taken at  $Re \approx 14000$  so that a qualitative investigation of actuators behaviour and their effectiveness in delaying stall is carried on. A parametric study on length and number of electrodes' tips is then performed and quantitatively validated through lift measurements on a NACA0015 airfoil in the wind tunnel for three Reynolds numbers ( $Re \approx 35000$ ,  $Re \approx 50000$  e  $Re \approx 70000$ ). The results indicate that the serrated geometry induces better performances rather than traditional configurations both for corona and DBD.

**Keywords:** Plasma actuators, Corona, DBD, Active flow control, Stall delay, Serrated electrodes.





# Ringraziamenti

Vogliamo ringraziare sentitamente il nostro relatore, Prof. Marco Belan, il cui aiuto e la cui esperienza sono stati fondamentali in questi mesi trascorsi in laboratorio.

Vogliamo inoltre ringraziare l'Ing. Donato Grassi, per la pazienza e l'infinita disponibilità dedicatoci.

Vorremmo quindi ringraziare i compagni di laboratorio, che hanno reso più piacevoli questi mesi di lavoro.

Infine, ringraziamo le nostre famiglie, per il fondamentale supporto mostratoci in questi anni trascorsi all'università.



# Capitolo 1

## Introduzione

Il seguente lavoro di tesi a carattere sperimentale si colloca in una vasta area di ricerca, peculiare dell'industria aeronautica, che prende il nome di *flow control*. Nello specifico, si vuole indagare un particolare ambito di tale area che prende il nome di *Elettroidrodinamica*: tale scienza studia la dinamica dei fluidi caricati elettricamente, e in particolare il moto di particelle o molecole ionizzate e le loro interazioni con campi elettrici e il fluido circostante. L'idea alla base del concetto di *attuatore al plasma* è questa: se si applica una sufficiente differenza di potenziale ai capi di due elettrodi disposti opportunamente e collocati in un fluido, tale fluido viene ionizzato e prende il nome di *plasma*; è quindi possibile sfruttare il plasma e le sue interazioni con il campo elettrico generato fra gli elettrodi per modificare le caratteristiche della corrente, ottenendo degli effetti benefici. Rispetto ai tradizionali metodi di *flow control*, di cui si parlerà brevemente in questo capitolo introduttivo, gli attuatori al plasma presentano numerosi vantaggi: sono completamente elettronici, senza parti in movimento; sono leggeri (caratteristica particolarmente apprezzata in ambito aeronautico) e poco ingombranti, dal momento che possono essere applicati direttamente sulle superfici; hanno un tempo di risposta molto rapido, proprietà che li rende attrattivi per applicazioni instazionarie; sono facilmente simulabili numericamente, e pertanto facilmente inseribili in programmi che risolvono il flusso.

La fisica dei plasmi è stata materia di studio sin dalla fine del XIX secolo, con l'invenzione da parte di William Crookes dell'omonimo tubo (1879), precursore del tubo a raggi catodici e delle lampade al neon. Fu però Irving Langmuir nel 1928 ad introdurre tale termine nel panorama scientifico: in seguito ad uno studio effettuato su gas ionizzati, lo studioso notò infatti una somiglianza tra il trasporto di elettroni, ioni ed impurità all'interno di un fluido elettrificato ed il trasporto di globuli rossi e bianchi nel sangue [1]. E' tuttavia recente l'applicazione dei plasmi nel settore aeronautico, dal momen-

to che risale all'ultimo decennio del XX secolo. L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di proseguire la ricerca nell'ambito degli attuatori al plasma, con l'idea di ottimizzarne la geometria al fine di ottenere prestazioni migliori. In questo capitolo introduttivo viene brevemente accennato il problema del *flow control* e vengono presentate alcune tecnologie utilizzate in tale ambito. Nel Cap. 2 vengono riportate le principali caratteristiche degli attuatori al plasma. Nel Cap. 3 è descritto l'apparato sperimentale utilizzato per questo lavoro di tesi, mentre nel Cap. 4 vengono riportati ed analizzati i risultati ottenuti. Infine, nel Cap. 5 vengono presentate le conclusioni generali del lavoro svolto e vengono proposti alcuni possibili sviluppi futuri.

### 1.1 Flow control

L'ambito di ricerca riguardante il *flow control* ha suscitato, sin dagli albori dell'aeronautica, un profondo interesse nella comunità scientifica. Già nel 1904 Prandtl con il suo articolo *On Fluid Motion with Very Small Friction*, nel quale spiegava la teoria dello strato limite, introdusse dei primi esperimenti di controllo dello strato limite stesso. Uno di questi riguardava la possibilità di utilizzare l'aspirazione dello strato limite sulla parete di un cilindro per ritardarne la separazione.

In generale, si può affermare che il *flow control* ha come obiettivo quello di modificare un campo di moto, al fine di ottenere un effetto desiderato [2].

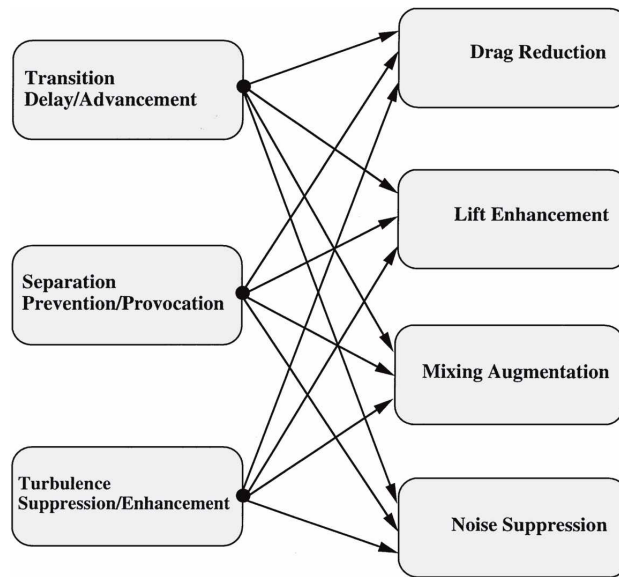
L'attenzione di industria ed università verso questa area di ricerca è giustificata anche da analisi quantitative effettuate sul risparmio (o guadagno) ottenibile: si è stimato, infatti, che un incremento anche solo del 5% del  $C_{L_{max}}$  in decollo permette un aumento del carico pagante fino al 20%; una riduzione della resistenza del 5% invece garantisce un aumento del *payload* fino al 40% [3]. La riduzione della resistenza aerodinamica implica anche una riduzione dei consumi di carburante, un aspetto che in tempi recenti sta acquisendo sempre maggiore importanza. L'analisi, seppur semplificata, lascia facilmente immaginare i vantaggi in termini di guadagno per l'industria aeronautica e quindi l'elevato interesse verso l'ambito del controllo.

Inoltre, numerose regolamentazioni in materia ambientale a livello europeo obbligano il settore aeronautico alla continua ricerca ed innovazione, con lo scopo di ridurre l'inquinamento, di natura atmosferica (e quindi riduzione dei consumi) e acustica (riduzione del rumore e delle vibrazioni).

#### 1.1.1 Gli obiettivi del controllo

Gli obiettivi principali del controllo possono essere molteplici: aumento di portanza, riduzione di resistenza o di rumore ed incremento dei fenome-

ni di mixing (Fig. 1.1). Per raggiungere tali obiettivi si può, per esempio, controllare la transizione tra flusso laminare e turbolento, si può prevenire o provocare la separazione del flusso, oppure controllare il livello di turbolenza, aumentandolo o riducendolo. Allo stato dell'arte attuale, da un punto di vista realizzativo, ottenere un singolo effetto tra quelli elencati è una sfida che non pone grandi problematiche. E' tuttavia non triviale la possibilità di realizzare un unico dispositivo che permetta di ottenere una combinazione dei benefici del controllo precedentemente elencati. Per esempio, i generatori di vortici permettono di ritardare la separazione del flusso su un profilo, e quindi aumentare l'angolo di stallo, ma al prezzo di un aumento della resistenza. Ciò è dovuto al fatto che i diversi fenomeni che stanno alla base delle varie tecniche di controllo possono interagire in maniera molto complicata, con la conseguente necessità da un punto di vista ingegneristico di realizzare dei dispositivi in grado di esercitare un buon compromesso nell'ottenimento degli obiettivi precedentemente elencati.

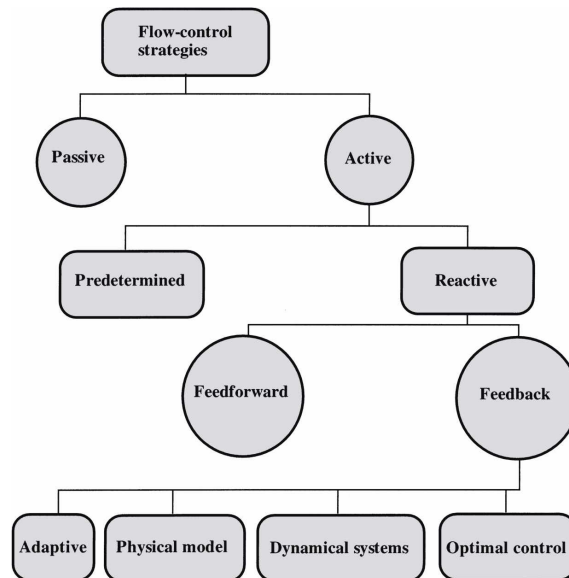


**Figura 1.1:** Obiettivi del controllo. [2]

Per realizzare gli scopi del *flow control* esistono due strategie diverse ma interagenti, schematizzate in Fig. 1.2 e presentate nei paragrafi 1.1.2 e 1.1.3.

### 1.1.2 Il controllo passivo

Uno degli obiettivi primari del controllo passivo è quello della riduzione di resistenza: l'idea che si pone alla base di tale controllo è quella di intervenire sul ciclo di parete con il fine di inibire la nascita delle strutture coerenti e



**Figura 1.2:** Strategie di controllo. [4]

di conseguenza ridurre la turbolenza e lo *skin friction*. Un altro obiettivo perseguibile è quello di ritardare la separazione del flusso su una superficie, in particolare andando ad agire sullo strato limite. E' una tecnica di controllo che non prevede alcun tipo di immissione di energia all'interno del sistema e quindi a basso impatto economico. Nel seguito vengono indicate alcune delle principali tecnologie tutt'oggi impiegate.

### Tecniche di controllo passivo

- *Riblets*: sono scanalature poste sulla parete, allineate con la direzione del flusso medio, che vanno a interagire con il ciclo di parete della turbolenza, stabilizzando le strutture dei QSV (*quasi-streamwise vortices*) e riducendo la produzione di energia cinetica turbolenta; il principio di funzionamento è basato sulla pelle degli squali. La riduzione di resistenza è dell'ordine del 10% e sono state utilizzate con successo in applicazioni aeronautiche e navali (per esempio l'imbarcazione Stars And Stripes vincitrice della Coppa America 1987). *Riblets* sinusoidali sono state recentemente sviluppate e producono risultati ancora migliori, con riduzioni di resistenza fino al 20%. Di contro, gli svantaggi legati all'utilizzo delle *riblets* sono il costo, l'aumento di peso legato alla loro installazione, la loro sensibilità ai raggi ultravioletti e la tendenza a sporcarsi facilmente a causa della polvere: gli ultimi due aspetti ne

degradano le prestazioni e costringono a una manutenzione frequente ([5]).

- **Rugosità artificiale:** l'applicazione di rugosità artificiale su una superficie permette di influenzare, e favorire in particolar modo, la transizione laminare-turbolenta del flusso su tale superficie, in modo da ritardare la separazione dello strato limite.
- *Compliant coatings:* sono particolari rivestimenti adattivi che permettono, in maniera opposta alla rugosità artificiale, di ritardare la transizione laminare-turbolenta e quindi diminuire la resistenza.
- **Polimeri:** l'iniezione di piccole percentuali di polimeri nello strato limite permette di ridurre la resistenza d'attrito.
- **Generatori di vortici:** vengono principalmente utilizzati per ritardare la separazione del flusso e il conseguente stallo aerodinamico su profili alari, superfici di controllo e palette di turbina; sono tipicamente costituiti da palette di forma rettangolare o triangolare (simili a pinne), di altezza pari a circa l'80% di quella dello strato limite e collocati appena dopo il bordo d'attacco (solitamente entro  $1/3$  della corda), con un certo angolo di incidenza rispetto alla direzione del flusso locale. Il principio di funzionamento è molto semplice: all'estremità di queste palette si creano vortici che trasportano aria veloce e ad alto contenuto di energia proveniente dal flusso esterno nello strato limite vicino a parete, contribuendo quindi ad energizzarlo, in modo da aiutarlo a vincere il gradiente di pressione avverso responsabile della separazione. In questo modo la separazione di bordo d'uscita viene ritardata ed eventuali superfici di controllo ivi presenti riescono a mantenere un certo grado di efficacia anche ad incidenze significative. Il principale svantaggio legato a questo tipo di dispositivo è l'aumento di resistenza legato alla produzione dei vortici: essendo un dispositivo di controllo passivo non può venire attivato a piacere, e pertanto agisce anche alle basse incidenze quando non è necessario per prevenire la separazione, andando quindi ad aumentare la resistenza aerodinamica senza nessun effetto benefico.

### 1.1.3 Il controllo attivo

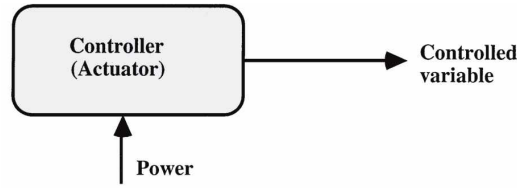
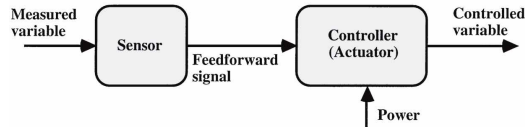
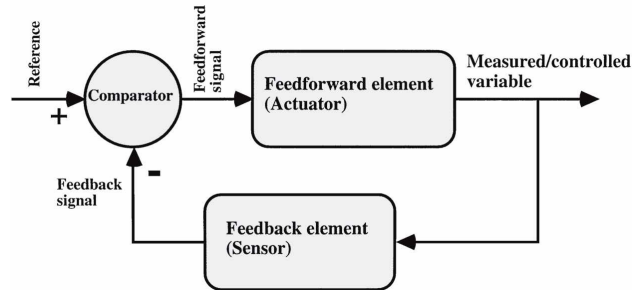
Al contrario del controllo passivo, il controllo attivo prevede l'immissione di energia all'interno del sistema controllato e un anello di controllo. Come mostrato in Fig. 1.2 il controllo attivo si divide in due sottocategorie:



**Figura 1.3:** Schiera di generatori di vortici su un'ala.

- Il *controllo predeterminato* viene effettuato in anello aperto e non prevede l'utilizzo di sensori; per questo non può essere categorizzato come controllo in *feedforward*. L'energia viene quindi fornita al sistema senza la conoscenza effettiva delle proprietà della corrente esterna (Fig. 1.4a).
- Il *controllo reattivo* al contrario, prevede la conoscenza delle variabili esterne per mezzo di sensori, così da adattare il controllo stesso alle esigenze del momento. Può essere realizzato secondo due modalità:
  - nel controllo in *feedforward* la variabile misurata non coincide necessariamente con quella controllata (Fig. 1.4b); un controllo di questo tipo può prevedere ad esempio una misura di pressione o velocità *upstream* che, inserita in una legge di controllo, fornisce la calibrazione necessaria di un attuatore per ottenere una condizione voluta *downstream*.
  - nel controllo in *feedback*, invece, la variabile misurata viene controllata, retroazionata e confrontata con un segnale di riferimento mediante un anello di controllo (Fig. 1.4c); in questo caso l'obiettivo è la definizione di una legge di controllo che legghi in *realtime* lo stato della variabile considerata alla distribuzione di energia da immettere nella corrente. Questo tipo di controllo è particolarmente utile nell'interazione del sistema di controllo con le fluttuazioni della velocità, dove l'incertezza legata alla turbolenza è così elevata che un sistema in anello aperto perderebbe completamente di efficacia. I controlli in *feedback* possono essere di tipo adattivo (il controllo non conosce la fisica del sistema e viene realizzato aggiustando dei parametri), basati sulla fisica del problema, sulla teoria dei sistemi dinamici piuttosto che sulla possibilità di ottenere una legge di controllo ottimale a seconda del problema di *flow control* che ci si trova ad affrontare [6].

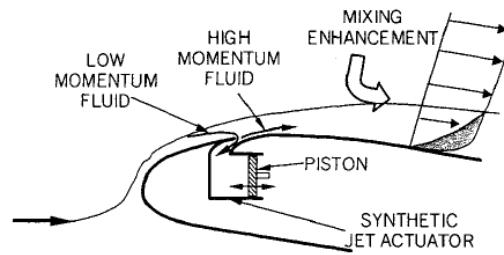


(a) *Predeterminato, anello aperto.*(b) *Reattivo, feedforward, anello aperto.*(c) *Reattivo, feedback, anello chiuso.***Figura 1.4:** Metodologie di controllo attivo. [4]

In tale ambito si localizzano i MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), micro-dispositivi che combinano componenti elettriche e meccaniche, e sono realizzati con le tecniche dei circuiti stampati ([7]): il loro sviluppo negli ultimi decenni in ogni ambito scientifico li ha resi di dimensioni microscopiche (lunghezza compresa fra  $1\ \mu\text{m}$  e  $1\ \text{mm}$ ) e con un basso costo realizzativo. Nell'ambito aerospaziale il loro impiego si presta tra le altre cose ad applicazioni di tipo sensoristico come sensori di sforzo e velocità [8] (e in quest'ultimo caso sono particolarmente adatti a risolvere le piccole scale della turbolenza, in maniera molto meno invasiva della tradizionale tecnica a filo caldo), mentre per il loro utilizzo come sensori di pressione la ricerca è ancora agli albori [9]. E' proprio la possibilità di usarli come sensori montati direttamente a parete, oltre che le loro dimensioni trascurabili, a renderli particolarmente attrattivi per il controllo in *feedback*, in cui è necessaria la conoscenza delle grandezze su cui operare la retroazione.

### Tecniche di controllo attivo

- Soffiamento dello strato limite (*blowing*): consiste nell'iniettare nel flusso, tangenzialmente alla superficie del profilo, una corrente di aria ad alta velocità. Questo aumento di quantità di moto accelera nuovamente le particelle più lente dello strato limite che erano state rallentate dagli effetti viscosi di parete, permettendo così di incrementare l'angolo di incidenza al quale il profilo stalla.
- Aspirazione dello strato limite (*suction*): la tecnica dell'aspirazione dello strato limite prevede l'aspirazione, lungo la direzione di avanzamento del flusso, del fluido più a contatto del corpo, in maniera da sottrarre al flusso lo strato meno energetico e spostare in avanti il punto di separazione. Ciò è ottenuto in maniera continua utilizzando pareti microporose o, in maniera discreta, con fessure disposte trasversalmente al moto del fluido, messe in comunicazione con una pompa che genera la depressione necessaria a consentire l'aspirazione delle particelle più lente dello strato limite. Con questo sistema si possono ottenere coefficienti di portanza massimi dell'ordine di 5 rispetto agli 1.5 di un profilo convenzionale, ma ad oggi non è impiegato su velivoli di produzione a causa della sua complessità operativa.
- Getti sintetici: permettono di energizzare lo strato limite combinando le due tecniche precedentemente descritte, per mezzo di un'azione di aspirazione e soffiamento esercitata da un sistema di pistoni sul dorso di un profilo aerodinamico (Fig. 1.5): l'aspirazione del fluido vicino a parete con bassa quantità di moto fa sì che il fluido a più elevata quantità di moto della parte più esterna dello strato limite si avvicini alla parete stessa, mentre durante il soffiaggio viene reimpressa la stessa quantità di fluido aspirata con maggiore quantità di moto in prossimità della parete. Il comportamento oscillatorio di questo attuatore lo rende particolarmente adatto per aumentare i fenomeni di *mixing* di strati di fluido meno energizzati con quelli più esterni [10].
- EMHD: sono dispositivi che prevedono il passaggio del fluido in un campo elettromagnetico così da generare la forza di Lorentz necessaria a fornire la variazione di quantità di moto cercata.
- MEMS: gli stessi dispositivi descritti in precedenza possono essere utilizzati come attuatori: ad esempio, vibrando ad una opportuna frequenza, possono favorire una rapida transizione laminare-turbolenta, riducendo le dimensioni della bolla di separazione laminare, ritardando la separazione ed anticipando il riattacco del flusso. Tuttavia questa è



**Figura 1.5:** Attuatore per controllo con getti sintetici.

solo una delle possibili applicazioni dei MEMS come micro-attuatori, un elenco esaustivo delle quali sarebbe troppo lungo per questo lavoro di tesi; una trattazione più esauriente è disponibile in [7] e [9].

- Perturbazioni periodiche di parete: oscillazioni della parete sono utilizzate per ridurre la resistenza turbolenta, fino al 40% ([11] e [12]), in flussi costretti da pareti (per esempio flussi in tubi e condotti).



# Capitolo 2

## Attuatori al Plasma

In questo capitolo vengono descritte le principali caratteristiche degli attuatori al plasma, sia di tipo corona (Sez. 2.1), i primi a essere utilizzati in ambito aeronautico, sia DBD (*dielectric barrier discharge*), che oggi sono i più diffusi per applicazioni aerodinamiche (Sez. 2.2). Si rimanda infine alle Appendici A e B per le più importanti applicazioni degli attuatori al plasma e per la descrizione di nuovi tipi di attuatori che potrebbero costituire il futuro in quest'ambito di ricerca.

Entrambi gli attuatori descritti in questo capitolo sfruttano la ionizzazione dell'aria e la conseguente formazione di plasma freddo (*cold o nonthermal plasma*), a seguito dell'applicazione di un forte campo elettrico, per accelerare l'aria e indurre una forza sul fluido, in modo da poterlo controllare nella maniera desiderata. Il plasma viene definito *freddo* se non si trova in equilibrio termodinamico, perché per esempio la temperatura degli ioni e delle molecole neutre è molto inferiore a quella degli elettroni: in particolare nelle applicazioni che studiamo in questo lavoro di tesi, l'energia immessa nel fluido dall'attuatore viene utilizzata per produrre elettroni *energetici* invece che per scaldare il gas circostante, che pertanto rimane a temperature vicine a quelle ambiente.

Pur rientrando entrambi nella definizione di attuatori al plasma, i corona e i DBD presentano numerose differenze, come ad esempio il fatto che vengono alimentati in tensione continua e alternata rispettivamente, le quali vengono descritte e approfondite nel corso del capitolo.

### 2.1 Caratteristiche degli attuatori a corona

In questa sezione vengono descritte le principali caratteristiche di un attuatore a corona e le sue principali applicazioni.

Si prenda in considerazione il caso di due elettrodi piani posti in aria ad

una certa distanza l'uno dall'altro e sollecitati da un gradiente di tensione in corrente continua. Sin quando tale differenza di potenziale si mantiene al di sotto di una certa soglia, non è possibile assistere ad alcun tipo di fenomeno: il fluido è inerte e non si registra passaggio di corrente. Tuttavia, dal momento in cui il valore di rigidità dielettrica dell'aria viene superato, gli atomi e le molecole presenti nel fluido subiscono un processo di ionizzazione, rendendo l'aria elettricamente conduttiva. La generazione di un arco elettrico permette dunque la chiusura del circuito.

L'interesse verso questo tipo di tecnologia applicabile in ambito aeronautico si concentra però verso regimi di campo elettrico prossimi a quello della rigidità dielettrica dell'aria, prima della formazione dell'arco elettrico. E' possibile infatti rilevare un regime in cui vi è comunque un passaggio di corrente di intensità decisamente inferiore (dell'ordine dei  $mA$  o dei  $\mu A$ ) rispetto a quella caratteristica dell'arco, con il vantaggio però di poter sfruttare in maniera continuativa il vento ionico che si viene ad instaurare tra i due elettrodi. Si parla quindi di *non-thermal plasma discharge* a pressione ambiente (in quanto il plasma non è in equilibrio termodinamico) o parimenti di effetto corona. L'effetto corona è un fenomeno conosciuto da secoli. Prima che Benjamin Franklin nel 1749 ne studiasse la natura elettrica, tale scarica era nota soprattutto in ambito marittimo con il nome di *Fuoco di Sant'Elmo*. Tale fenomeno si manifesta infatti durante i temporali in seguito alla ionizzazione dell'aria dovuta all'elevata differenza di potenziale atmosferico, combinata all'effetto punta. E' infatti osservabile in corrispondenza di strutture molto alte e appuntite, come erano gli alberi delle navi, sotto forma di un *fuoco* dalle sembianze bluastre e brillanti.

Lo sviluppo degli attuatori a corona ha subito un'importante impennata nella seconda metà del secolo scorso soprattutto in ambito industriale. L'impiego di tale tecnologia si attesta infatti in diversi ambiti quali i trattamenti superficiali, tagli al plasma, depurazione di aria, acqua e alimenti.

Il primo articolo riguardante la possibilità di influenzare lo strato limite attraverso l'applicazione di un campo elettrico si ritrova in letteratura attraverso il lavoro di Velkoff e Ketcham pubblicato nel 1968 [13]. L'effettivo interesse però verso gli attuatori a corona in ambito aeronautico ed in ottica di *flow control* è cresciuto all'inizio degli anni 90 con la nascita di gruppi di ricerca che hanno operato sia in ambito sperimentale (ed in particolare un grosso contributo è stato dato dai lavori del gruppo di E. Moreau presso l'Università di Poitiers e di quello facente capo a G. Artana presso l'Università di Buenos Aires) che teorico (con i lavori di Colver ed El-Khabiry presso l'Università dell'Iowa).

Nella sezione seguente (2.1.1) viene descritto il meccanismo fisico alla base della formazione della scarica a corona e del suo *autosostentamento* in gas

rarefatti. Quindi il discorso viene esteso alla scarica di volume in gas a pressione atmosferica (Sez. 2.1.2) e alla scarica di superficie (Sez. 2.1.3), ossia quella generata dagli attuatori al plasma utilizzati in ambito aeronautico. Successivamente, nella sezione 2.1.4, vengono illustrati i principali modelli teorici sui quali si fonda tale funzionamento. Nella sezione 2.1.5 vengono presentati dei lavori in cui si mostra come parametri sia geometrici che elettrici influenzino le prestazioni dell'attuatore. In 2.1.6 viene mostrata l'azione che gli agenti esterni esercitano sul corretto funzionamento dell'attuatore.

### 2.1.1 Principi di funzionamento: la scarica nei gas rarefatti

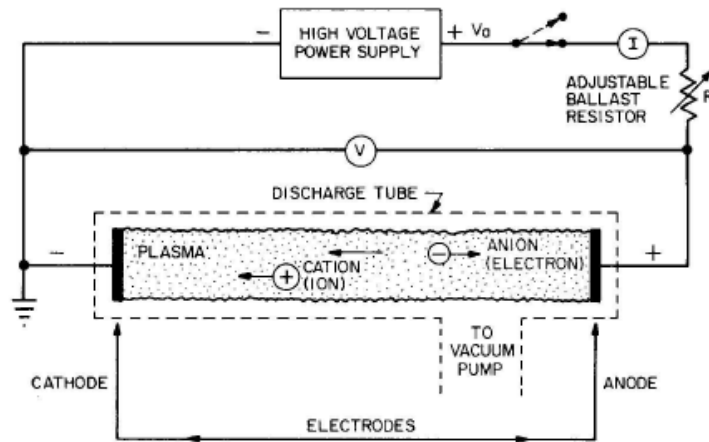
Nella sperimentazione primordiale sui gas ionizzati, un ruolo fondamentale nello studio e nella conoscenza del comportamento delle scariche è stato esercitato dagli esperimenti effettuati nei tubi di scarica a bassa pressione. Pur essendo il comportamento della scarica in questione differente da quello degli attuatori a corona, in quanto la scarica è di tipo volumetrico e avviene fra due elettrodi piani separati da aria a pressioni di pochi pascal, tuttavia viene citato in quanto permette una comprensione più immediata del fenomeno. Con scarica volumetrica intendiamo la scarica tridimensionale che avviene fra due elettrodi disposti nello spazio; più interessante ai fini del nostro lavoro di tesi è la scarica superficiale, propria degli attuatori a corona, che ha luogo quando gli elettrodi sono appoggiati sopra una superficie dielettrica. In Fig. 2.1 è rappresentato un caratteristico apparato sperimentale atto alla misurazione della curva caratteristica tensione-corrente  $V - I$ , come quella mostrata in Fig. 2.2. La tensione in continua viene fornita da un generatore di alta tensione a due elettrodi posti all'interno del tubo di scarica la cui geometria può essere considerata planare, con anodo e catodo posti ad una distanza  $d$ .

Come si può notare, l'andamento della curva è fortemente non lineare, con regimi di scarica molto differenti tra loro. Nei seguenti paragrafi vengono illustrate le diverse modalità con cui si manifesta la scarica ed i corrispondenti regimi [14].

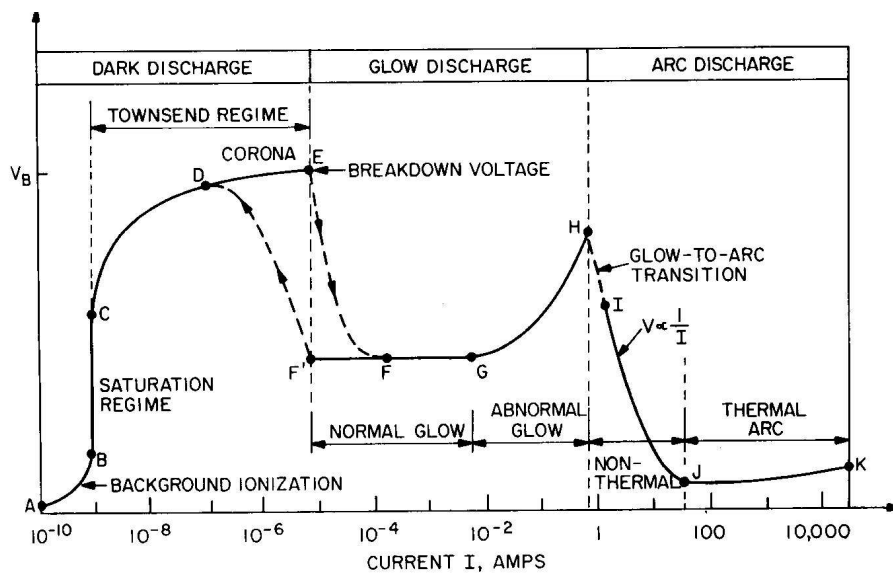
#### A-E Dark Discharge

Nel range di correnti di *dark discharge*, ad eccezione della corona e degli *sparks*, attraverso l'occhio umano non è possibile assistere ad alcun tipo di fenomeno.

- A-B: per valori di tensione molto bassi, il passaggio di corrente è permesso dalla cosiddetta *background ionization*, ovvero un regime di bassa



**Figura 2.1:** Schema di un tubo di scarica a bassa pressione per la misura della caratteristica  $V - I$ . [14]



**Figura 2.2:** Curva caratteristica tensione-corrente. [14]

ionizzazione del gas causato da raggi cosmici ed altre fonti di ionizzazione.

- B-C: il campo elettrico generatosi ha quindi la capacità di portare fuori dal fluido ionizzato gli ioni e gli elettroni liberi, ma non è ancora sufficientemente intenso da permettere la generazione di nuove specie elettroniche nel volume. Si parla di *regime di saturazione*: esiste un



valore di corrente costante tale per cui la tensione (e di conseguenza il campo elettrico) cresce fino a che non si è in grado di produrre nuova ionizzazione.

- C-E: è il cosiddetto *regime di Townsend*. In questo range di tensioni il campo elettrico assume un'intensità tale da riuscire a ionizzare parte del gas presente nel volume di scarica e la curva assume una dipendenza della corrente dalla tensione esponenziale. Ioni ed elettroni, sottoposti quindi al campo elettrico (che sarà tanto maggiore localmente quanto l'elettrodo di alta tensione avrà una forma appuntita), vengono attratti verso l'elettrodo di segno opposto: il loro movimento nel volume di scarica origina degli urti con le molecole del fluido; l'elevata energia di tali urti libera altri ioni ed elettroni, in un meccanismo di autosostentamento della scarica a corona definito *a valanga*, il cui funzionamento assume diversi connotati a seconda della polarità dell'elettrodo di alta tensione.



In Eq. (2.1) è brevemente mostrato il meccanismo di collisione tra una particella neutra  $A$  ed un elettrone  $e^-$ , il cui risultato fornisce la ionizzazione del gas e la conseguente moltiplicazione degli elettroni.

Se l'energia degli urti non è sufficiente al sostentamento della scarica (ovvero se il campo elettrico viene ridotto), tale meccanismo cessa.

Possono inoltre instaurarsi degli effetti secondari dovuti all'impatto degli elettroni o dei fotoni in movimento nel volume di scarica contro la superficie del catodo, causando l'emissione di elettroni secondari.

Una volta raggiunto il valore di tensione  $V_B$  si ha il cosiddetto *breakdown elettrico*: il valore di rigidità dielettrica dell'aria viene superato, rendendo il fluido conduttivo.

### E-H Glow Discharge

Superata la soglia di *breakdown* interviene un effetto di accumulo di carica spaziale che porta ad una autoregolazione della corrente in uno stato stazionario. Nel caso del tubo a bassa pressione ciò che accade è che la scarica, da oscura, assume un caratteristico bagliore: è il regime di *glow discharge*.

- F-G: dopo una transizione discontinua tra il punto E ed F di Fig. 2.2, si entra nel regime di *normal glow discharge* (NGD). La tensione è indipendente dalla corrente per diversi ordini di grandezza. Questo è

dovuto al fatto che inizialmente solo un'area limitata del catodo è interessata dal passaggio di corrente. Con l'aumento della corrente stessa però, l'area del catodo viene impiegata completamente, conducendo al punto G.

- G-H: in questo tratto della curva V - I si ha il regime di *abnormal glow* in cui la tensione è una funzione crescente della corrente.

Nel regime di *glow discharge* la regione più luminosa è generalmente quella ai margini del catodo. Gli elettroni in prossimità del catodo, in seguito alle collisioni e alla conseguente eccitazione degli atomi nel gas, perdono energia, con relativa emissione di radiazione luminosa violacea. Il rallentamento degli elettroni però porta, in prossimità del catodo, ad un accumulo di carica negativa che li rallenta ulteriormente: tale zona è denominata *negative glow*.

Gli elettroni nella zona di *negative glow* hanno perso quasi totalmente la propria energia. Attratti dall'anodo, devono riaccelerare lungo una distanza sufficiente affinché siano di nuovo in grado di ionizzare o eccitare gli atomi del gas. Questa è una spiegazione qualitativa del motivo per il quale si osserva lo "spazio oscuro di Faraday", ovvero una mancanza di luminosità nella zona in prossimità del catodo [15].

### H-K Arc Discharge

Con l'aumentare della corrente il regime *glow* va incontro ad una transizione all'arco elettrico, caratterizzato da elevata luminosità e valori di corrente che variano tra 1A e  $10^4$ A.

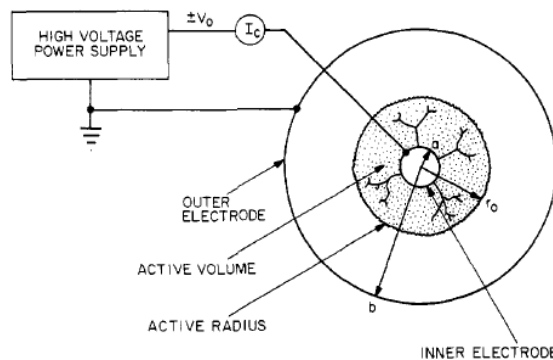
- I - J: è il regime di arco *non-termico*, in cui vi è un'anomalia nel comportamento della resistenza; infatti si ha una riduzione della tensione con l'aumentare della corrente. Il plasma della scarica inoltre non è in equilibrio termodinamico.
- J - K: in questo tratto, la tensione assume nuovamente un andamento crescente con la corrente, il plasma è in equilibrio termodinamico e perciò si parla di regime di arco *termico*.

I regimi di scarica appena presentati sono caratteristici di una scarica in aria a bassa pressione. Come verrà mostrato in 2.1.5 e 2.1.6, i parametri geometrici e gli agenti esterni che influenzano la scarica sono molteplici; la pressione è uno di questi: operando a pressioni prossime a quella ambientale si riscontra ad esempio che i valori di tensione di *breakdown* risultano più elevati.

## 2.1.2 Principi di funzionamento: la scarica a pressione atmosferica

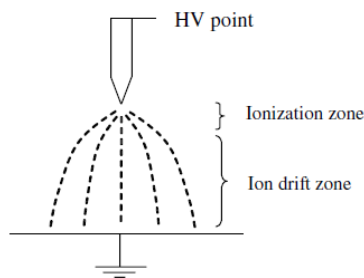
### Le scariche coronali

Il regime che più interessa in ambito aeronautico, in particolare per il controllo del flusso a parete, è quello della scarica a corona. Secondo la definizione di Loeb: “la corona è un fenomeno caratteristico del regime di scarica scura di Townsend che si manifesta in zone ad elevato campo elettrico in prossimità di oggetti acuminati, spigoli o fili in gas stressati elettricamente, immediatamente prima del raggiungimento del breakdown elettrico” [16]. Un esempio di schema con il quale è possibile riprodurre una scarica coronale è mostrato in Fig. 2.3. Affinché la scarica a corona possa avere luogo, il campo elettrico deve avere una divergenza alla parete dell’elettrodo attivo superiore a una certa soglia; ciò in particolare dipende dalla geometria degli elettrodi.



**Figura 2.3:** Esempio di apparato sperimentale per la realizzazione di una scarica a corona. [14]

Una configurazione tipicamente utilizzata per generare una scarica volumetrica a corona in aria a pressione atmosferica è quella *point-to-plate* di Fig. 2.4, chiamata anche *pin-to-plate* o *needle-to-plate*. In una configurazione di questo tipo il *breakdown* elettrico avviene localmente, in prossimità dell’elettrodo di forma appuntita ad alta tensione (HV), con una distribuzione decrescente del campo elettrico con il raggio, che raggiunge il suo minimo valore in corrispondenza dell’elettrodo *messo a terra* (o a potenziale negativo). La ionizzazione primaria avviene quindi in prossimità dell’elettrodo HV, delimitando così una *regione attiva*, luminosa e quindi classificabile come *glow discharge*; è successivamente individuabile una *drift region* (regione di deriva) nella quale le particelle cariche elettricamente vengono attratte dall’elettrodo di carica opposta sotto l’azione delle forze coulombiane.



**Figura 2.4:** Schema di una tipica configurazione *point-to-plate*. [17]

La scarica a corona può manifestarsi sotto forma di corona *unipolare* o *bipolare*, con la possibilità che entrambi i fenomeni vengano a coesistere.

### Corona unipolare

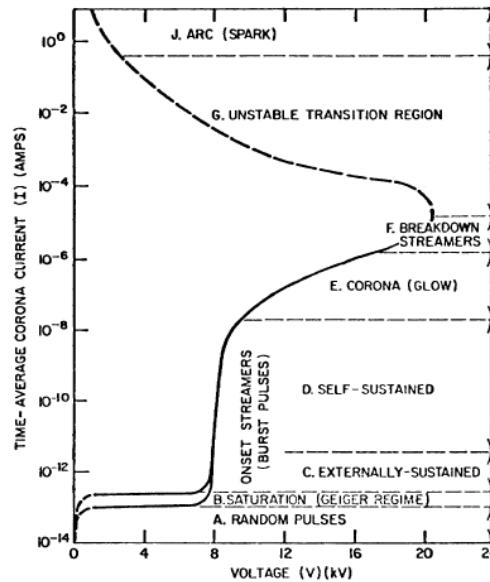
A seconda della polarità della tensione fornita dal generatore, è possibile effettuare una ulteriore distinzione: se il campo elettrico a forte intensità è applicato all'anodo si avrà *corona positiva*, nel caso contrario *corona negativa*. Dal punto di vista degli attuatori a corona di tipo aeronautico risultano di maggiore interesse applicativo le corone positive. Il motivo è molto semplice: a seconda del tipo di polarità utilizzata si avrà una maggiore produzione di ioni piuttosto che di elettroni; poiché la massa degli elettroni è trascurabile rispetto a quella degli ioni, la più elevata produzione di ioni nella corona positiva garantisce un vento ionico di maggiore entità nella deriva dall'anodo al catodo. La configurazione tipica di una scarica unipolare è mostrata in Fig. 2.4.

- *corona positiva*: la configurazione tipica per la generazione di una scarica stabile a corona positiva è caratterizzata da una geometria di tipo asimmetrico, in generale da un anodo dal basso raggio di curvatura al quale applicare la tensione HV e da un catodo di dimensioni maggiori, messo a terra o a potenziale negativo<sup>1</sup>. E' appurato ormai che fornire una leggera tensione negativa al catodo permette di ridurre i disturbi legati alla messa a terra.

Il comportamento di una scarica a corona positiva in aria secca e pressione ambiente per una configurazione di tipo *needle-to-plate* è illustrato in Fig. 2.5; questa è una scarica di tipo volumetrico, mentre quelle di interesse aeronautico sono scariche superficiali: l'introduzione

<sup>1</sup>Ai fini dell'ottenimento della scarica, ciò che interessa è la differenza di potenziale degli elettrodi. La scarica che si realizza è pressoché la stessa a prescindere che si abbia un elettrodo a  $+20\text{ kV}$  ed uno a terra, piuttosto che l'anodo a  $+10\text{ kV}$  ed il catodo a  $-10\text{ kV}$ .

di un dielettrico sopra il quale avviene la scarica ne modifica leggermente la morfologia, senza però inficiare la validità generale di queste osservazioni. Ai valori più bassi della corrente è associata la *background ionization* provocata in gran parte da raggi cosmici (regione A). All'aumentare della tensione si raggiunge un regime di saturazione al quale corrisponde una corrente diversa a seconda del rateo con il quale avviene la generazione della carica (Regime di Geiger, B). A tensioni più elevate la ionizzazione in prossimità dell'anodo fa sì che si abbiano ioni ed elettroni spaiati che, in seguito alle forze coulombiane, si respingono tra di loro, venendo attratti da catodo ed anodo rispettivamente. Il meccanismo di Townsend, descritto precedentemente e corrispondente in questo caso alla regione C, si realizza attraverso tre meccanismi:



**Figura 2.5:** Curva  $I-V$  per una configurazione *needle-to-plate* in condizioni di aria secca a pressione ambiente. [18]

- *collisioni  $e^-$* : si consideri la deriva di un elettrone  $e^-$  verso l'anodo. Se il campo elettrico è elevato abbastanza da far sì che l'elettrone abbia un'energia cinetica tale da superare quella di ionizzazione del gas, è possibile che si generi una nuova coppia ione-elettrone, con l'innesco del meccanismo a *valanga*.
- *collisioni  $A^+$* : è ipotizzabile tuttavia che anche gli ioni  $A^+$ , accelerati in seguito alla repulsione dell'anodo, possano scontrarsi con molecole nel gas e generare altre coppie spaiate ione-elettrone.

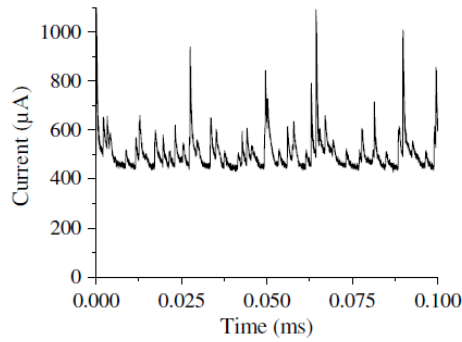
- *sputtering*: è il fenomeno per il quale anche il catodo produce degli elettroni. Gli anioni attratti dalla polarità negativa del catodo, impattandoci, liberano infatti ulteriori elettroni e producono radiazione luminosa [19].

Nel caso di polarità positiva la moltiplicazione elettronica si manifesta attraverso pulsazioni irregolari di corrente definite come *onset streamers*; tuttavia, al crescere della tensione, tali pulsazioni si auto-sostengono (la scarica non dipende più da fonti di ionizzazione esterna, regione D) sino a condurre alla formazione della scarica di tipo *glow* sulla punta dell'anodo corrispondente alla regione E. A tensioni più elevate vi è la comparsa di *breakdown streamers* i quali, risultando più intensi degli *onset streamers*, in seguito all'aumento locale del campo elettrico si estendono tramite canali preferenziali attraverso l'intero spazio interposto tra gli elettrodi (regione F). Il raggiungimento del valore massimo di tensione corrisponde ad una ionizzazione dell'intero *gap*: tuttavia questa è una condizione instabile che conduce alla regione G caratterizzata da un andamento negativo della resistenza e dalla presenza di una scarica distruttiva corrispondente all'arco elettrico [18].

- *corona negativa*: in questo caso il processo di ionizzazione avviene al catodo, dove è applicata una tensione HV negativa, mentre l'anodo è messo a terra. Il processo di formazione e sostentamento della corona negativa è tuttavia più complesso di quello della corona positiva. Gli elettroni primari vengono formati in prossimità della punta del catodo e possiedono un'energia cinetica inferiore, spesso non sufficiente a superare quella di ionizzazione delle molecole del gas [20]. Inoltre, gli elettroni, in seguito alla repulsione del catodo, tendono a sfuggire al volume di scarica, legandosi con molecole elettronegative (vapore acqueo ed ossigeno), producendo ioni negativi che vengono attratti dall'anodo, chiudendo così il circuito. Aumentando progressivamente l'intensità del campo elettrico è possibile instaurare un regime di scarica periodica noto come *Trichel pulse*, salvo poi ritornare per tensioni più elevate ad un classico regime di *glow*, con uno spessore del plasma sensibilmente più elevato che però riduce il vento ionico in prossimità della parete, con evidenti ripercussioni sugli effetti che invece vengono richiesti nell'ambito aeronautico. Questo tipo di corona, infatti, viene impiegato in particolare per trattamenti di tipo chimico.

### Streamers

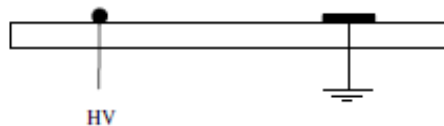
Gli *streamers* sono delle scariche che si manifestano sotto forma di filamento di durata transitoria. Essi creano un canale preferenziale tra i due elettrodi aumentando sensibilmente il valore della corrente di scarica contemporaneamente alla comparsa di punti luminosi sulla superficie del catodo, gli *sparks* [21]. Gli *streamers* sono essenzialmente dei canali di plasma *quasi-neutrale* che si propagano dall'elettrodo HV a quello messo a terra, con scale di tempo dell'ordine delle decine/centinaia di nanosecondi. In Fig. 2.6 è possibile osservare l'andamento della corrente nel tempo in una *glow discharge*: è evidente la comparsa degli *streamers* in regimi di scarica a media non nulla.



**Figura 2.6:** Corrente di scarica in funzione del tempo con densità di corrente media  $1.5 \text{ mA/m}$ . [17]

### 2.1.3 Principi di funzionamento: scarica di superficie

La scarica a corona in ambito aeronautico viene realizzata come scarica di superficie, che avviene fra due elettrodi paralleli, costituiti da fili o lamine metalliche, appoggiati su una superficie isolante (Fig. 2.7). Vengono ora descritte le caratteristiche di una scarica superficiale e le principali analogie e differenze rispetto alla scarica di volume.



**Figura 2.7:** Sezione di un attuttore a corona *wire-to-plate* per la generazione di una scarica superficiale. [17]

## Regimi di scarica

I regimi della scarica a corona dipendono da una molteplicità di fattori, fra cui il gas di lavoro, la pressione di tale gas, la morfologia della scarica (volumetrica o superficiale) e la geometria degli elettrodi.

Per quanto riguarda la scarica volumetrica in aria a pressione ambiente con una configurazione *needle-to-plate*, i regimi della scarica sono stati descritti da Gallo in [18] e riportati in Sez. 2.1.2.

Per quanto riguarda invece la scarica superficiale in aria a pressione ambiente, caso che riguarda gli attuatori al plasma di interesse, all'aumentare dell'intensità del campo elettrico sono cinque i regimi di scarica che si possono individuare [22]:

- *Spot type regime*: la scarica si concentra su dei punti ben visibili sull'elettrodo HV, in particolare in corrispondenza di difetti. Il numero di tali punti aumenta proporzionalmente alla differenza di potenziale applicata. A tale regime sono associate potenze di circa  $150 \text{ W/m}^2$ , con densità di corrente inferiori a  $0.2 \text{ mA/m}$  e la produzione di vento ionico è trascurabile.
- *Generalized glow regime*: all'aumentare della differenza di potenziale si può osservare una luminescenza omogenea nello spazio *inter-elettrodo*. La scarica risulta particolarmente stabile e ad essa è associato un rumore di fondo. La potenza interessata varia tra  $150$  e  $400 \text{ W/m}^2$  a cui si associano densità di corrente tra  $0.2$  e  $0.5 \text{ mA/m}$ . L'omogeneità della scarica dipende molto dalla precisione con cui sono realizzati gli elettrodi.
- *Line regime*: in tale regime si formano dei punti luminosi su entrambi gli elettrodi ai quali sono associati delle linee luminose; scompare il sottile letto blu di aria ionizzata. A questo regime corrispondono potenze comprese tra  $400$  e  $1600 \text{ W/m}^2$ , densità di corrente tra  $0.5$  e  $1.5 \text{ mA/m}$  e l'effetto dell'umidità assume un'elevata importanza.
- *Filament type regime*: in alcuni punti dell'elettrodo si ha la concentrazione di carica elettrica sotto forma di filamenti, con possibile comparsa temporanea di scintille. Le potenze in gioco sono superiori ai  $600 \text{ W/m}^2$  ( $0.6 \text{ mA/m}$ ).
- *Spark regime*: la potenza si concentra esclusivamente nella formazione dell'arco elettrico. L'elevata energia associata agli archi può essere pericolosa in quanto può danneggiare sia il materiale che il generatore.



In [17], Moreau rivede questa classificazione dei regimi della scarica a corona: pur non modificando la definizione e le caratteristiche dei regimi *spot*, *filament* e *spark*, definisce come *streamer discharge* quello che veniva chiamato in precedenza *generalized glow regime*, caratterizzato da una luminescenza blu omogenea di un sottile strato di aria ionizzata in tutto lo spazio fra gli elettrodi; allo stesso tempo il *line regime* viene rinominato *glow discharge*, caratterizzato dalla presenza della luminosità blu soltanto in prossimità dei due elettrodi.

### Vento ionico

L'effetto principale dovuto all'accensione di un attuatore al plasma in aria inizialmente calma è la nascita di un corrente d'aria chiamata *vento ionico*. La spiegazione del fenomeno del vento ionico è ben condensata nella definizione data da Robinson nel 1961 [23]: “il fenomeno noto come vento ionico o vento corona si riferisce al movimento di gas indotto dalla repulsione degli ioni nella vicinanza di un elettrodo ad alta tensione”. Il fisico americano, infatti, aveva intuito la possibilità di sfruttare tale fenomeno come meccanismo per mettere in movimento un gas, fornendo un'espressione quantitativa della velocità indotta dal movimento degli ioni nel gas stesso (Eq. (2.2)).

$$v_G = k \sqrt{\frac{I}{\rho\mu}}. \quad (2.2)$$

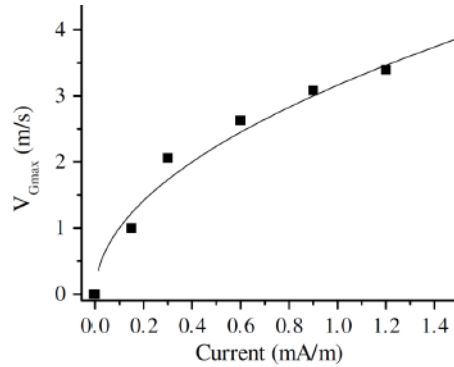
La velocità del gas risulta allora proporzionale alla radice della corrente di scarica media ed inversamente proporzionale alla radice della densità del gas  $\rho$  e della mobilità ionica nel gas  $\mu$ , con  $k$  parametro geometrico. Numerosi autori hanno riscontrato sperimentalmente il comportamento proporzionale a  $I^{1/2}$  della velocità del vento ionico (Fig. 2.8), arrivando a misurare una velocità massima fino a 5 m/s.

L'applicazione di un potenziale positivo ai capi dell'anodo con la conseguente formazione ed elevata concentrazione di ioni positivi fa sì che questi ultimi vengano attratti verso il catodo<sup>2</sup>. Il loro movimento causa un scambio di quantità di moto con le particelle neutre del gas, risultando in un movimento complessivo del fluido ed il conseguente cambiamento del profilo di velocità in prossimità della parete (Fig. 2.9).

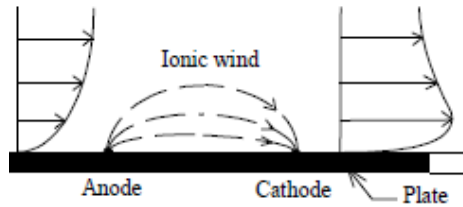
Gli studi riguardanti il vento ionico sono molteplici e numerosi autori hanno trovato pressoché lo stesso comportamento. In Fig. 2.10a vengono mostrati i profili di velocità nello strato limite indotti dalla corona in assenza

---

<sup>2</sup>Si consideri da questo momento in poi l'applicazione della corona positiva



**Figura 2.8:** Velocità massima in funzione della densità di corrente media. [17]



**Figura 2.9:** Schema dell'azione del vento ionico sul profilo di velocità. [24]

di flusso esterno su una lastra piana, misurati attraverso l'aiuto di un tubo di Pitot; in Fig. 2.10b è mostrato invece l'andamento della corrente di scarica in funzione del campo elettrico. L'anodo ed il catodo utilizzati sono due fili di rame del diametro rispettivamente di 0.6 mm e 2 mm, posti all'interno di due cavità appositamente ricavate e distanziati di 4 cm l'uno dall'altro. Si può osservare quanto segue [24]:

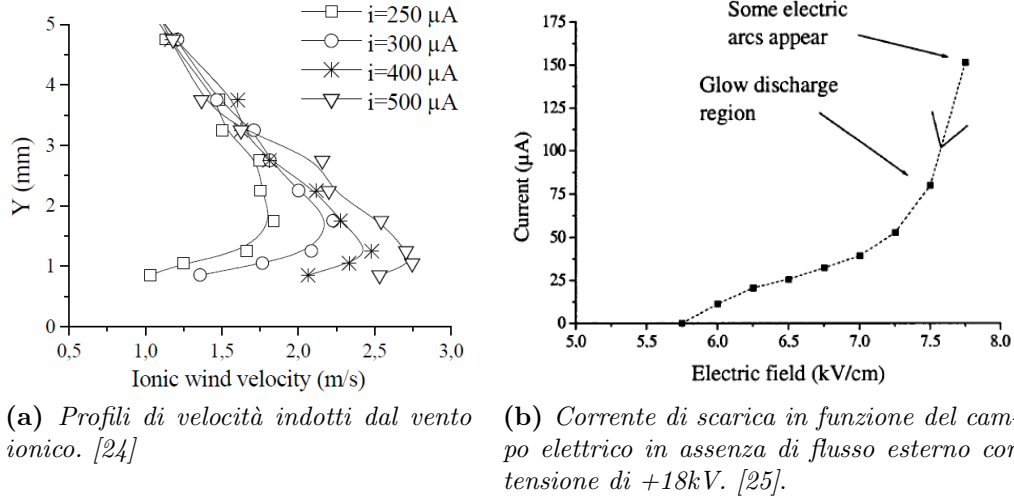
- il vento ionico cresce con l'intensità della corrente di scarica. I massimi valori di velocità sono misurati in corrispondenza di correnti crescenti.
- il massimo della velocità viene registrato per  $y$  leggermente decrescenti in prossimità della parete all'aumentare della corrente di scarica.

Dal profilo di velocità è inoltre possibile ottenere direttamente la potenza legata all'energia cinetica del vento ionico (Eq. (2.3)):

$$P_{mecc} = \frac{1}{2} \rho L \int_0^{\infty} v_G^3(y) dy. \quad (2.3)$$

Tale grandezza può risultare infatti utile nella definizione dell'*efficienza elettro-meccanica* dell'attuatore, mostrata in Eq. (2.4), rapportando  $P_{mecc}$

## 2.1. Caratteristiche degli attuatori a corona



**Figura 2.10:** Profili di velocità e corrente di scarica in assenza di flusso esterno.

alla potenza elettrica  $P_{elec} = VI$ .

$$\eta = \frac{P_{mecc}}{P_{elec}}. \quad (2.4)$$

Il valore di  $\eta$  è solitamente molto piccolo, dell'ordine dell'1 – 2 %; tuttavia questo non deve essere considerato come un fattore negativo sul funzionamento dell'attuatore poiché si possono trarre benefici anche dalla minima immissione di energia nella corrente.

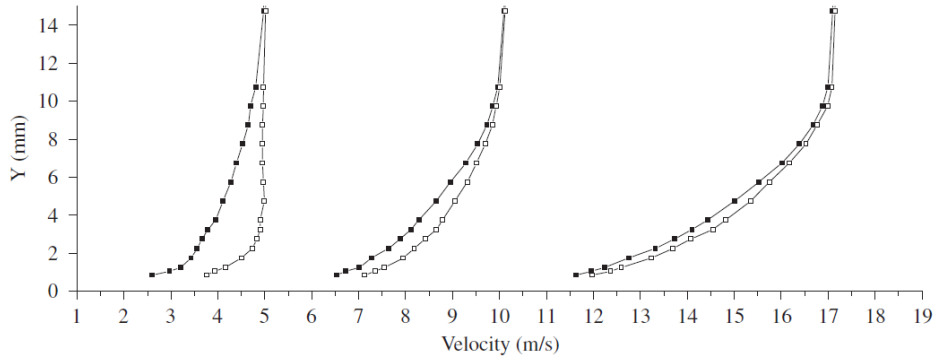
Ciò che però interessa è ovviamente l'influenza che tali attuatori hanno se immessi in una corrente fluida. In Fig. 2.11 viene mostrato uno studio parametrico dei profili di velocità misurati in prossimità della parete per velocità  $U_\infty$  crescenti. Come si può notare, l'attuatore perde la sua efficacia all'aumentare di  $U_\infty$ : la motivazione può essere ritrovata nel fatto che la potenza introdotta dall'attuatore è costante, al contrario di quella della corrente che aumenta con la velocità [25].

L'effettiva capacità di un attuatore di influenzare una corrente fluida è legata al *numero elettrodrodinamico*  $N_{EHD}$ , definito in Eq. (2.5):

$$N_{EHD} = \frac{i}{l\rho\mu u^2} \quad (2.5)$$

con  $u$  velocità locale della corrente.

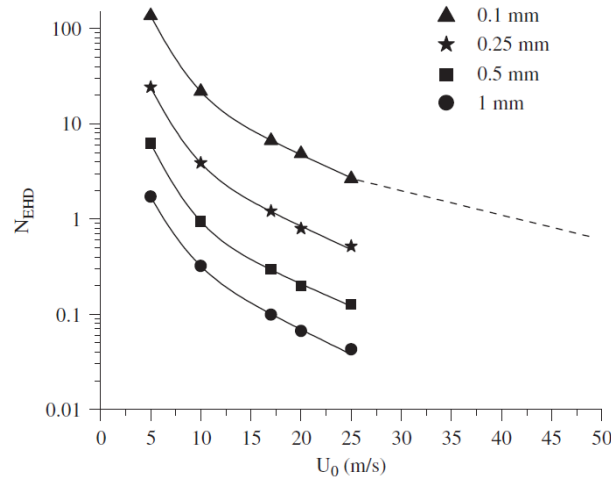
- $N_{EHD} \rightarrow 0$ : il vento ionico influenza debolmente il flusso complessivo;



**Figura 2.11:** Profili di velocità con attuttore spento e acceso con  $U_\infty$  pari a 5, 10 e 17  $m/s$ . [26]

- $N_{EHD} \rightarrow \infty$ : il vento ionico ha un'intensità tale da avere un'elevata influenza sul flusso.

In un articolo di Moreau del 2006 è stato effettuato il calcolo del numero elettroidrodinamico al variare del flusso esterno, valutato a diverse distanze dalla parete [26]. Il risultato più importante che si evince dall'analisi di Fig. 2.12 è che, per applicazioni di tipo aeronautico, quindi con  $U_\infty$  elevate, affinché  $N_{EHD}$  si mantenga superiore a 1, è necessario che il vento ionico si formi in uno spessore lontano dalla parete inferiore al decimo di millimetro.



**Figura 2.12:** Calcolo del numero elettroidrodinamico in funzione di  $U_\infty$ . [26]

Di interesse da un punto di vista della conoscenza della morfologia del campo di moto influenzato dalla presenza dell'attuttore possono essere i risultati provenienti da un'analisi di tipo PIV (Particle Image Velocimetry).

## 2.1. Caratteristiche degli attuatori a corona

Un esempio di PIV è mostrato in Fig. 2.13, rappresentativo della variazione della velocità media nel campo di moto attorno ad una lastra piana. E' evidente che la nascita della corona instaura variazioni di velocità fino a  $5\text{ m/s}$  in prossimità della parete.

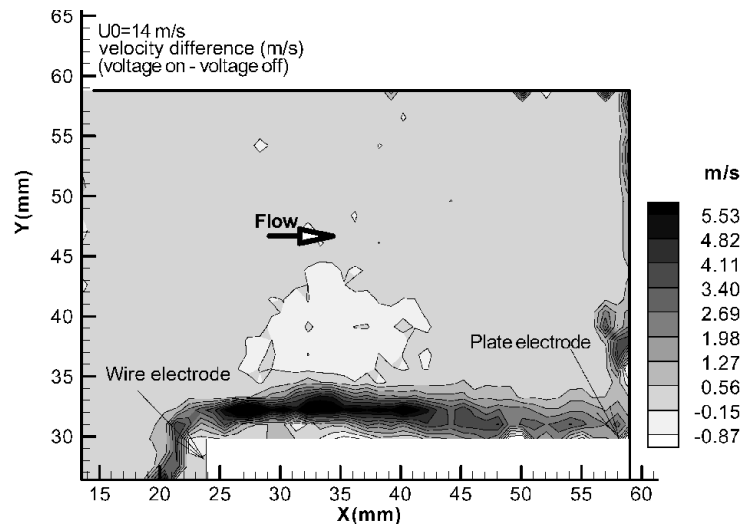


Figura 2.13: Differenza di velocità media nel campo di moto. [27]

In Fig. 2.14 viene invece mostrata l'analisi PIV di un campo di moto nella regione post-stallo per un numero di Reynolds pari a 133333 su un profilo aerodinamico. E' evidente come l'attuazione della scarica provochi un immediato riattacco del flusso.

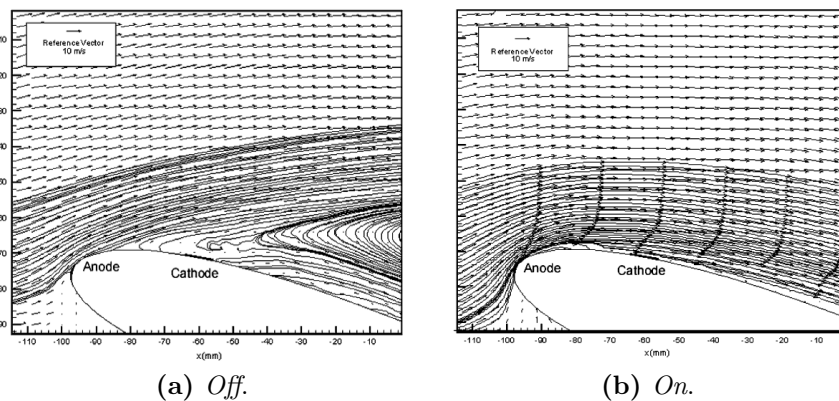


Figura 2.14: Campo di moto con attuatore off e on ad un'incidenza di  $15.8^\circ$  e  $Re = 133333$ . [28]

### 2.1.4 Modello teorico e numerico

In questa sezione viene illustrata l'idea che sta alla base della modellazione matematica che pone le basi per l'inserimento dell'attuatore a corona in una simulazione numerica. Il fenomeno può essere descritto aggiungendo un termine di forza di volume nelle equazioni di Navier-Stokes ed è utile a rappresentare il processo di collisione degli ioni con le molecole neutre del gas [29]. Nel seguito si farà riferimento ai lavori di Colver ed El-Khabiry ([30], [31]) i quali hanno calcolato l'azione del vento ionico su una lastra piana: il modello matematico è governato da cinque equazioni differenziali alle derivate parziali accoppiate e stazionarie che includono la conservazione della massa e della quantità di moto, la conservazione della carica nel gas, l'equazione di Poisson dell'elettrostatica e la conservazione della carica all'interfaccia solida.

L'Eq. (2.6) rappresenta l'equazione di Poisson dell'elettrostatica:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0}, \quad (2.6)$$

dove  $\Phi$  è il potenziale elettrico,  $\rho_c$  la densità di carica locale ed  $\epsilon_0$  la permittività elettrica nel vuoto.

Sfruttando l'espressione della densità di carica completa dei termini di conduzione e convezione di Eq. (2.7)

$$\mathbf{J} = \rho_c (K\mathbf{E} + \mathbf{v}), \quad (2.7)$$

e la relazione che lega campo elettrico e potenziale di Eq. (2.8)

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi, \quad (2.8)$$

l'equazione di conservazione della carica  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$  assume la forma di Eq. (2.9):

$$u \frac{\partial \rho_c}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_c}{\partial y} + K \left( \frac{\rho_c^2}{\epsilon_0} - \frac{\partial \rho_c}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial \rho_c}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = 0, \quad (2.9)$$

dove  $u$  e  $v$  sono le componenti di velocità rispettivamente in direzione  $x$  e  $y$  e  $K$  è la mobilità ionica<sup>3</sup>.

L'equazione di conservazione della carica in prossimità della parete assume infine la forma di Eq. (2.10):

---

<sup>3</sup>Si assuma un campo di moto bidimensionale in cui l'origine degli assi corrisponde al bordo d'attacco, l'asse  $x$  è posizionato sulla superficie della lastra ed  $y$  è l'asse perpendicolare ad esso.

$$\frac{\partial J_s}{\partial x} = \mathbf{J}_c \cdot \mathbf{n}, \quad y = 0, \quad (2.10)$$

con  $\mathbf{n}$  vettore normale alla superficie della lastra,  $J_s = \sigma_s E_s$  densità di carica sulla superficie e  $\mathbf{J}_c = \sigma_c \mathbf{E}_c$  ( $\sigma_c = \rho_c K$ ) densità di carica nel gas. Le Eq. (2.6), (2.9), (2.10) permettono di valutare il termine di *body-force*  $\rho_c E_x$  che interviene nelle equazioni dello strato limite per il problema in esame ((2.11) e (2.12)):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2.11)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\rho_c}{\rho} E_x + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (2.12)$$

con  $\eta$  viscosità cinematica.

Alle equazioni precedentemente scritte vanno ad aggiungersi le condizioni al contorno. Per il fluido si considerano condizioni di aderenza a parete e di velocità asintotica all'infinito:

$$u = v = 0, \quad y = 0 \quad (2.13)$$

$$u \rightarrow U, \quad y \rightarrow \infty \quad (2.14)$$

In (2.15) è invece descritta la condizione al contorno in corrispondenza della parete solida che prende in considerazione la deposizione o la rimozione degli ioni in prossimità della parete tra i due elettrodi ed è ottenuta combinando le Eq. (2.10) e (2.8)<sup>4</sup>.

$$\sigma_s \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -\sigma_c \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad x_1 \leq x \leq x_2, \quad y = 0, \quad (2.15)$$

Le Eq. (2.10) e (2.15) vengono prese come condizioni al contorno per il potenziale in corrispondenza della parete solida, soddisfacendo conseguentemente la condizione di tangenza di Eq. (2.16) del campo elettrico in prossimità della parete:

$$E_{c,t} = E_{s,t}, \quad y = 0. \quad (2.16)$$

Considerando  $J_s = 0$ , poiché la densità netta di carica nel plasma è nulla, il potenziale in prossimità della parete risulta essere costante sia *upstream* (2.17) che *downstream* (2.18).

---

<sup>4</sup>Si considerino anodo e catodo posti rispettivamente a distanza  $x_1$  e  $x_2$  dal bordo d'attacco

$$\Phi = \Phi_u, \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad y = 0, \quad (2.17)$$

$$\Phi = 0, \quad x \geq x_2, \quad y = 0. \quad (2.18)$$

A monte del bordo d'attacco è possibile descrivere la regione di *corona libera* attraverso l'equazione di Laplace<sup>5</sup>.

$$\Phi = \Phi_u \left[ 1 - \sqrt{-\frac{x}{H}} \right], \quad -H \leq x \leq 0, \quad y = 0, \quad (2.19)$$

$$\Phi = 0, \quad -\infty \leq x \leq -H, \quad y = 0. \quad (2.20)$$

Lontani dagli elettrodi si ha invece:

$$\Phi = 0, \quad x, y \rightarrow \pm\infty \quad \forall y, x. \quad (2.21)$$

Le Eq. (2.6), (2.9), (2.11) (2.12) costituiscono un sistema di 4 equazioni alle derivate parziali nelle 4 incognite  $u, v, \rho_c$  e  $\Phi$ , da risolvere con il set di condizioni al contorno (2.13), (2.14), (2.15), (2.17) - (2.21).

### 2.1.5 Studio delle prestazioni al variare dei parametri di funzionamento

Al fine di migliorare le prestazioni degli attuatori a corona, può essere interessante osservare come la scarica, e di conseguenza il vento ionico e l'effetto di forza di volume sulla corrente, si comporta al variare di alcuni parametri. L'importanza di tali parametri si riflette direttamente sui regimi della scarica a corona superficiale discussi in Sez. 2.1.3, in quanto l'utilizzo di una configurazione può favorire l'insorgere di un regime piuttosto che un altro. E' stato verificato da numerosi studi che tali regimi di scarica risultano essere influenzati in particolare da parametri di tipo geometrico e ambientale (di cui verrà discusso nella Sez. 2.1.6).

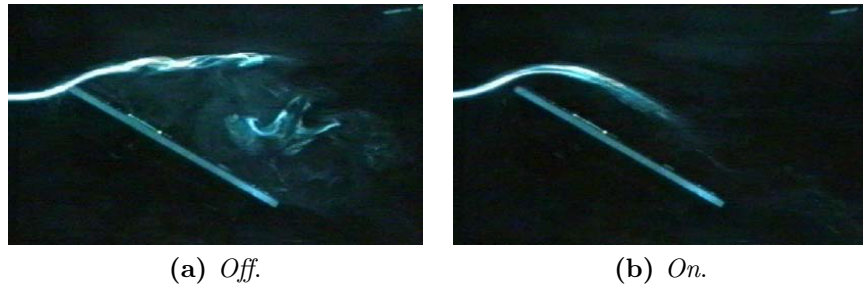
I primi risultati interessanti riguardanti la possibilità di controllare lo strato limite sono stati svolti su lamine piane, ponendo le basi per i successivi sviluppi sui profili aerodinamici. In Fig. 2.15 viene mostrato l'effetto istantaneo che l'accensione dell'attuatore provoca sulla corrente, con una sensibile riduzione della scia.

Le configurazioni tipiche per un attuatore a corona positiva di tipo aeronautico prevedono l'impiego di due elettrodi che disturbino in maniera minima

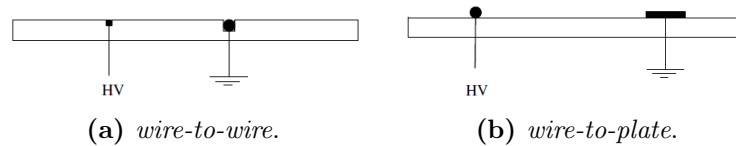
---

<sup>5</sup>H è una distanza in direzione delle ascisse negative di entità confrontabile alla lunghezza scelta per le ordinate del dominio computazionale





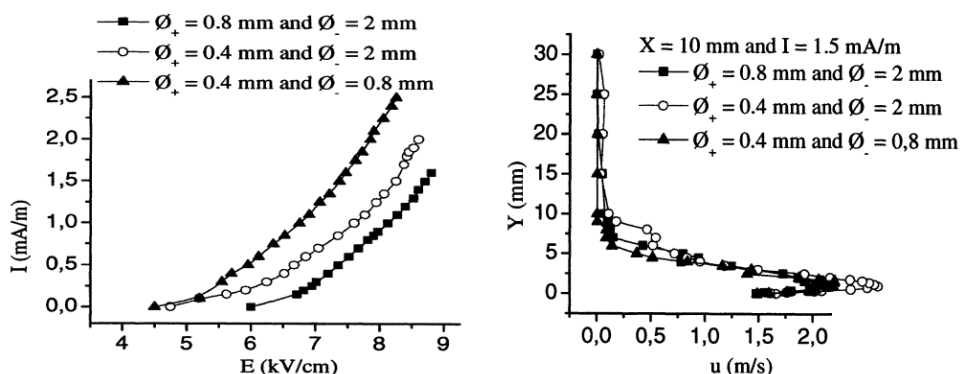
**Figura 2.15:** Visualizzazione di una corrente a  $0.35\text{ m/s}$  su una lastra piana inclinata di  $30^\circ$  con attuttore spento e acceso. [25]



**Figura 2.16:** Configurazioni di attuatori a corona di tipo aeronautico. [17]

l'aerodinamica della superficie sulla quale sono posti. Le due configurazioni più sperimentate in questo ambito sono mostrate in Fig. 2.16: una coppia di elettrodi di tipo *wire-to-wire*, dove anodo e catodo sono generalmente due fili di rame inseriti in una cavità ricavata appositamente sulla superficie (*flush-mounted*), oppure nella configurazione *wire-to-plate* l'anodo è costituito da un filo ed il catodo da un sottile foglio di materiale conduttivo (tipicamente un foglio di alluminio di spessore dell'ordine dei  $10\text{-}15\ \mu\text{m}$ ). In entrambi i casi la scarica DC viene realizzata su una lamina piana di materiale isolante, per esempio Plexiglas, PVC, PMMA o vetro. Considerando che, a parità di configurazione, anodi di piccole dimensioni stabilizzano la scarica (Fig. 2.17a) e che un catodo di dimensioni maggiori provoca un vento ionico più elevato (Fig. 2.17b), l'utilizzo di una delle due geometrie può condurre a delle importanti osservazioni [32]:

- La configurazione di tipo *wire-to-plate* posta in prossimità del bordo d'attacco favorisce il regime di *generalized glow* anche se di non facile stabilizzazione: infatti, per valori di campo elettrico superiori a  $7.5\text{ kV/cm}$  è frequente la comparsa di archi elettrici (Fig. 2.10b), con conseguenti picchi di corrente indesiderati [25].
- Spostando l'anodo a valle del bordo d'attacco e lasciando invariata la distanza e la geometria degli elettrodi, la scarica è instabile con il

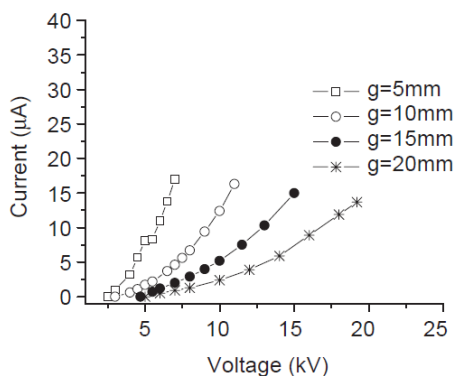


(a) Effetto del diametro degli elettrodi sulla scarica. (b) Effetto del diametro degli elettrodi sul vento ionico.

**Figura 2.17:** Effetto del diametro degli elettrodi. [33]

conseguente insorgere dell'arco elettrico. La formazione dell'arco può essere favorita dal fatto che non vi sia del materiale dielettrico posto tra i due elettrodi.

- Con una configurazione di tipo *wire-to-wire* invece, interponendo il dielettrico tra anodo e catodo, la scarica risulta più stabile, favorendo però il *line regime* a discapito del *generalized glow*.

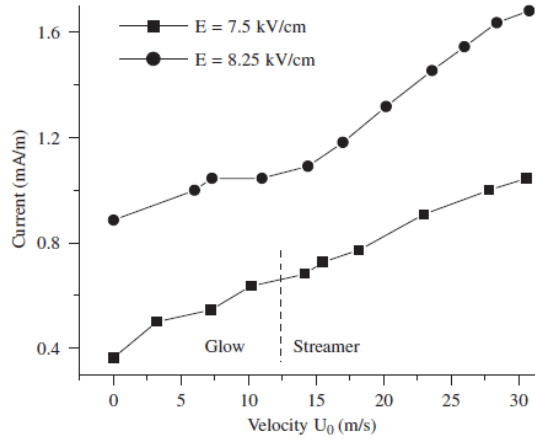


**Figura 2.18:** Curve V-I per differenti valori della distanza inter-elettrodo. [34]

Un importante fattore che può entrare in gioco è la distanza fra i due elettrodi. In Fig. 2.18 è mostrato l'andamento della corrente in funzione della tensione applicata al variare del *gap* fra anodo e catodo.

Come si può notare, a parità di  $\Delta V$ , la corrente è tanto più elevata quanto

più il *gap* si riduce. Infatti, riducendo la distanza tra gli elettrodi, il campo elettrico cresce di intensità e di conseguenza aumenta la corrente (Fig. 2.19). In Tab. 2.1 sono indicati i valori di velocità, potenza ed efficienza registrati al variare del *gap* tra gli elettrodi. E' opportuno ricordare inoltre che all'aumentare della distanza fra gli elettrodi deve aumentare anche la differenza di potenziale applicata fra gli stessi, affinché possa instaurarsi una scarica a corona, dal momento che il valore di campo elettrico necessario per la formazione della scarica è pari a circa  $7.5 \text{ kV/cm}$ . Un *gap* troppo ridotto, infine, preclude la formazione di una scarica stabile e favorisce il regime di arco elettrico.

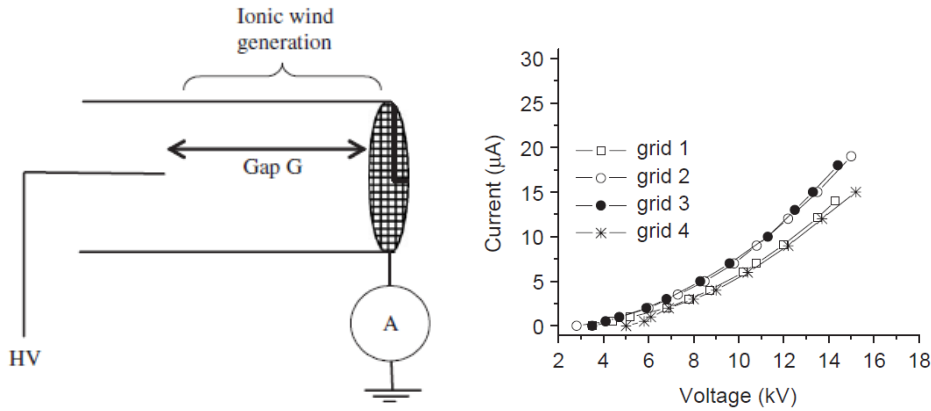


**Figura 2.19:** Corrente in funzione della velocità al variare del campo elettrico. [26]

**Tabella 2.1:** Valori di velocità, potenza elettrica, potenza meccanica ed efficienza al variare del *gap* tra gli elettrodi per una scarica di volume. [34]

Gap [mm]	5	10	15	20
$U_{max}$ [m/s]	7.1	8.8	8	6.5
$P_{elec}$ [mW]	74	119	155	217
$P_{mecc}$ [mW]	0.37	0.99	1.99	2.16
$\eta$ [%]	0.5	0.83	1.28	0.99

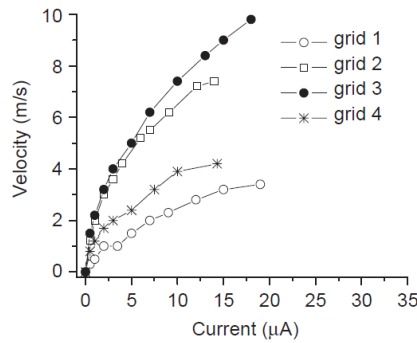
Anche le scariche di volume (configurazione *needle-to-plate*), meno interessanti per applicazioni aerodinamiche, risentono tuttavia di parametri geometrici legati alla forma degli elettrodi. In [34] per esempio viene effettuata un'ottimizzazione della geometria dell'elettrodo di terra per una scarica



(a) Schema sperimentale con elettrodo di terra a geometria a griglia. (b) Curve V-I parametrizzate su diverse griglie.

**Figura 2.20:** Geometria meshata. [34]

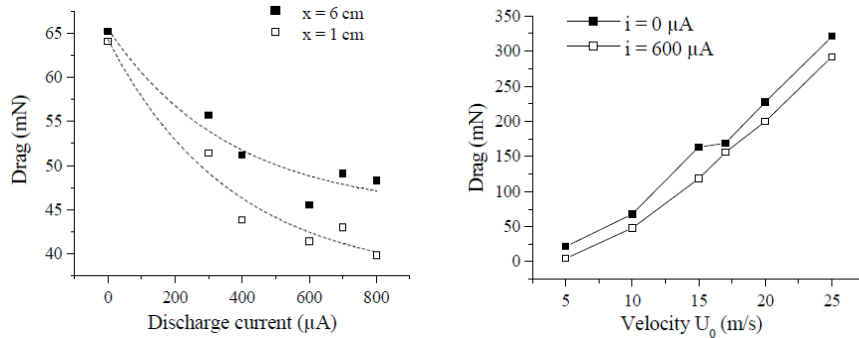
volumetrica (Fig. 2.20): si introduce una geometria a griglia per l'elettrodo di terra, con uno studio parametrico delle dimensioni della griglia. In Fig. 2.20b si può osservare come le curve V-I non vengano particolarmente influenzate dalle dimensioni della griglia scelta, la quale invece assume un ruolo fondamentale nella produzione del vento ionico (Fig. 2.21).



**Figura 2.21:** Velocità massima in funzione della corrente al variare delle dimensioni della griglia. [34]

Infine, tornando a una scarica di tipo superficiale, e quindi agli attuatori al plasma di interesse, può risultare indicativa l'analisi riguardante la riduzione di attrito applicando l'attuatore sulla lamina piana. Noti infatti i profili di velocità (vedi Fig. 2.10a), sfruttando l'Eq. (2.22) è possibile quantificare la resistenza.

$$D(x) = b\rho \int_{y=0}^{\infty} u(y) (U_{\infty} - u(y)) dy. \quad (2.22)$$



(a) Resistenza misurata a due differenti stazioni in funzione della corrente per una velocità di  $U_\infty = 10\text{m/s}$ . (b) Resistenza misurata in assenza ed in presenza di scarica in funzione della velocità esterna.

**Figura 2.22:** Riduzione di resistenza su lamina piana. [24]

I risultati di Fig. 2.22 sono da questo punto di vista particolarmente indicativi:

- In Fig. 2.22a si può osservare come l'applicazione del campo elettrico riduca la resistenza con l'aumentare della corrente; si è arrivati a registrare una riduzione di resistenza massima fino al 35%.
- In Fig. 2.22b invece si mostra come la resistenza si riduca (nel caso in questione di circa 20 mN) a prescindere da quale sia il valore della corrente esterna.

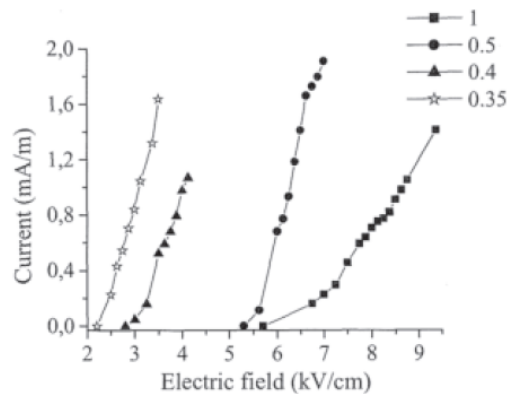
### 2.1.6 Dipendenza dagli agenti esterni

In questa sezione viene discusso come pressione, temperatura, umidità, materiali e flusso esterno influenzino la scarica. L'effetto negativo esercitato sulla stabilità della scarica da alcuni di questi fattori ha decisamente ridotto l'interesse verso lo sviluppo degli attuatori a corona per applicazioni aeronautiche, favorendo negli ultimi anni l'affermazione degli attuatori DBD che, sotto questo aspetto, forniscono maggiori garanzie.

#### Influenza della pressione

Tra i parametri che possono sensibilmente variare in un'applicazione di tipo aeronautico, la pressione è uno dei principali. In Fig. 2.23 è rappresentata la curva caratteristica V-I ricavata per diversi valori della pressione: quando

la pressione diminuisce, la scarica necessita di un minore campo elettrico. Riducendo la pressione fino a  $10^4 Pa$  è stato verificato che la scarica è stabile ed omogenea, al contrario di ciò che accade al di sotto dei  $100 Pa$  dove la scarica è a filamento ed è quindi difficile che si ottenga un regime di tipo *glow* sulla superficie isolante.



**Figura 2.23:** Curva V-I per diversi valori della pressione esterna (per  $10^5 Pa$ ). [35]

### Influenza della temperatura

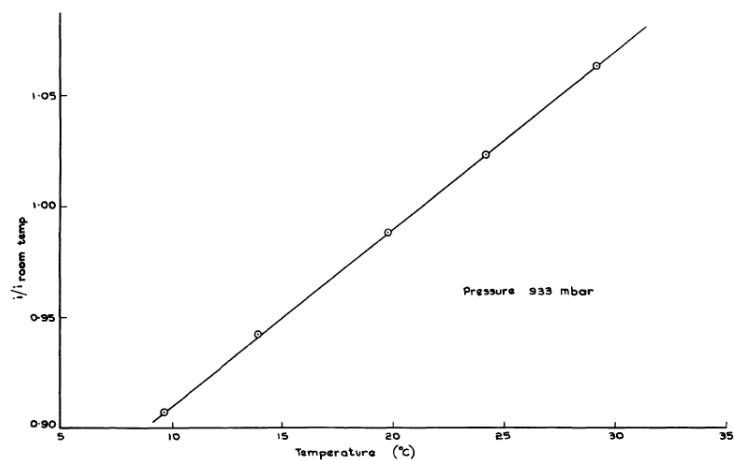
Per quanto riguarda l'effetto della temperatura, si possono considerare due casi:

- In Fig. 2.24 è mostrato l'andamento della corrente in aria secca al variare della temperatura. Come si può osservare, tale andamento è lineare fino ai  $30^{\circ}C$ . Un grafico in condizioni di saturazione di umidità perderebbe di significato a causa della variazione di tensione di vapore con la temperatura [36].
- facendo variare la temperatura della superficie isolante in un range tra  $20^{\circ}C$  e  $65^{\circ}C$  non si ha nessuna influenza sul comportamento della scarica [35].

### Influenza dell'umidità

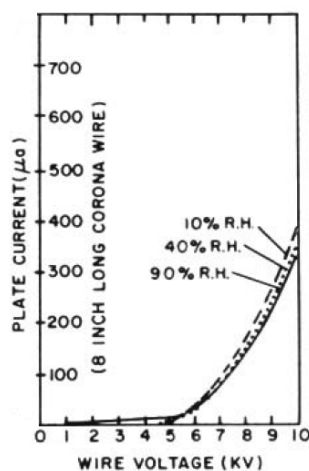
Tra tutti gli agenti esterni che interessano la stabilità della scarica, l'umidità è senza dubbio uno dei più importanti. Di particolare rilevanza è l'azione dell'umidità *relativa*, la quale è generalmente legata alla tendenza a formare

## 2.1. Caratteristiche degli attuatori a corona



**Figura 2.24:** Effetto della temperatura sulla corrente di scarica. [36]

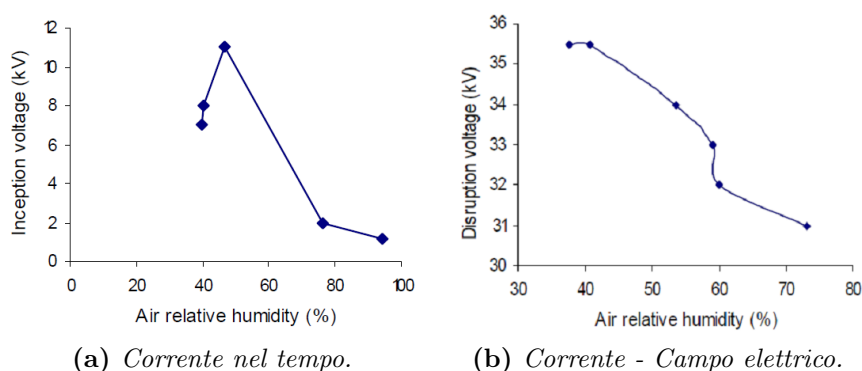
piccole gocce di acqua a basso potenziale di ionizzazione, e a condensare sulla superficie degli elettrodi, inibendo l'emissione di elettroni [37]. In Fig. 2.25 viene mostrato come, per elevati valori della tensione applicata, la corrente diminuisca all'aumentare dell'umidità relativa.



**Figura 2.25:** Curva V-I parametrizzata sull'umidità relativa. [37]

L'umidità relativa ha quindi una diretta influenza sull'entità del vento ionico generato. L'elevata concentrazione di molecole di acqua nell'aria favorisce infatti la produzione di ioni  $\text{OH}^-$  con la deriva di tali ioni negativi verso l'anodo ed una conseguente riduzione del vento ionico [26].

In [38] sono stati valutati i valori di tensione di attivazione della scarica (*onset*) e di formazione dell'arco (*disruption*). La tensione di *onset* ha un valore massimo per un valore compreso tra il 50% e 60% di umidità relativa



**Figura 2.26:** *Onset e disruptive voltage* al variare dell'umidità relativa. [38]

(Fig. 2.26a), mentre quella di *disruption* decresce con l'umidità (Fig. 2.26b).

L'umidità si riflette direttamente sui regimi di scarica: indicativamente, un valore di umidità relativa inferiore al 45% favorisce il regime di tipo *line* a discapito di un *generalized glow* che risulta essere di dimensioni ridotte ed instabile; per valori superiori al 45% quest'ultimo appare più stabile ed omogeneo. In condizioni di umidità relativa superiori al 55% la scarica è instabile, con la formazione di archi elettrici [32].

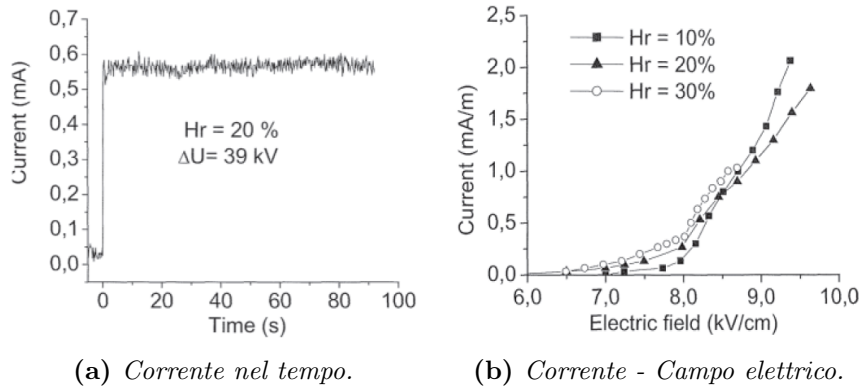
### Influenza dei materiali utilizzati

L'azione dell'umidità si riflette direttamente sul comportamento della scarica a seconda del materiale isolante sopra cui i due elettrodi vengono applicati. In [39] e [40] è stato effettuato uno studio parametrico attraverso l'utilizzo di diversi tipi di materiale isolante (PMMA, vetro e Pyrex) a diversi valori dell'umidità relativa dell'aria, osservando comportamenti differenti a seconda del materiale impiegato. Nelle Figg. 2.27, 2.28 e 2.29 vengono mostrati gli andamenti nel tempo della corrente per un certo valore di umidità relativa (a) e l'andamento della corrente in funzione del campo elettrico per differenti valori di umidità relativa (b).

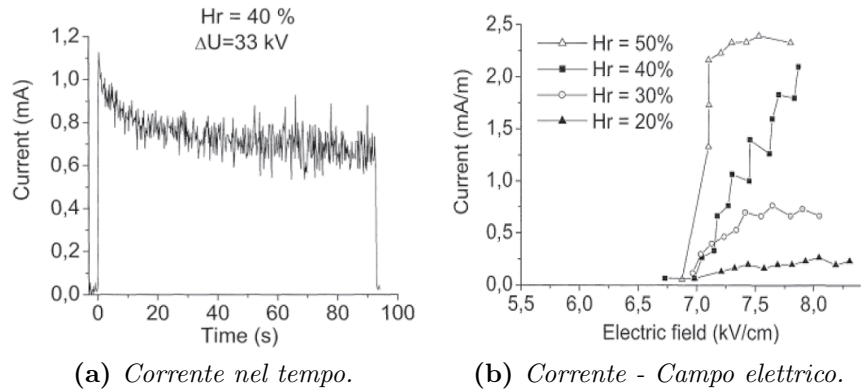
Nel caso di PMMA, per valori di umidità relativa inferiori al 20%, si registrano i valori più elevati di corrente con un regime di scarica stabile. Inoltre per valori superiori al 40% la formazione di archi elettrici rende impossibile la stabilizzazione della scarica. Per il vetro ed il Pyrex è stato osservato un comportamento diverso: la massima intensità di corrente cresce per valori di umidità più elevati. I massimi valori di corrente per diverse condizioni di umidità relativa sono illustrati in Fig. 2.30.



## 2.1. Caratteristiche degli attuatori a corona



**Figura 2.27:** PMMA. [40]



**Figura 2.28:** Vetro. [40]

Si pensa che il diverso comportamento di questi materiali possa essere dovuto alle differenti attitudini all'assorbimento dell'acqua. Tuttavia, nello studio effettuato, non si esclude che anche la rugosità superficiale possa aver influenzato in maniera significativa le misure.

### Influenza del flusso esterno

Generalmente, il termine convettivo di Eq. (2.7) è trascurabile. Tuttavia, per applicazioni di tipo aeronautico assume un'importanza rilevante. In Fig. 2.31a è mostrato l'andamento della corrente in funzione del campo elettrico per quattro diversi valori del flusso esterno, il quale ha il risultato di inibire sensibilmente la transizione da *glow* ad arco elettrico. In Fig. 2.31b viene invece mostrata la curva corrente-flusso esterno per tre differenti valori del campo elettrico: per valori di  $E = 6.75$  e  $7.25$  kV/cm la corrente

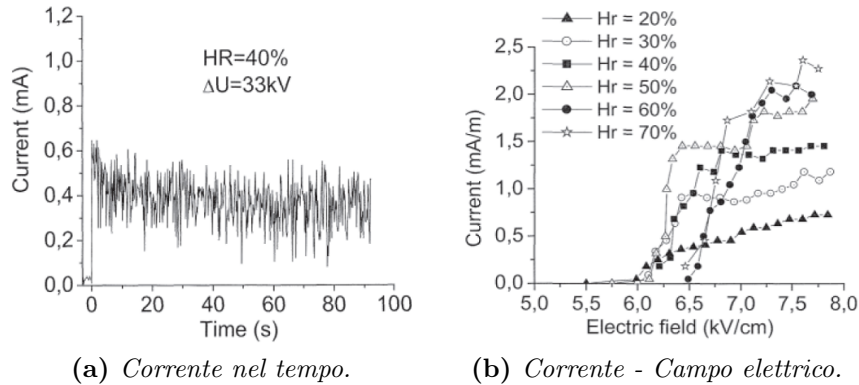


Figura 2.29: Pyrex. [40]

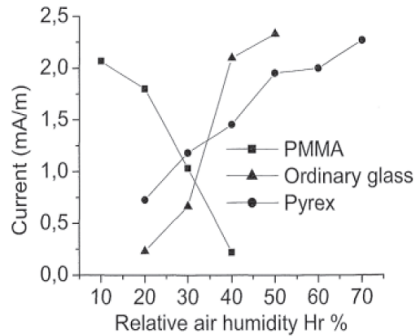
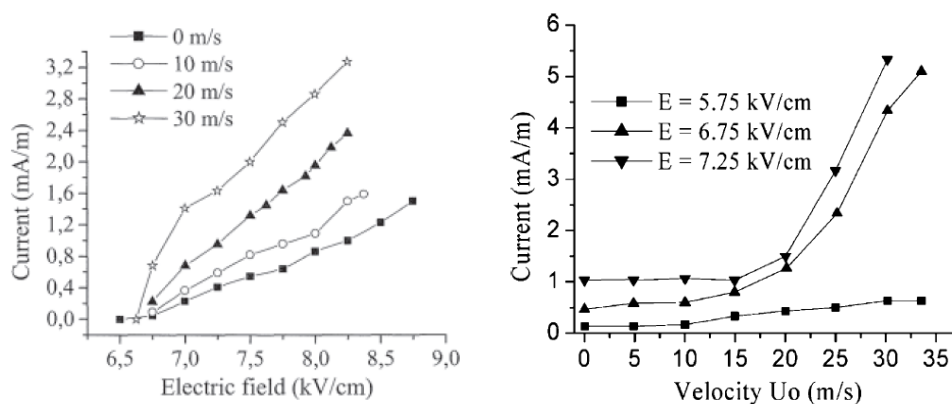


Figura 2.30: Massimi valori di corrente in funzione dell'umidità relativa. [40]

crece rapidamente con il flusso esterno a partire da  $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$ ; per  $E = 5.75 \text{ kV/cm}$  invece tale crescita è molto minore. Ciò fa intendere che la scarica sia fortemente influenzata dal flusso esterno per valori di campo elettrico superiori a  $5.75 \text{ kV/cm}$ . In conclusione, la scarica viene stabilizzata dalla corrente esterna; si possono raggiungere valori di corrente elettrica maggiori (almeno per valori del campo elettrico oltre una certa soglia) e la densità di carica sembra crescere [41].

## 2.2 Caratteristiche degli attuatori DBD

In questa sezione vengono presentate le principali caratteristiche degli attuatori DBD (*dielectric barrier discharge*). Analogamente agli attuatori a corona, i DBD inducono un'accelerazione locale del flusso, che genera delle velocità fino a circa  $10 \text{ m/s}$  in aria inizialmente calma [42]. Il loro punto



(a) Corrente in funzione del campo elettrico per quattro diverse  $U_\infty$ . [35] (b) Corrente in funzione del flusso esterno al variare del campo elettrico. [41]

**Figura 2.31:** Influenza del flusso esterno sulla scarica.

di forza rispetto agli attuatori a corona precedentemente descritti consiste in una maggiore stabilità della scarica, aspetto che li rende particolarmente attrattivi per le tipiche applicazioni aeronautiche che prevedono ambienti e condizioni di utilizzo particolari, quali appunto quelle che si possono trovare alla quota di crociera dei velivoli di linea. Di contro, il principale punto debole di questi attuatori è la limitata estensione del plasma generato. Questo aspetto limita le prestazioni ottenibili, in particolare in termini di velocità indotte e *body force*, dal momento che queste dipendono fortemente dalla quantità del plasma che si forma.

Con DBD intendiamo la scarica elettrica fra due elettrodi separati da una barriera di materiale dielettrico. Inizialmente chiamata scarica silenziosa, questo fenomeno è stato descritto per la prima volta da Ernst Werner von Siemens nel 1857. Come per gli attuatori a corona, anche i DBD sono stati sviluppati originariamente in ambiti industriali diversi rispetto a quello aeronautico, come ad esempio trattamento di superfici, produzione di ozono e depurazione di acqua e alimenti. E' solo nella seconda metà dell'ultimo decennio del secolo scorso che i DBD iniziano a essere utilizzati per applicazioni fluidodinamiche, in aria e a pressione atmosferica, mentre tipicamente nelle altre applicazioni industriali si utilizzano gas di lavoro differenti (elio, azoto, etc.) e pressioni inferiori, grazie ai lavori di Roth e dei suoi collaboratori ([43] e [44]), che chiamano questa nuova tecnica OAUGDP (*one atmosphere uniform glow discharge plasma*). A partire da questi studi, i DBD sono stati oggetto di numerosi lavori di ricerca dedicati a capirne in maniera sempre più approfondita i principi di funzionamento, in modo da poter giungere ad un'ottimizzazione della geometria e dei parametri elettrici volta a migliorarne

le prestazioni. Il crescente interesse nei confronti di questo tipo di attuatori ha raffreddato sostanzialmente quello nei confronti degli attuatori a corona, che pure erano stati sviluppati in precedenza, tant'è che attualmente la grande maggioranza della ricerca sul plasma in ambito fluidodinamico è dedicata ai DBD. Fra i gruppi di lavoro che si occupano di plasma, e in particolare di DBD, è opportuno citare i due principali, ossia quello dell'università di Poitiers facente capo a E. Moreau e quello dell'università di Notre-Dame diretto da T. Corke, autori di alcune review annuali particolarmente interessanti ([17], [45] e [46]).

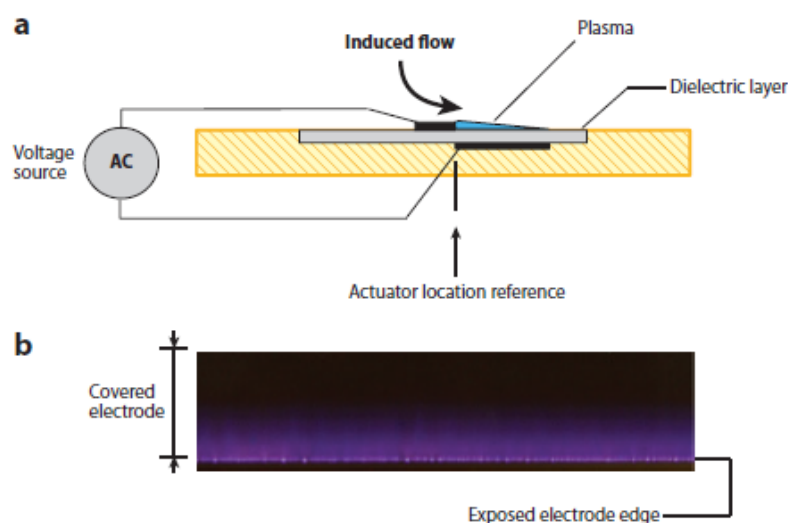
Nella sezione seguente (2.2.1) vengono descritti gli aspetti generali riguardo al funzionamento degli attuatori DBD, alcuni dei quali sono stati pienamente compresi solo recentemente. Viene poi riportato un semplice modello per rappresentare l'effetto dell'attuatore sul fluido circostante, tipicamente utilizzato per simulare la presenza del DBD in una corrente fluida in ambito numerico (2.2.2). Quindi vengono riportati alcuni studi parametrici, numerici e soprattutto sperimentali, sui principali parametri di funzionamento, sia geometrici sia elettrici, dell'attuatore (2.2.3) volti ad ottimizzarne le prestazioni. Vengono infine descritti alcuni lavori riguardanti la dipendenza di queste prestazioni al variare delle condizioni di utilizzo, quali la pressione atmosferica o l'umidità (2.2.4).

### 2.2.1 Caratteristiche generali e principi di funzionamento

I DBD si dividono in DBD di volume e di superficie, a seconda della collocazione spaziale degli elettrodi e quindi a seconda di dove avviene la scarica. Esclusivamente i secondi sono utilizzati in ambito aeronautico, dal momento che siamo interessati a una scarica superficiale, particolarmente indicata per il controllo dello strato limite, mentre i primi sono utilizzati prevalentemente in altri ambiti e pertanto non interessano ai fini di questo lavoro di tesi.

La configurazione tipica per un attuatore DBD di superficie è costituita da due elettrodi piani collocati da entrambi i lati di uno strato di materiale dielettrico, generalmente Kapton o PMMA (polimetilmetacrilato, più noto come Plexiglass), di spessore compreso fra il decimo di millimetro e qualche millimetro. A causa della presenza del dielettrico, una corrente continua non può scorrere fra gli elettrodi, che pertanto vengono alimentati con tensione alternata: in particolare un elettrodo, solitamente quello superiore, immerso nella corrente fluida, viene alimentato con una tensione tipicamente sinusoidale, mentre l'altro è messo a terra. Per le applicazioni fluidodinamiche gli elettrodi sono disposti in maniera fortemente asimmetrica, a differenza della configurazione a piatti paralleli utilizzata nei DBD industriali. Una rappre-

sentazione schematica di un attuttore DBD è visibile in Fig. 2.32(a). Quando la tensione applicata agli elettrodi è sufficientemente alta, l'aria ionizza debolmente e si forma il *plasma*, da entrambi i lati del dielettrico, a partire dall'estremità dell'elettrodo esposto, in corrispondenza dell'elettrodo coperto. Poiché tipicamente la formazione del plasma sul lato inferiore del dielettrico è un effetto indesiderato, l'elettrodo inferiore viene rivestito di materiale isolante in modo da prevenire la ionizzazione da quella parte. L'aria ionizzata è di colore blu-viola, tanto più intenso quanto è maggiore la densità del plasma (ossia la densità di particelle ionizzate, che solitamente non è particolarmente elevata, tipicamente meno di 1ppm [46]). L'intensità di emissione è bassa e richiede solitamente che la stanza sia poco illuminata per poter vedere il plasma ad occhio nudo. Una fotografia del plasma generato dall'attuttore è visibile in Fig. 2.32(b). In presenza del campo elettrico pro-

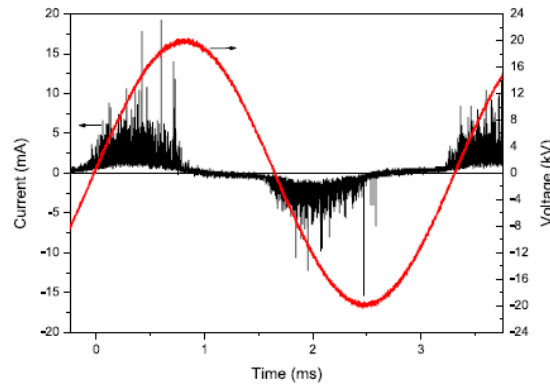


**Figura 2.32:** (a) rappresentazione schematica di un attuttore DBD e (b) fotografia dell'aria ionizzata che si forma a partire dall'estremità dell'elettrodo esposto sopra l'elettrodo coperto dal dielettrico. [46]

dotto dalla geometria degli elettrodi, nasce una *body-force* (chiamata anche *EHD force*, ossia forza elettroidrodinamica) che agisce sul fluido, la quale è il meccanismo utilizzato per il controllo aerodinamico. La direzione di questa forza può essere modificata a piacere andando ad agire sulla geometria e la disposizione degli elettrodi. L'origine di questa *body-force*, ossia il meccanismo con cui avviene il trasferimento di quantità di moto, è legata alle collisioni fra le particelle ionizzate, le quali vengono accelerate dal forte campo elettrico (poiché possiedono una carica), con le molecole neutre di aria.

### Morfologia della scarica

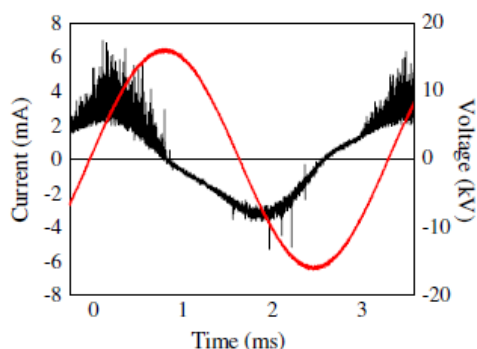
Quello che ad un semplice esame visivo (e in Fig. 2.32 (b)) appare come un plasma uniforme e stazionario, in realtà è costituito da una molteplicità di microscariche. Questo aspetto è facilmente individuabile se si osserva l'andamento della corrente elettrica misurata durante un periodo della sinusoide della tensione applicata agli elettrodi (Fig. 2.33): ad ogni picco della curva di corrente corrisponde una microscarica o *streamer*. L'andamento della corrente sembra essere simmetrico durante il ciclo di tensione alternata, ma questo è dovuto al fatto che nel caso rappresentato in Fig. 2.33 l'elettrodo inferiore non è incapsulato.



**Figura 2.33:** Andamento della tensione e della corrente nel tempo ( $U_{max} = 20 \text{ kV}$ ,  $f = 300 \text{ Hz}$ ). L'elettrodo inferiore non è incapsulato. [47]

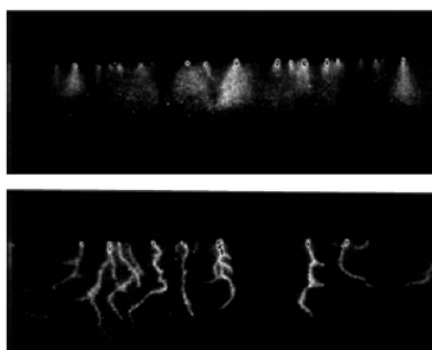
Più significativa è la Fig. 2.34, in cui viene rappresentato l'andamento della corrente per un DBD in cui l'elettrodo inferiore è incapsulato e pertanto non si ha la formazione di plasma sul lato inferiore del dielettrico. Si può osservare che la corrente ha una componente capacitiva, ad andamento sinusoidale ma sfasato di  $90^\circ$  rispetto alla tensione. Sovrapposti a questa componente vi sono i picchi già identificati in Fig. 2.33 corrispondenti alle microscariche. Quello che però salta immediatamente all'occhio è la forte asimmetria nel comportamento della corrente fra il semiciclo positivo e quello negativo di tensione: durante il semiciclo positivo l'intensità dei picchi di corrente è molto maggiore, ma la loro frequenza è minore, rispetto a quanto succede durante il semiciclo negativo. Questa asimmetria nell'andamento della corrente corrisponde a due diversi regimi della scarica, in particolare un regime filamentario caratterizzato dalla presenza degli *streamer* durante il semiciclo positivo e un regime più uniforme e diffuso (*glow*) durante il semiciclo negativo. Assumendo che ad ogni picco corrisponda un singolo *streamer*, il numero degli *streamer* aumenta con l'ampiezza della tensione,

mentre viene ridotto in maniera consistente (anche del 40%) nel caso in cui l'elettrodo inferiore sia incapsulato [48].



**Figura 2.34:** Andamento della tensione e della corrente nel tempo. L'elettrodo inferiore è incapsulato. [17]

La differenza fra i due regimi di scarica che si alternano per ogni singolo periodo della tensione può essere apprezzata anche nelle fotografie di Fig. 2.35, scattate con un tempo di esposizione molto breve ( $20 \mu s$ ). Questa differenza di comportamento è legata ai meccanismi di produzione della scarica e si traduce in una differenza di prestazioni fra semiciclo positivo e negativo, con il secondo molto più efficiente per quanto riguarda la produzione di *body-force* e velocità indotte.



**Figura 2.35:** Differenti regimi di scarica: in alto regime *glow* durante il semiciclo negativo e in basso *streamer* durante il semiciclo positivo. [49]

Una piena comprensione dei meccanismi fisici alla base della produzione di *body-force*, con una completa caratterizzazione delle differenze fra i due regimi della scarica, è stata raggiunta solo in anni recenti, grazie a numerosi lavori sperimentali ([50], [51] e [52]) e numerici ([53], [54], [55] e [56]).

Durante entrambi i semicicli, il plasma si forma quando la tensione istantanea raggiunge un certo valore di soglia (*breakdown*). Se l'ampiezza della sinusoide non è molto alta questo avviene in prossimità del picco, e la cosiddetta fase attiva, che termina quando si ha l'inversione della pendenza della curva di tensione, ha una durata molto limitata. Da questa considerazione si intuisce immediatamente che aumentare l'ampiezza della tensione di alimentazione ha effetti benefici sulle performance dell'attuatore, dal momento che prolunga la fase attiva, ossia quella in cui è presente il plasma.

Consideriamo ora il semiciclo negativo: quando viene raggiunta la tensione di *breakdown*, elettroni vengono emessi dalla superficie dell'elettrodo esposto (per emissione secondaria), che durante questa fase ha la funzione di catodo; a questo punto avviene una ionizzazione a valanga (*avalanche ionization*), grazie al forte campo elettrico, nella regione adiacente all'estremità dell'elettrodo. Le molecole d'aria che impattano con questi elettroni molto energetici vengono ionizzate (ossia quando un elettrone accelerato fortemente dal campo elettrico impatta contro una molecola neutra, se possiede sufficiente energia, le strappa via un elettrone e il processo continua coinvolgendo sempre più elettroni, da cui il nome di valanga) e si formano diverse specie chimiche dopo una serie di numerose e complicate reazioni. Sebbene in molti abbiano provato a simulare numericamente tutte queste reazioni, una trattazione dettagliata sarebbe molto complicata e non strettamente necessaria per comprendere i meccanismi fondamentali di funzionamento del DBD. E' sufficiente comprendere che, oltre agli elettroni liberi, si formano ioni positivi (ossia quelle molecole a cui sono stati strappati uno e più elettroni) e, grazie all'elettronegatività dell'ossigeno presente nell'aria, anche ioni negativi, che giocano un ruolo fondamentale nella produzione di *body-force*.

Gli elettroni sono molto più leggeri e rapidi degli ioni, e pertanto vengono respinti dall'elettrodo che in questa fase è negativo e accelerati dal campo elettrico, andando infine a depositarsi sulla superficie del dielettrico, e lasciando dietro di sé una nube di ioni positivi. Gli elettroni tuttavia non sono i responsabili principali del trasferimento di quantità di moto alle molecole neutre di aria, in quanto, pur essendo molto veloci, hanno massa molto limitata. Il plasma quindi si propaga lungo la superficie e le fornisce una carica negativa durante la propagazione. Questa propagazione si arresta (e la corrente si azzerava) quando il potenziale negativo sulla superficie del dielettrico diventa sufficientemente alto per cui la differenza di potenziale fra l'elettrodo e il dielettrico (che svolge una funzione di terzo elettrodo virtuale) scende sotto la soglia critica di *breakdown*. In questo modo termina la fase attiva che ha una durata tipica dell'ordine di  $100\text{ ns} - 1\text{ }\mu\text{s}$ . Se la tensione istantanea continua ad aumentare è possibile che la differenza di potenziale fra l'elettrodo e la superficie del dielettrico superi nuovamente la soglia critica e



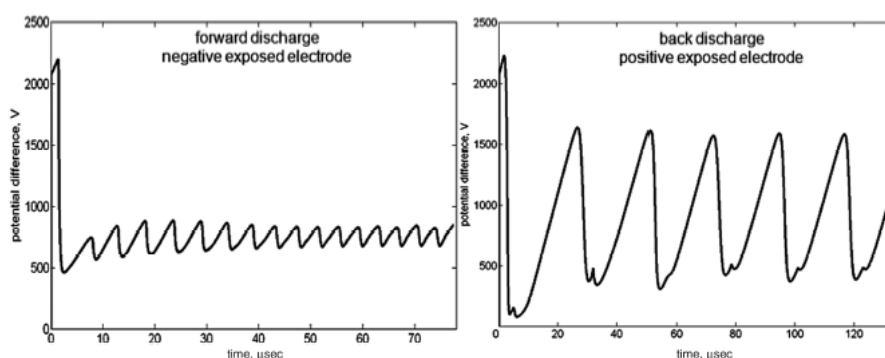
pertanto può iniziare una nuova fase attiva.

Al termine della fase attiva, gli ioni negativi, che si erano formati in precedenza e che vengono respinti dall'elettrodo esposto, spingono a valle l'aria, mentre gli ioni positivi, che erano rimasti in prossimità del catodo, ne vengono attirati e hanno un effetto opposto, spingendo l'aria verso monte e verso la superficie. Globalmente la forza prodotta durante il semiciclo negativo è comunque diretta a valle, grazie soprattutto alla presenza degli ioni negativi, tuttavia il moto degli ioni positivi in questa fase è chiaramente un effetto indesiderato che va a limitare le prestazioni dell'attuatore (così come la presenza di ioni negativi durante il semiciclo positivo [55]).

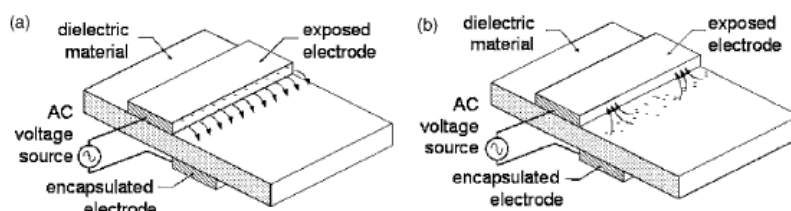
Consideriamo quindi il semiciclo positivo: si possono fare osservazioni in gran parte analoghe, seppur con qualche differenza importante. In particolare, in questa fase l'elettrodo esposto è positivo (anodo), mentre la superficie del dielettrico, sulla quale si erano andate a depositare le cariche negative durante il semiciclo precedente, funge da catodo. Questi elettroni possono essere strappati dalla superficie per emissione secondaria (dall'impatto di ioni ad alta energia o fotoni UV) e dare origine a una ionizzazione a valanga. La differenza principale con il semiciclo negativo però è dovuta al fatto che in questo caso non c'è più l'effetto di schermatura dovuto alla deposizione di elettroni sulla superficie del dielettrico, pertanto la differenza di potenziale fra l'anodo e il dielettrico può salire maggiormente, fino al punto in cui si innesca uno *streamer* (Fig. 2.36). Ogni *streamer* deposita una piccola quantità di carica elettrica positiva sulla superficie del dielettrico, che contribuisce a schermare il campo elettrico e ad abbassare la differenza di potenziale fra l'elettrodo e la superficie del dielettrico. Gli ioni hanno mobilità inferiore rispetto agli elettroni, pertanto un numero minore di ioni raggiunge il dielettrico a tempo fissato e la carica elettrica depositata durante il semiciclo positivo è inferiore rispetto al semiciclo negativo [56]. Il meccanismo appena descritto è sufficiente per comprendere un aspetto vantaggioso del DBD rispetto all'attuatore a corona, ossia l'*auto-limitazione* della scarica: durante il semiciclo negativo l'accumulo di carica sulla superficie del dielettrico impedisce alla differenza di potenziale con l'elettrodo di crescere in maniera eccessiva e quindi di promuovere la formazione dell'arco elettrico; è immediato osservare la necessità di una tensione che continua a crescere per sostenere la scarica e fare in modo che la differenza di potenziale si mantenga oltre la soglia necessaria alla formazione del plasma. Allo stesso tempo, durante il semiciclo positivo il trasferimento di carica è limitato a quella depositata sul dielettrico durante il semiciclo precedente. Tuttavia, se la carica media trasferita nel tempo viene aumentata in maniera eccessiva, per esempio aumentando considerevolmente l'ampiezza della tensione o la frequenza, l'accumulo di carica sul dielettrico potrebbe diventare così alto da rendere instabile la scarica. In questo

caso appaiono filamenti molto intensi, che possono scaldare eccessivamente il dielettrico con il rischio di danneggiarlo, e si dice che il DBD è giunto a saturazione.

Una spiegazione ulteriore, presentata in [46], afferma che durante il semiciclo negativo gli elettroni si generano dall'elettrodo metallico, che sostanzialmente è una sorgente infinita che non pone ostacoli all'emissione. Durante il semiciclo positivo invece gli elettroni si originano dalla superficie del dielettrico, che si oppone maggiormente alla loro emissione; per questo motivo quando vengono emessi, lo fanno sotto forma di microscariche (*streamer*), meno numerose ma più intense. Una rappresentazione schematica delle due fasi della scarica è visibile in Fig. 2.37.



**Figura 2.36:** Differenza di potenziale fra l'elettrodo esposto e il dielettrico. [56]

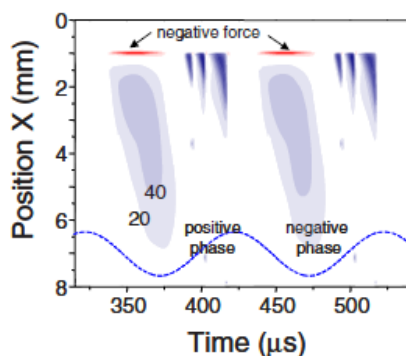


**Figura 2.37:** Rappresentazione schematica del funzionamento del DBD: (a) semiciclo negativo e (b) semiciclo positivo. [49]

### Effetti meccanici

Il trasferimento di quantità di moto alle molecole neutre del fluido, e quindi la produzione di *body-force*, avviene grazie alle collisioni degli ioni accelerati dal campo elettrico. Nel paragrafo precedente si è visto come il processo sia

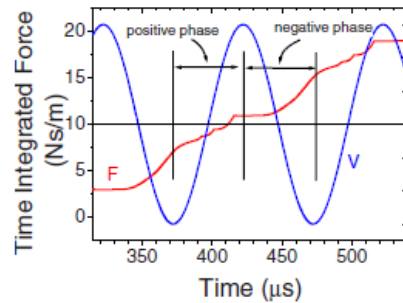
fortemente instazionario e dipendente dal segno della tensione, e pertanto anche la forza prodotta non è stazionaria. La distribuzione spaziale e temporale della forza, ottenuta numericamente in [54], è rappresentata in Fig. 2.38. Durante il semiciclo negativo si può osservare la presenza di una forza negativa (diretta verso monte), che ha un'estensione spaziale molto limitata nella zona immediatamente adiacente all'estremità dell'elettrodo esposto, dovuta all'accelerazione degli ioni positivi verso il catodo. Più distante dall'elettrodo invece la forza è positiva durante entrambi i semicicli, anche se con caratteristiche diverse: più uniforme ed estesa durante il semiciclo negativo, quando è legata agli ioni negativi, e concentrata in una zona più limitata durante il semiciclo positivo. Inoltre, durante il semiciclo positivo non si ha produzione di forza durante la propagazione degli *streamer*, poiché la forza EHD è quasi nulla in un plasma quasi neutrale, quale è quello che costituisce gli *streamer* stessi. Vale infine la pena notare come non ci sia produzione di forza nella prima fase successiva all'inversione della pendenza della sinusoide, in cui evidentemente la differenza di potenziale non è sufficiente per innescare la formazione del plasma.



**Figura 2.38:** Distribuzione spaziale e temporale della forza elettrodrodinamica per unità di superficie. Il colore blu indica una forza positiva, diretta lontano dall'elettrodo esposto, mentre il colore rosso indica una forza negativa, diretta verso l'elettrodo esposto. La linea tratteggiata indica la tensione applicata. [54]

Andando a considerare la forza integrata nello spazio (Fig. 2.39) si può osservare come la maggior parte della forza venga prodotta durante il semiciclo negativo: pertanto sono gli ioni negativi i principali responsabili della produzione della forza. Si può anche notare che nonostante la presenza di una componente negativa nella distribuzione spaziale, tuttavia la forza globale è diretta sempre a valle, durante entrambi i semicicli. Questo comportamento dell'attuatore viene definito PUSH-push (con le lettere maiuscole viene in-

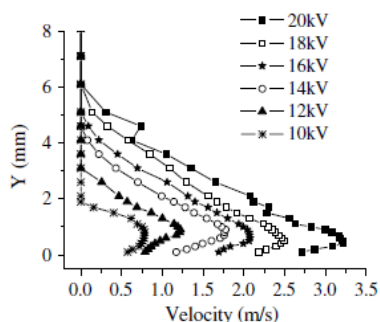
dicato il semiciclo dove si ha la maggior produzione di forza, in particolare quello negativo secondo [54]), e viene avallato dalla maggior parte degli studi (per esempio [46], [49] e [55]). Tuttavia ci sono alcuni lavori che propendono per una visione PUSH-pull (in particolare [52], [53] e [57]), secondo i quali, durante il semiciclo negativo la forza è diretta a monte, a causa dell'attrazione degli ioni positivi verso il catodo, sebbene la forza media nel tempo su un periodo sia comunque diretta decisamente a valle. Una considerazione finale, sulla quale tutti i gruppi di ricerca concordano, è che se non fosse presente l'ossigeno nell'aria, ossia se non ci fossero ioni negativi nel plasma, il comportamento del DBD sarebbe sicuramente PUSH-pull.



**Figura 2.39:** Andamento temporale della forza elettrodrodinamica integrata in direzione  $x$ . [54]

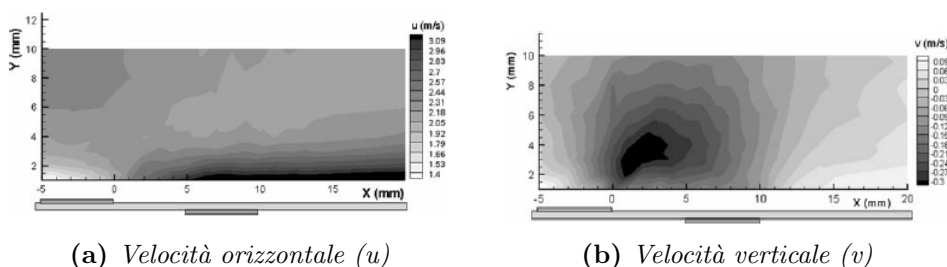
L'effetto meccanico più facilmente misurabile, poiché è sufficiente solo un tubo di Pitot, è l'accelerazione del fluido dovuta all'attuatore, che genera una distribuzione di velocità indotte anche in un fluido inizialmente in quiete. Questi profili di velocità mostrano come l'effetto del DBD, analogamente agli attuatori a corona, sia quello di trasmettere quantità di moto al fluido vicino alla parete dov'è applicato, e in particolare allo strato limite (Fig. 2.40). Il limite principale all'applicazione dei DBD è dovuto al fatto che, allo stato attuale dell'arte, queste velocità indotte si attestano al massimo, dopo varie ottimizzazioni della geometria e dei parametri elettrici, a circa  $8 - 10 \text{ m/s}$ . La massima velocità è sempre misurata in corrispondenza del limite dell'estensione del plasma, a una distanza da parete dell'ordine del millimetro [17].

Molto interessante è anche il campo di moto globale, che può essere indagato tramite PIV (*particle image velocimetry*). In Fig. 2.41 si può osservare il campo di velocità (rispettivamente la componente orizzontale e quella verticale) indotto dall'attuatore, mediato nel tempo. Si può notare che l'attuatore induce una forte componente orizzontale, analoga a un getto di parete, a partire dall'estremità dell'elettrodo esposto; inoltre è presente anche una forte



**Figura 2.40:** Profili di velocità orizzontale indotta dal DBD, per differenti tensioni, e misurati con un tubo di Pitot in vetro, per evitare eventuali interazioni con il plasma. Come già accennato nella sezione precedente, aumentare la tensione causa un miglioramento delle prestazioni dell’attuatore. [17]

componente negativa della velocità verticale, localizzata tipicamente sopra e all’estremità dell’elettrodo esposto, che causa aspirazione (*suction*) del flusso esterno, avvicinandolo a parete.



(a) Velocità orizzontale ( $u$ )

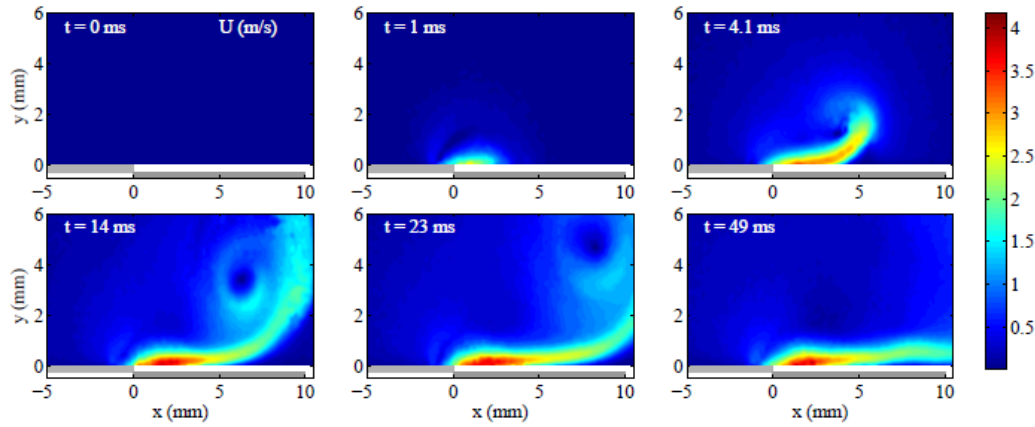
(b) Velocità verticale ( $v$ )

**Figura 2.41:** Campi di velocità medi nel tempo. [58]

Infine è interessante osservare cosa succede al fluido quando l’attuatore viene avviato: l’effetto, rappresentato in Fig. 2.42 è analogo all’avvio impulsivo di una lastra a parete, poiché si forma un vortice di avviamento che viene trasportato quindi a valle dalla velocità che viene indotta dal DBD. A transitorio esaurito, il campo di moto è analogo a quello di un getto di parete, con una forte componente orizzontale vicina a parete.

## 2.2.2 Modello teorico e numerico

Sebbene la fisica che governa il comportamento dell’attuatore, e in particolare le interazioni fra campo elettrico e fluido, sia molto complicata (e richiederebbe in teoria la soluzione di un sistema che accoppia le equazioni di Maxwell con quelle di Navier-Stokes), la presenza del DBD in un fluido può

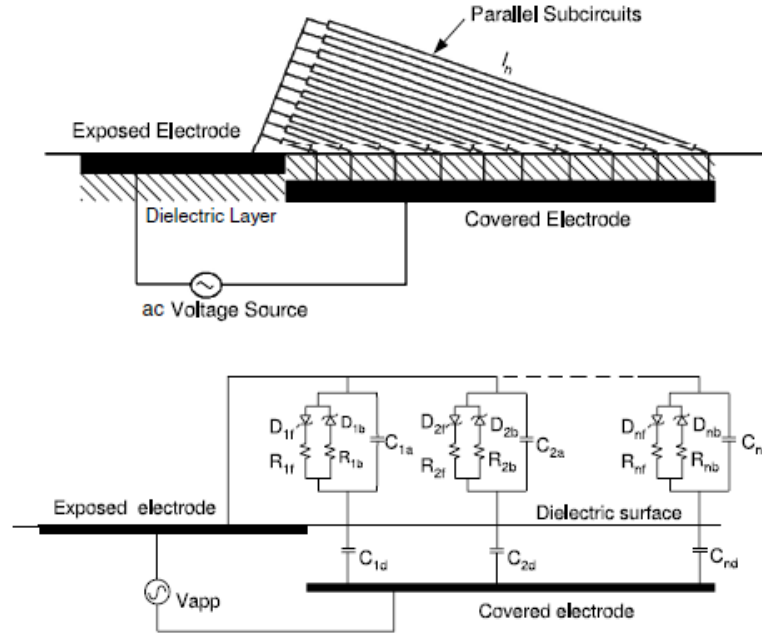


**Figura 2.42:** Evoluzione temporale del campo di velocità totale ( $U$ ), ottenuto tramite PIV, in seguito all'avvio dell'attuatore. [59]

essere modellata in maniera semplificata, e tuttavia accurata, semplicemente aggiungendo un termine di *body-force*, opportunamente calcolato, alle equazioni di Navier-Stokes. Il modello di calcolo della forza descritto in questa sezione è quello sviluppato in primo luogo da Enloe ([60]) e poi ripreso e migliorato da Orlov e Corke (riportato per esempio in [61] e [62]), e basato su una modellazione dell'attuatore come un circuito a elementi concentrati (*lumped-element circuit model*).

Anche se è teoricamente possibile calcolare l'evoluzione spazio-temporale dell'aria ionizzata durante il funzionamento del DBD, tuttavia questo sarebbe computazionalmente molto gravoso, eccetto forse che per problemi monodimensionali. Un'alternativa è quella di utilizzare un modello a elementi concentrati per descrivere l'evoluzione spazio-temporale del plasma: il vantaggio di questi modelli è che, oltre a essere molto meno gravosi dal punto di vista computazionale, permettono di indagare in maniera molto semplice gli effetti di alcuni parametri, quali la geometria degli elettrodi, la frequenza della tensione applicata, le proprietà del dielettrico e le condizioni ambientali. Il concetto su cui si basa questo modello è molto semplice: lo spazio fisico sopra l'elettrodo coperto dal dielettrico viene diviso in  $N$  sotto-regioni, come si può vedere nella parte in alto di Fig. 2.43. Ogni sotto-regione corrisponde a un ramo di circuito in parallelo, come mostrato nella parte bassa della figura. Ogni sotto-circuito rappresenta un dominio di dimensione finita, la cui ampiezza è definita dal numero di rami  $N$  e la lunghezza dalla posizione (il ramo 1 è il più corto, il ramo  $N$  il più lungo), ed è formato da due elementi capacitivi (uno per modellare il dielettrico, l'altro per l'aria) e da due elementi resistivi per modellare il plasma. I diodi zener determinano la tensione

in cui si instaura il plasma e le differenti resistenze del plasma a seconda della direzione della corrente (aspetto legato all'asimmetria della scarica, mostrato nella sezione precedente).



**Figura 2.43:** Modello a elementi concentrati del DBD: in alto, lo spazio fisico sopra l'elettrodo incapsulato viene diviso in  $N$  sotto-regioni, in basso, ogni sotto regione corrisponde a un ramo di circuito parallelo. [62]

La capacità dell'aria nel sotto-circuito  $n$ -esimo è definita come:

$$C_{an} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a A_n}{l_n} \quad (2.23)$$

dove  $\epsilon_a$  è il coefficiente dielettrico dell'aria e  $A_n$  e  $l_n$  sono rispettivamente la sezione e la lunghezza dell'elemento capacitivo nel sotto-circuito  $n$ -esimo. La resistenza è definita come:

$$R_n = \frac{\rho l_n}{A_n} \quad (2.24)$$

dove  $\rho$  è la resistività dell'aria. La capacità del dielettrico per ogni sotto-circuito è definita come:

$$C_{dn} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d A_d}{l_d} \quad (2.25)$$

dove  $\epsilon_d$  è il coefficiente dielettrico del materiale dielettrico utilizzato e  $A_d$  e  $l_d$  sono rispettivamente la sezione, definita in base al numero di rami  $N$ ,

e lo spessore del materiale. Se la tensione applicata ( $V_{app}$ ) è una funzione nota, per esempio sinusoidale, allora il valore della tensione sulla superficie del dielettrico per il sotto-circuito n-esimo è descritto da:

$$\frac{dV_n(t)}{dt} = \frac{dV_{app}(t)}{dt} \left( \frac{C_{an}(t)}{C_{an}(t) + C_{dn}(t)} \right) + k_n \left( \frac{I_p(t)}{C_{an}(t) + C_{dn}(t)} \right) \quad (2.26)$$

dove  $k_n = 0$  se il plasma non è presente nel sotto-circuito n-esimo, oppure  $k_n = 1$  se il plasma è presente.  $I_p(t)$  è il valore della corrente nel plasma, descritto da:

$$I_p(t) = \frac{1}{R_n} [V_{app}(t) - V_n(t)] \quad (2.27)$$

dove  $R_n = R_{nf}$  o  $R_n = R_{nb}$  a seconda della direzione della corrente nel plasma. Le equazioni (2.26) e (2.27) forniscono la distribuzione di tensione sul dielettrico e la corrente nel plasma per ogni istante temporale. Questi risultati vengono utilizzati come condizioni al contorno per l'equazione elettrostatica del potenziale elettrico ( $\phi$ ):

$$\nabla (\epsilon \nabla \phi) = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (2.28)$$

dove  $\rho_c$  è la densità di carica netta, definita come la differenza fra la carica netta positiva degli ioni e quella negativa degli elettroni. Andando a sostituire nell'Eq. (2.28) la definizione di densità di carica netta, si può ricavare l'equazione elettrostatica che governa il nostro problema:

$$\nabla (\epsilon \nabla \phi) = \frac{1}{\lambda_D^2} \phi \quad (2.29)$$

dove  $\lambda_D$  è la lunghezza di Debye, che è una lunghezza caratteristica per la schermatura elettrostatica nel plasma. Le condizioni al contorno dell'Eq. (2.29) sono molto semplici: il potenziale  $\phi$  è nullo a infinito (contorno esterno), mentre sull'elettrodo esposto dipende dalla tensione applicata e sul dielettrico da quella calcolata con l'Eq. (2.26).

La soluzione dell'Eq. (2.29) è quindi utilizzata per calcolare la *body-force* prodotta dal plasma:

$$\mathbf{f}_b = \rho_c \mathbf{E} = - \left( \frac{\epsilon_0}{\lambda_D^2} \right) \phi \mathbf{E} \quad (2.30)$$

La soluzione dell'Eq. (2.30) è una forza per unità di volume, che varia nel tempo e nello spazio durante il ciclo AC.  $\mathbf{E}$  è il campo elettrico:

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (2.31)$$



Infine, tale forza può essere inserita nell'equazione di Navier-Stokes della quantità di moto.

Questo modello è stato validato sperimentalmente a più riprese, per esempio in [61], dove, dopo aver constatato che la luce emessa dal plasma e raccolta con un tubo fotomoltiplicatore è proporzionale alla corrente misurata, gli autori trovano un buon accordo fra i risultati sperimentali e quelli della simulazione.

### 2.2.3 Studio delle prestazioni al variare dei parametri di funzionamento elettrici e geometrici

Un gran numero di studi sui DBD è stato svolto con l'idea di ottimizzare i parametri operativi in modo da ottenere prestazioni, in termini di velocità indotte e forza generata, sempre migliori, e quindi migliorare l'autorità di questi attuatori in applicazioni di *flow control*. A tale proposito, è possibile andare ad agire su parametri geometrici, quali le dimensioni e la forma degli elettrodi, la distanza fra gli elettrodi stessi e lo spessore e il materiale del dielettrico, oppure su parametri elettrici, come per esempio la forma d'onda, l'ampiezza e la frequenza della tensione con cui viene alimentato il DBD. Infine, è possibile utilizzare più DBD in serie, ottenendo un attuatore multiplo (*multiple DBD*).

Le grandezze che vengono tipicamente utilizzate per valutare le performance dell'attuatore sono la velocità indotta, misurata solitamente con un tubo di Pitot, la spinta sul fluido dovuta all'attuatore (*thrust*), di cui di solito viene misurata la forza uguale e contraria esercitata dal fluido sul DBD con una bilancia, la potenza elettrica (Eq. (2.32)), ossia la media su un numero intero di periodi del prodotto fra tensione e corrente, la potenza meccanica (Eq. (2.33)), calcolata a partire dai profili di velocità  $u(y)$  e l'efficienza elettromeccanica, definita come il rapporto fra potenza meccanica ed elettrica.

$$P_{el} = \frac{1}{T} \int v(t) \bullet i(t) dt \quad (2.32)$$

$$P_{mecc} = \frac{1}{2} \rho L \int_{|y|} u^3(y) dy \quad (2.33)$$

#### Ottimizzazione dei parametri geometrici

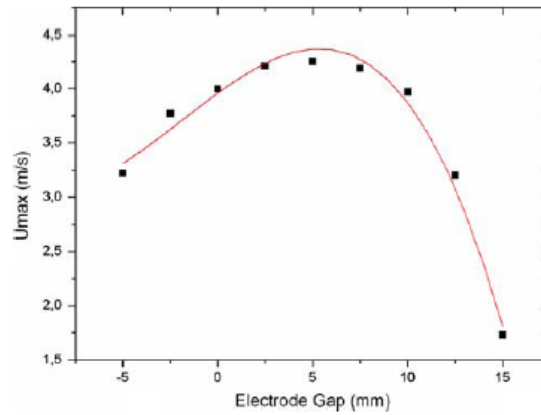
La configurazione geometrica di base tipicamente utilizzata per i DBD prevede due elettrodi piani, generalmente costituiti da nastro di alluminio o rame, di lunghezza dell'ordine del centimetro, con distanza orizzontale nulla

fra le estremità degli elettrodi, e un dielettrico in Kapton, PMMA, Teflon o vetro, di spessore compreso fra il decimo di millimetro e qualche millimetro (Fig. 2.32).

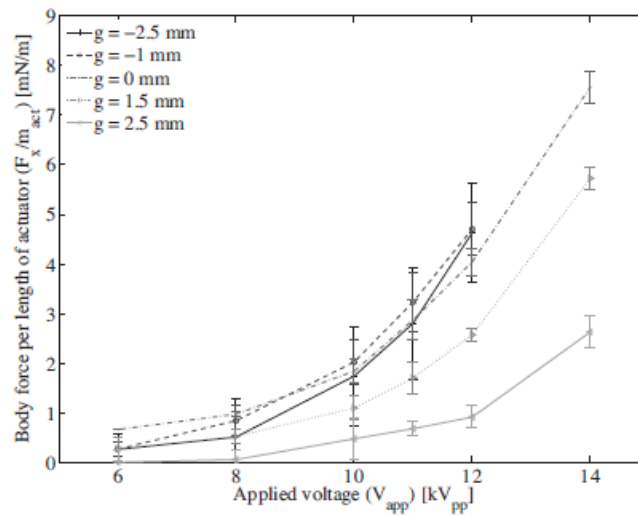
Il primo parametro analizzato è la distanza fra gli elettrodi (*electrode gap*): quando vi è sovrapposizione degli elettrodi tale grandezza è considerata negativa. In Fig. 2.44 si può osservare che la velocità massima indotta dal DBD è ottimale per una distanza compresa fra 0 e 5 millimetri. Oltre tale distanza la velocità indotta diminuisce perché il campo elettrico si affievolisce, dal momento che aumenta lo spessore effettivo fra i due elettrodi. Anche per una distanza negativa vi è uno scadimento delle prestazioni: tale effetto però è strettamente legato al fatto che non vi è abbastanza spazio per il plasma per completare la sua espansione, a causa della limitata lunghezza degli elettrodi utilizzati in questo lavoro ( $L = 5 \text{ mm}$ ) [58]. In generale, supponendo di utilizzare un elettrodo inferiore sufficientemente lungo, la scelta di una distanza negativa fra gli elettrodi (*overlap*), tipicamente nell'ordine del millimetro o di una sua frazione, non crea una riduzione delle prestazioni, ma anzi favorisce una maggiore uniformità del plasma lungo l'apertura del DBD ([63]), motivo per cui è una configurazione largamente utilizzata. Tali considerazioni vengono confermate dalle misure della forza indotta dal DBD, presentate in Fig. 2.45: si può osservare che la *body force* aumenta con la tensione per ogni distanza fra gli elettrodi provata; in aggiunta, appare evidente come l'utilizzo di un *gap* nullo o negativo apporti effetti benefici. Si nota infine che alle tensioni più elevate non sono presenti misure per configurazioni a distanza negativa: il motivo è legato al fatto che tali configurazioni incrementano il valore della componente capacitiva della corrente che scorre attraverso il dielettrico, causando un aumento di potenza dissipata, che può portare alla distruzione del dielettrico stesso alle tensioni più elevate.

Il secondo parametro analizzato è la lunghezza dell'elettrodo inferiore: questa deve essere sufficientemente elevata in modo da non limitare l'espansione del plasma, che per ragioni fisiche non può proseguire oltre l'estremità dell'elettrodo inferiore; infatti la velocità indotta aumenta con l'estensione del plasma. In Fig. 2.46 si può osservare un comportamento asintotico della velocità indotta dal DBD al variare della lunghezza dell'elettrodo inferiore: da una parte l'elettrodo dev'essere sufficientemente lungo da non limitare l'espansione del plasma, dall'altra, per ragioni di spazio e di potenza dissipata, è conveniente che non sia esageratamente lungo, anche perché l'estensione del plasma raggiunge al massimo 2 centimetri. Sempre per quanto riguarda l'elettrodo inferiore, il suo incapsulamento con materiale isolante, per evitare la formazione di plasma, ha effetti benefici in termini di efficienza elettromeccanica, come si può vedere in Fig. 2.47.

Altri parametri molto importanti per il funzionamento ottimale dell'at-

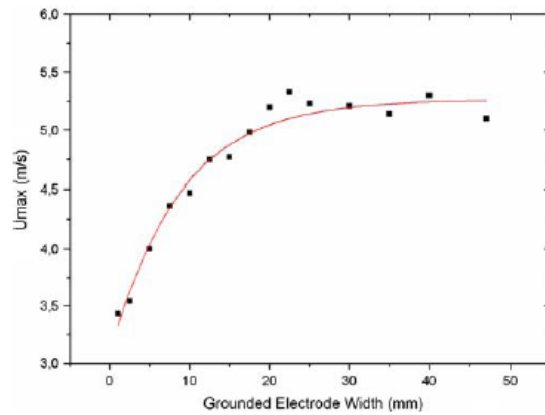


**Figura 2.44:** Velocità indotta al variare della distanza fra gli elettrodi [ $V = 20 \text{ kV}$ ,  $f = 700 \text{ Hz}$ , lunghezza elettrodi  $L = 5 \text{ mm}$ ]. [58]

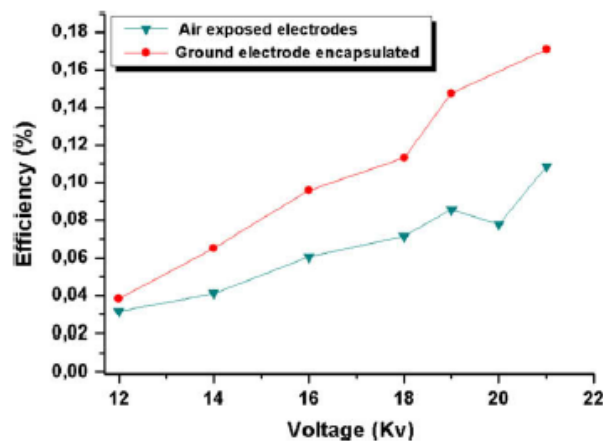


**Figura 2.45:** *Body force* al variare della tensione e della distanza fra gli elettrodi. [59]

tuatore sono lo spessore e il materiale del dielettrico. In generale, a tensione fissata, produce più velocità e spinta un DBD con dielettrico sottile e costante dielettrica ( $\epsilon$ ) più elevata (ossia un materiale meno isolante), in quanto il campo elettrico prodotto dagli elettrodi è maggiore. Un esempio è riportato in Fig. 2.48, dove viene misurata la velocità massima indotta dal DBD al variare della tensione per tre diversi spessori del dielettrico. Al contempo, tuttavia, un attuttore con dielettrico sottile e costante dielettrica elevata sa-



**Figura 2.46:** Velocità indotta al variare della lunghezza dell'elettrodo inferiore [ $V = 20 \text{ kV}$ ,  $f = 700 \text{ Hz}$ ,  $gap \text{ } d = 0 \text{ mm}$ ]. [58]

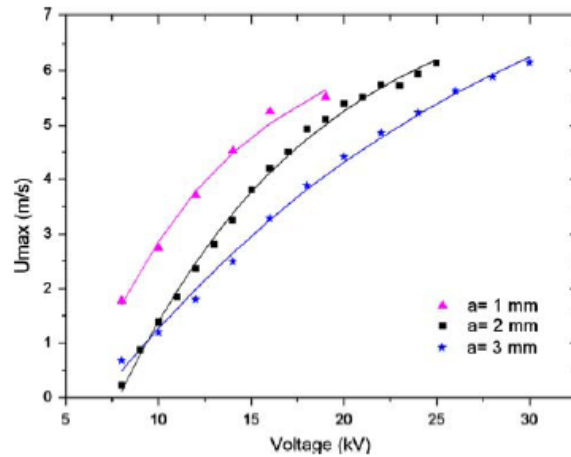


**Figura 2.47:** Efficienza elettromeccanica al variare della tensione per due configurazioni dell'elettrodo inferiore (esposto all'aria e incapsulato). [48]

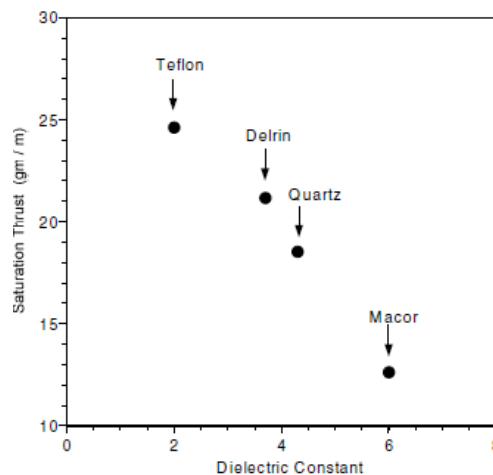
tura<sup>6</sup> a tensioni inferiori rispetto a un DBD con dielettrico più spesso e più isolante. Dal momento che, utilizzando un dielettrico più spesso e più isolante, è possibile raggiungere tensioni maggiori senza arrivare a saturazione, e poiché le prestazioni del DBD aumentano con la tensione (almeno fino a saturazione), è evidente che è meglio utilizzare una configurazione del genere. A conferma di ciò, in Fig. 2.49 è rappresentato il valore della spinta a cui

<sup>6</sup>Come già accennato nella Sez. 2.2.1 la saturazione di un DBD comporta la comparsa di filamenti intensi nel plasma e uno scadimento delle prestazioni oltre una certa soglia di tensione di alimentazione. Aumentare ulteriormente la tensione oltre a tale soglia non comporta nessun beneficio e rischia anzi di compromettere l'integrità dell'attuatore.

avviene la saturazione per diversi materiali dielettrici.

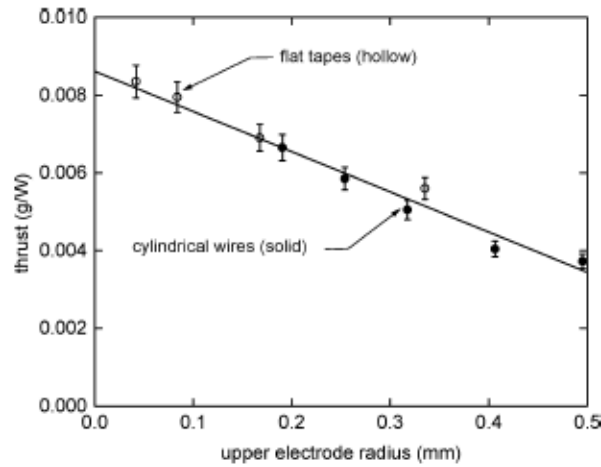


**Figura 2.48:** Velocità indotta al variare della tensione e dello spessore del dielettrico [lunghezza elettrodi  $L = 20 \text{ mm}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $gap \ d = 0 \text{ mm}$ , materiale dielettrico PMMA]. [58]



**Figura 2.49:** Valore della spinta a cui avviene la saturazione per diversi tipi di dielettrico [spessore 6,35 mm]. [64]

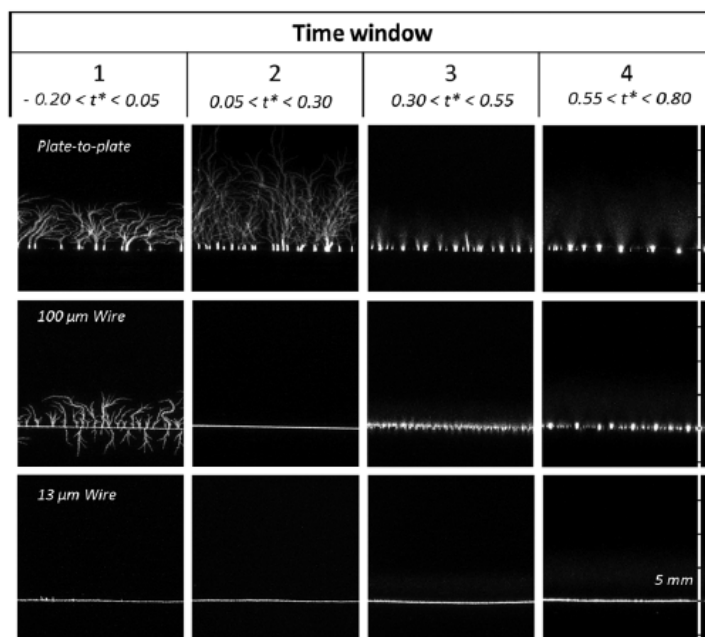
Infine, gli ultimi parametri considerati sono lo spessore e la forma dell'elettrodo esposto. Per quanto riguarda il primo, è ormai assodato che uno spessore inferiore (sia nel caso di elettrodo piano sia nel caso di elettrodo cilindrico) migliora le prestazioni dell'attuatore, in particolare il trasferimento di quantità di moto al fluido e quindi la spinta, come si può vedere in Fig. 2.50.



**Figura 2.50:** Spinta prodotta al variare dello spessore dell'elettrodo esposto, sia esso di forma cilindrica o piana. [60]

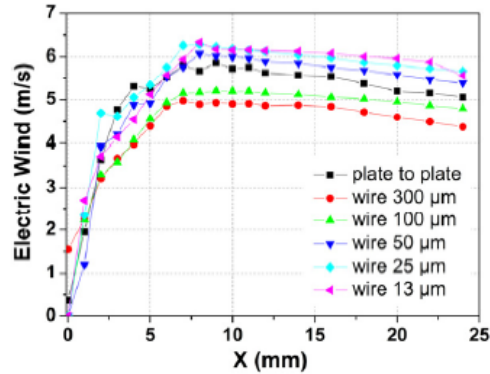
Per quanto riguarda la forma geometrica dell'elettrodo invece sono state proposte diverse alternative. In primo luogo è stato operato un confronto fra una geometria cilindrica e una piana per l'elettrodo esposto, ossia sono state comparate le prestazioni indotte da un elettrodo costituito da una lamina, che è la configurazione più diffusa, e da un filo. Se da una parte Van Dyken e i suoi colleghi in [65] hanno dichiarato l'assoluta superiorità di un elettrodo piano rispetto a uno cilindrico, i gruppi di lavoro di Hoskinson ([66]) e di Debien ([42]) hanno argomentato efficacemente il contrario, asserendo che l'utilizzo di fili molto sottili (diametro inferiore a  $150 \mu\text{m}$  secondo [66]) permette di limitare o addirittura eliminare del tutto la comparsa del regime filamentario e degli *streamer* durante il semi-ciclo positivo della tensione (Sez. 2.2.1), che abbiamo visto essere meno performante in termini di produzione di velocità e forza. Al posto del regime filamentario, è presente una scarica molto uniforme e stazionaria, simile a una corona positiva, che a differenza degli *streamer* non si accende ed estingue più volte durante il semi-ciclo positivo. In Fig. 2.51 si può osservare come l'utilizzo del filo più sottile elimini del tutto la comparsa degli *streamer* durante il semi-ciclo positivo e renda la scarica molto più uniforme anche durante quello negativo. Questo si traduce in un miglioramento delle prestazioni del DBD, come si può osservare in Fig. 2.52, poiché in questo modo anche il semi-ciclo positivo contribuisce in maniera consistente ad accelerare il fluido e produrre spinta (Debien dimostra addirittura che la velocità massima è prodotta durante il semi-ciclo positivo). In Fig. 2.53, infine, si può osservare che l'efficienza elettromeccanica aumenta al diminuire del diametro dell'elettrodo e che un elettrodo cilindrico è da

preferirsi a uno piano in particolare a basse tensioni di alimentazione. In [66] inoltre viene affermato che, utilizzando elettrodi piani, le prestazioni migliorano, e in particolare aumenta la forza prodotta senza richiedere un aumento di potenza, diminuendo la lunghezza dell'elettrodo esposto.

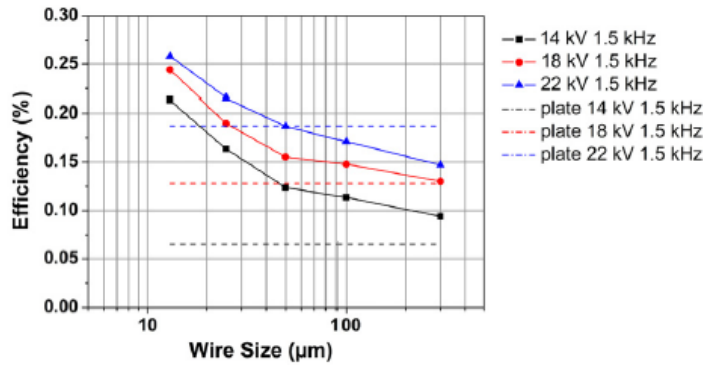


**Figura 2.51:** Confronto fra diversi regimi di scarica utilizzando elettrodi piani e cilindrici. Dall'alto in basso, l'elettrodo esposto è una lamina piana ( $80 \mu\text{m}$  di spessore) e un filo ( $100 \mu\text{m}$  e  $13 \mu\text{m}$  di spessore, rispettivamente). Il tempo di esposizione è di  $166 \mu\text{s}$  e la scarica è alimentata con tensione sinusoidale a  $22 \text{ kV}$  e  $1 \text{ kHz}$ . Le prime due immagini per ogni riga si riferiscono al semi-ciclo positivo, le ultime due a quello negativo. [42]

In secondo luogo, sono state proposte geometrie più elaborate per l'elettrodo esposto, per ottenere diversi scopi. In [67] gli autori propongono una geometria degli elettrodi a ferro di cavallo o a serpentina (Fig. 2.54a), in modo da favorire perturbazioni pienamente tridimensionali nel fluido e di utilizzare questo attuatore per diverse applicazioni di *flow control*, quali il riattacco e la transizione dello strato limite. In [64], [68], [69] e [70] invece viene proposta una geometria seghettata (*serrated edge*) per l'elettrodo esposto (Fig. 2.54b), un'idea che è stata ripresa, sviluppata e ottimizzata in questo lavoro di tesi, dove, oltre che a un DBD, viene applicata per la prima volta anche a un attuatore a corona. La motivazione fisica alla base di questa configurazione è molto semplice: dal momento che l'estremità dell'elettrodo esposto è una superficie isopotenziale, una geometria seghettata consente di



**Figura 2.52:** Velocità indotta misurata al variare della distanza dall'elettrodo esposto per  $y = 0.9 \text{ mm}$ , dove la velocità è massima e per diverse geometrie dell'elettrodo esposto. [ $V = 22 \text{ kV}$ ,  $f = 1.5 \text{ kHz}$ ] [42]

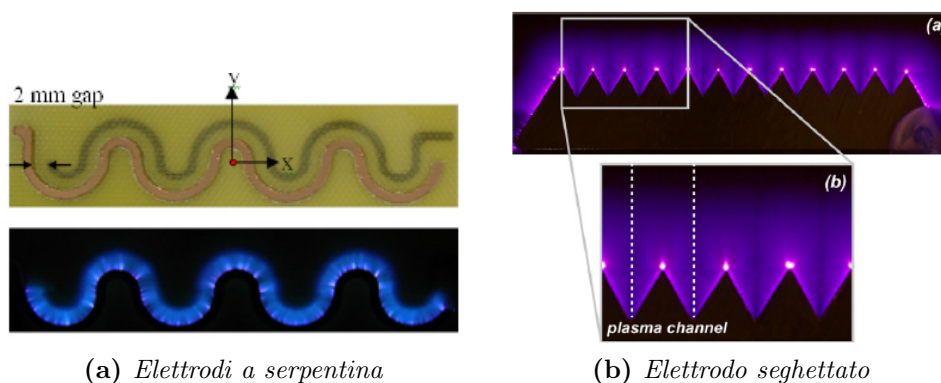


**Figura 2.53:** Efficienza elettromeccanica al variare del diametro dell'elettrodo e per differenti tensioni. [42]

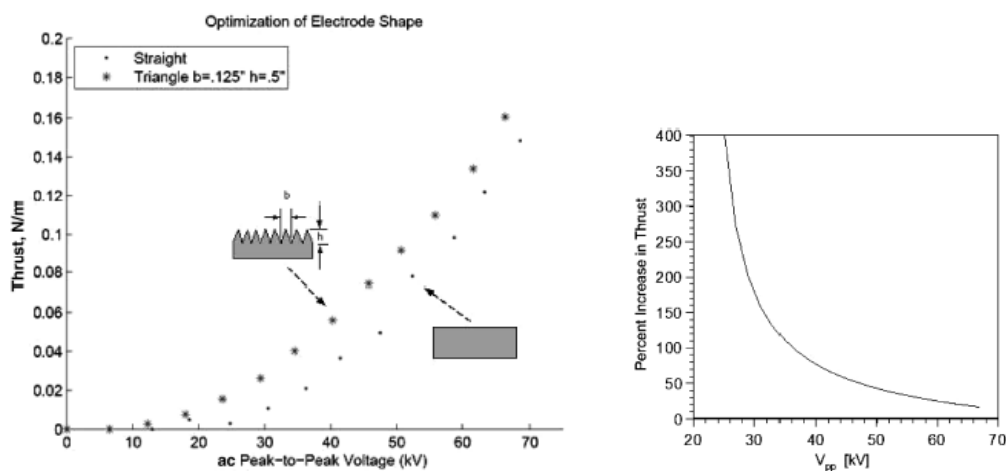
aumentare localmente il campo elettrico applicato, e questo ha effetti benefici sulla *body force* prodotta dall'attuatore rispetto a una configurazione tradizionale, come si può notare in Fig. 2.55a. Inoltre, la particolare geometria dell'elettrodo esposto favorisce la nascita di componenti trasversali della velocità, motivo per cui questi DBD si comportano in maniera analoga a dei generatori di vortici. Si può affermare in generale che l'utilizzo di una geometria seghettata permette di ottenere una spinta maggiore a pari tensione applicata rispetto a un DBD tradizionale, in particolare alle basse tensioni; inoltre la tensione di accensione del plasma è minore. Tuttavia, l'efficacia di questa geometria innovativa rispetto a quella tradizionale si riduce alle tensioni più alte (Fig. 2.55b), in quanto è stato scoperto sperimentalmente ([64]) che  $T \propto V^{2.3}$  con questa configurazione, invece di  $T \propto V^{3.5}$  come nel caso



base, dove  $T$  è la spinta e  $V$  la tensione. Inoltre, questa geometria induce un consumo di potenza leggermente maggiore, probabilmente perché aumenta l'estensione del plasma a pari tensione applicata ([70]).



**Figura 2.54:** Attuatore con elettrodi a serpentina ([67]) e con elettrodo seghettato ([70]).



**Figura 2.55:** Confronto fra spinta prodotta da un DBD tradizionale e uno con geometria seghettata (rapporto fra altezza e larghezza delle punte pari a 4) al variare della tensione e incremento percentuale della spinta rispetto alla configurazione tradizionale. [64]

### Ottimizzazione dei parametri elettrici

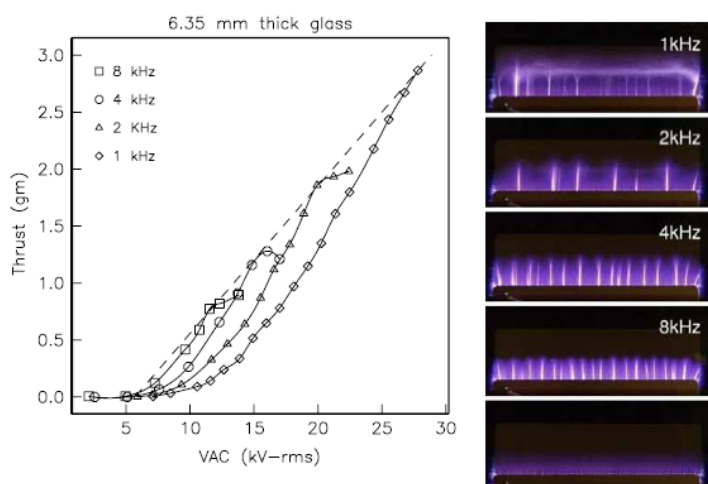
La tensione tipicamente applicata per operare un attuttore DBD ha forma sinusoidale, ampiezza dell'ordine del chilovolt o delle decine di chilovolt e frequenza dell'ordine del kilohertz o delle decine di kilohertz.

Il primo parametro su cui si può agire è la forma d'onda della tensione. Il risultato più immediato è che l'onda quadra è la meno efficiente per produrre plasma, in quanto il valore della tensione è costante per la maggior parte del periodo e l'accensione del plasma è concentrata unicamente quando cambia il valore della tensione ([65]). Molti studi si sono concentrati sulla ricerca di una forma d'onda ottimale ([71] e [72] su tutti), che massimizzi il tempo in cui il plasma è presente e favorisca il regime *glow* rispetto a quello filamentario. E' evidente che tale forma d'onda debba essere asimmetrica per soddisfare quest'ultimo requisito. La forma d'onda ottimale secondo la maggior parte degli studi ([45], [65] e [71]) è il dente di sega in cui il tratto inclinato ha pendenza negativa (*negative sawtooth*), la quale induce un flusso a parete più regolare e con velocità maggiori rispetto a tutte le altre forme d'onda.

Il secondo parametro, e sicuramente il più importante, è l'ampiezza della tensione: abbiamo già visto più volte che le prestazioni dell'attuttore aumentano considerevolmente all'aumentare della tensione (per esempio la spinta,  $T \propto V^{3.5}$  [45]), almeno fino a saturazione dove un ulteriore aumento di tensione non produce un ulteriore aumento di prestazioni.

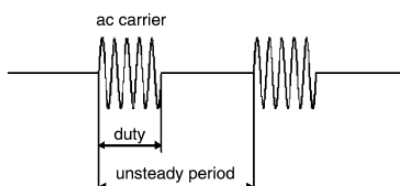
Infine, consideriamo gli effetti della frequenza: se da una parte, a pari tensione, aumentare la frequenza aumenta la spinta prodotta, dall'altra un aumento della frequenza abbassa la tensione a cui avviene la saturazione e pertanto impedisce di raggiungere prestazioni ottimali (Fig. 2.56).

Per concludere questa sezione è opportuno parlare di attuazione instazionaria, una modalità innovativa di utilizzo dei DBD che recentemente ha ottenuto dei risultati particolarmente significativi in molte applicazioni di *flow control*. Volendo essere precisi, anche la modalità tradizionale di utilizzo del DBD è instazionaria, poiché abbiamo visto che la tensione di alimentazione è un segnale periodico con una certa frequenza (generalmente dell'ordine del kilohertz), la quale però è tipicamente ben superiore alle frequenze caratteristiche di risposta del fluido, per cui macroscopicamente la *body force* può essere ritenuta costante. Con l'attuazione instazionaria il segnale di tensione ad alta frequenza viene acceso e spento con una frequenza decisamente inferiore (Fig. 2.57), generalmente dell'ordine dell'herz o delle decine di hertz, in modo da eccitare in maniera controllata alcune instabilità del fluido. Generalmente sono sufficienti, per ottenere effetti analoghi a quelli ricavati con l'attuazione stazionaria, *duty cycle* molto ridotti, anche inferiori al 10%, permettendo in questo modo grandi risparmi in termini di potenza



**Figura 2.56:** Forza prodotta dal DBD al variare di tensione e frequenza (*sinistra*) e immagini del plasma a saturazione a diverse frequenze (*destra*). Si nota la comparsa filamenti sempre più numerosi e intensi all'aumentare della frequenza. [45]

(un *duty cycle* del 10% permette di risparmiare il 90% di potenza rispetto all'attuazione stazionaria).

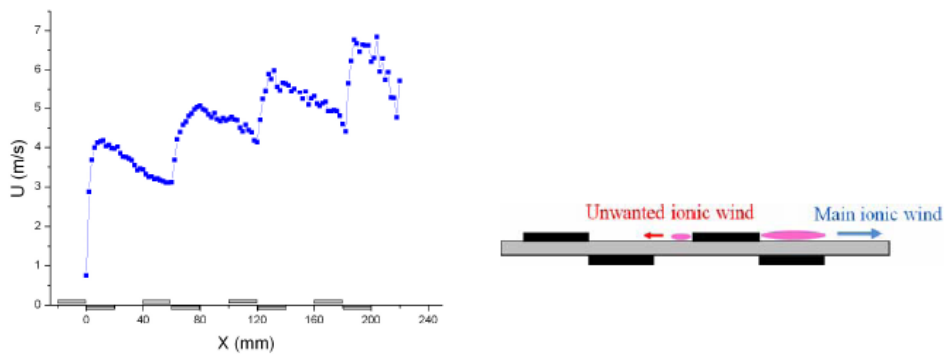


**Figura 2.57:** Schema del segnale di alimentazione *unsteady*. [73]

### DBD multipli

L'ultima possibilità presentata per incrementare le prestazioni dei DBD è quella costituita dall'utilizzo di due o più attuatori in serie, posti uno dopo l'altro nella direzione del flusso (DBD multipli). Ogni attuttore ha un effetto additivo sulla velocità e pertanto, sotto opportune condizioni, si possono raggiungere velocità superiori rispetto al singolo attuttore (Fig. 2.58a). Il problema maggiore legato a questa configurazione è l'interazione fra due DBD successivi (*cross talk*), studiata approfonditamente da Do in [74], che causa una ionizzazione parassita in corrispondenza dell'estremità a monte dell'elettrodo esposto del secondo attuttore, la quale a sua volta induce un

vento elettrico indesiderato diretto a monte, e che quindi si oppone alla corrente media, facendola decelerare (Fig. 2.58b). Per limitare questo aspetto è possibile isolare l'estremità posteriore dell'elettrodo esposto del secondo DBD con un nastro di Teflon ([75]) oppure utilizzare una configurazione innovativa a tre elettrodi ([76]) in cui il terzo elettrodo funge da schermo in grado di limitare o impedire la ionizzazione parassita.



(a) Velocità indotta da quattro attuatori in serie.

(b) Ionizzazione parassita.

**Figura 2.58:** Velocità indotta da quattro attuatori in serie e ionizzazione parassita. [75]

## 2.2.4 Dipendenza dagli agenti esterni

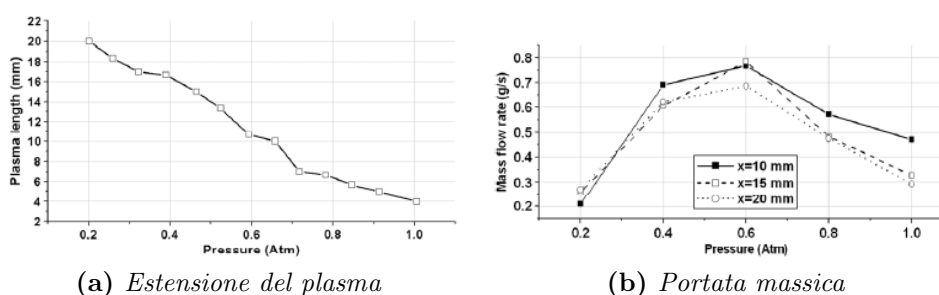
In questa sezione vengono riportati i più significativi risultati ottenuti sulla dipendenza delle prestazioni del DBD dalle condizioni esterne, come per esempio pressione e umidità. Tali studi sono particolarmente importanti poiché questi attuatori devono essere montati su velivoli e pertanto la loro effettività dev'essere provata anche a condizioni corrispondenti a quelle della quota di crociera.

Viene analizzata in primo luogo la dipendenza dalla pressione che, com'è noto, in quota diminuisce, fino ad arrivare, alle tipiche quote di crociera dei velivoli commerciali, anche a meno del 25% di quella a livello del mare. Come riportato in [77], l'estensione del plasma e la potenza consumata aumentano monotonamente al diminuire della pressione, mantenendo costante la tensione (Fig. 2.59a). Allo stesso tempo le velocità indotte aumentano fino a una pressione di 0.6 atm, per poi diminuire ad un'ulteriore diminuzione della pressione. Per valutare l'effettività del DBD si può calcolare la portata

massica a partire dai profili di velocità misurati:

$$Q = \rho l \int_0^{\infty} u(y) dy \quad (2.34)$$

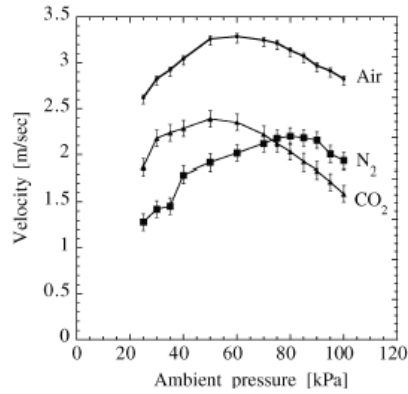
I risultati ottenuti da Benard in [77] sono riportati in Fig. 2.59b che conferma il fatto che l'attuatore funziona in maniera ottimale a una pressione di  $0.6 \text{ atm}$ . Il motivo di tale comportamento potrebbe essere legato al fatto che a tale pressione si verifica il miglior compromesso fra l'aumento di ionizzazione (e il conseguente aumento di estensione del plasma) e la diminuzione di densità, che riduce il numero di collisioni con le particelle neutre. Risultati



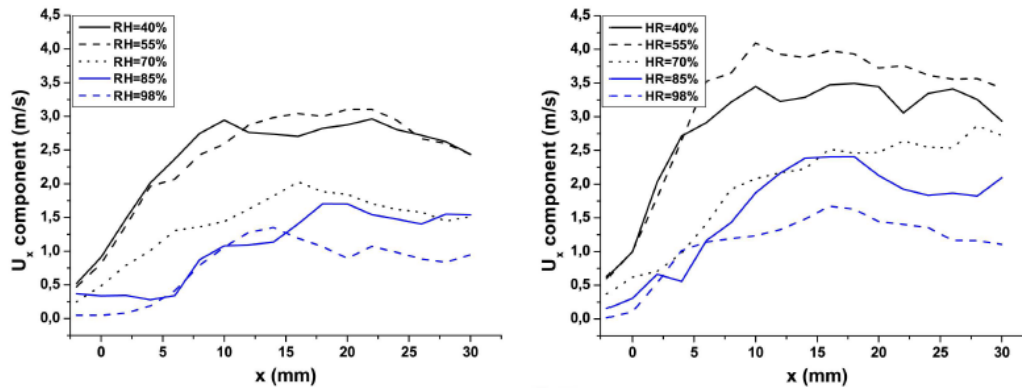
**Figura 2.59:** Estensione del plasma e portata massica per diverse distanze dall'elettrodo esposto, al variare della pressione. [77]

analoghi sono stati ottenuti anche da Abe in [78], in cui l'analisi viene estesa anche a gas differenti dall'aria. A differenza che nell'articolo di Benard, viene misurata anche la forza indotta dall'attuatore al variare della pressione, la quale ha un comportamento simile alla velocità, sebbene il massimo sia localizzato intorno a  $0.7 \text{ atm}$ . Inoltre, l'aria, rispetto agli altri gas utilizzati (azoto e anidride carbonica), produce le prestazioni migliori, sia in termini di forza, sia di velocità (Fig. 2.60), grazie alla presenza dell'ossigeno, che, a seguito della ionizzazione, tende ad attrarre elettroni e a formare ioni negativi, che hanno effetti benefici per quanto riguarda il funzionamento del DBD.

Infine, viene considerata la dipendenza dall'umidità, analizzata in [79] e [80]. In quest'ultimo articolo viene dimostrato che il DBD, a differenza dell'attuatore a corona, può essere utilizzato anche per valori di umidità relativa molto alti (fino al 98%), sebbene si verifichi una riduzione dell'effettività nel trasferimento di quantità di moto al crescere dell'umidità, in particolare per valori superiori al 70%, riduzione che tuttavia può essere compensata semplicemente aumentando la tensione (Fig. 2.61).



**Figura 2.60:** Velocità indotta dal DBD al variare della pressione per differenti gas. [78]



**Figura 2.61:** Velocità orizzontale indotta dal DBD al variare della distanza dall'elettrodo, per differenti valori di umidità relativa. La velocità è misurata a  $y = 0,3$  m da parete; (*sinistra*)  $V = 18$  kV, (*destra*)  $V = 20$  kV. [80]

# Capitolo 3

## Set-up sperimentale

In questo capitolo viene descritto il set-up delle prove sperimentali svolte: queste consistono in visualizzazioni per caratterizzare il funzionamento degli attuatori, e in particolare la loro efficacia nel posticipare lo stallo di un profilo ad alti angoli di incidenza, e in pesate per ricavare le curve di portanza di un profilo, per diverse configurazioni geometriche degli attuatori, sia corona sia DBD.

### 3.1 Gallerie del vento

Le prove sperimentali, ossia le visualizzazioni e le pesate, sono state eseguite in due gallerie del vento differenti. Le prime sono state svolte nella galleria per visualizzazioni a fili di fumo collocata presso il laboratorio di Aerodinamica: questa galleria è un modello tedesco della ditta Elektron, progettata dall'Ing. Herbert Brause e, sebbene non sia di recente concezione (1975 circa), presenta una notevole cura nei dettagli. 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. Come si può notare in Fig. 3.1, sebbene la galleria sia a 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 vaporizzazione di olio di paraffina), ricordiamo anche che il funzionamento degli attuatori genera ozono, gas dannoso se respirato in concentrazione superiore a  $0.2 \text{ mg/m}^3$ .

Le dimensioni della camera di prova sono:



**Figura 3.1:** Galleria del vento per visualizzazioni.

- Lunghezza: 525 mm
- Spessore: 34 mm
- Altezza: 343 mm

L'accesso alla camera di prova è consentito dalla mobilità della parete posteriore della camera di prova, incernierata alla struttura della galleria. Originariamente questo pannello era fatto in acciaio, quindi incompatibile con applicazioni al plasma; per la sua tesi, Bogani ([81]) ha realizzato una corrispondente versione in plexiglass, sulla quale è installata una base rotante in policarbonato che può ruotare rispetto al fondo della galleria e permette di variare l'incidenza del profilo.

Il tipo di aspirazione a fondo galleria è completamente diverso dai tunnel classici: è un sistema ad alta perdita di carico basato su fori d'uscita dalla camera di prova. La posizione dei fori è calibrata per uniformare la corrente in camera di prova sull'asse verticale, strati limite esclusi. Il limite di questo metodo è la bassa velocità (o Reynolds) raggiungibile. Sul piano trasversale, si ha un flusso di Poiseuille; sul piano longitudinale, invece, vi è una discreta uniformità per 0.8 lunghezze, oltre la quale l'effetto dei fori aspiranti diviene preponderante. In definitiva, l'uniformità è buona in una larga regione della camera di prova, la stazionarietà è veramente buona solo col ventilatore al massimo, il livello di turbolenza è limitato dal sistema di aspirazione che è stato ben curato, ma peggiora un po' per effetto del *rake* di distribuzione fumi. Poiché lo scopo di questa galleria è quello di garantire una buona qualità alle visualizzazioni, è necessario che il flusso attorno al profilo sia il più regolare possibile: a tale scopo la galleria possiede una doppia griglia in serie a monte dell'imbocco di aspirazione.

Il generatore di fumo è costituito da una base metallica cava e da un cilindro

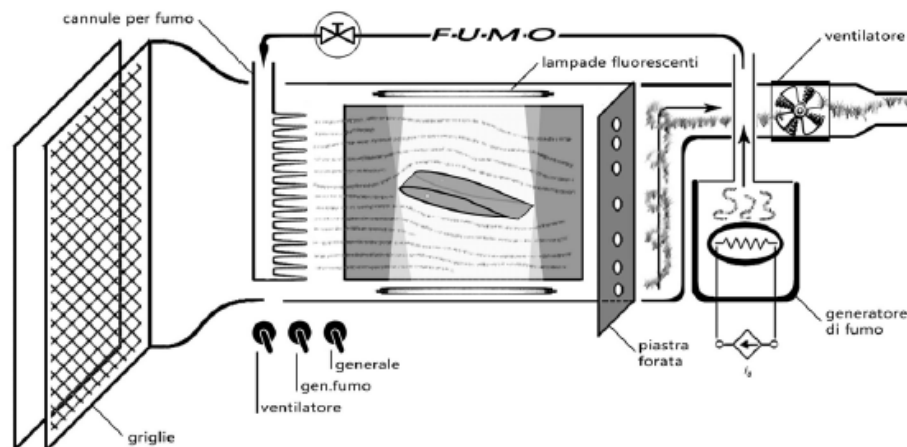


di vetro chiuso superiormente da una piastra. All'interno della base vi è un disco di ferro, contenente *a sandwich* una resistenza che ne genera il surriscaldamento. Il coperchio ha un piccolo serbatoio che regola la caduta delle gocce d'olio di paraffina sul disco caldo, dal quale si libera il fumo che a sua volta viene pompato nelle cannule in camera di prova. Delle lampade fluorescenti rendono quindi visibili i fili di fumo, costituiti da gocce condensate di olio di paraffina ( $1 \mu m$  di diametro medio).

La galleria ha richiesto un frequente lavoro di manutenzione e pulizia, in quanto le cannule per il fumo tendono facilmente a intasarsi. Inoltre anche il generatore di fumo è stato smontato, pulito accuratamente e rimontato per consentire un miglior utilizzo della galleria.

L'alimentazione della galleria è fornita dalla linea elettrica standard ( $220 V$ ). Poiché l'intensità di corrente dichiarata è di  $1.7 A$ , la potenza assorbita dalla galleria è circa  $370 W$ . In precedenti lavori ([82]) è stato verificato che la velocità massima in centro vena, dopo che l'impianto è andato a regime, si attesta a  $1.35 m/s$ .

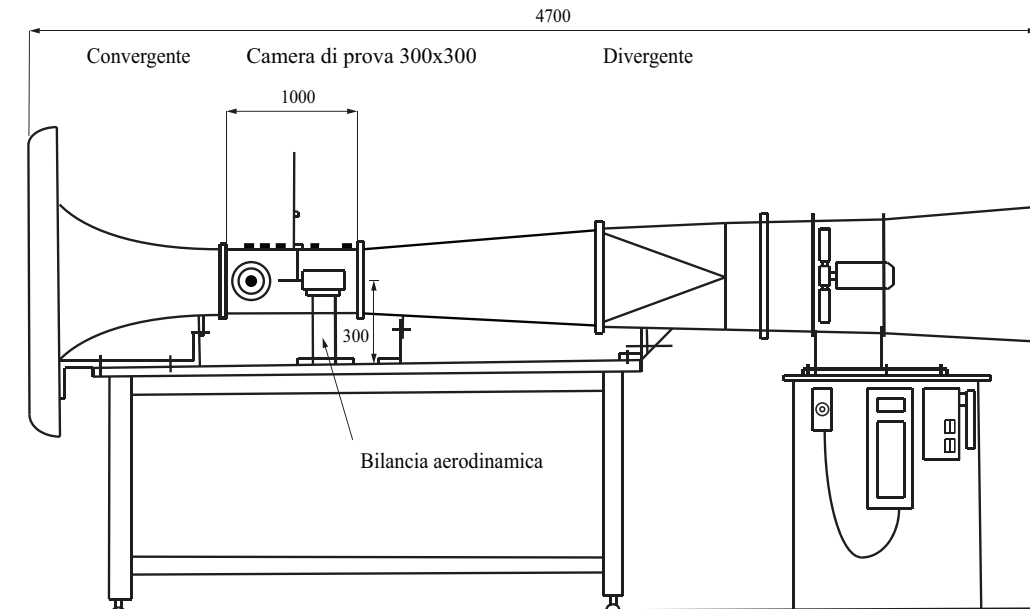
Le pesate sono state effettuate nella galleria del vento didattica a circuito



**Figura 3.2:** Schema della galleria del vento per le visualizzazioni. [82]

aperto, modello EA103 della Deltalab, collocata presso il laboratorio didattico CLASD, una cui rappresentazione schematica è disponibile in Fig. 3.3. La camera di prova è lunga  $1 m$  e la sezione misura  $300 \times 300 mm^2$ . Il convergente ha un alto rapporto di contrazione e assicura un'ottima qualità di vena in camera di prova, anche grazie a un filtro di protezione collocato all'ingresso della galleria, che ha lo scopo di attenuare eventuali disomogeneità del flusso. Il divergente è connesso al ventilatore, la cui velocità è regolabile in modo da poter modificare la velocità del flusso in galleria, attraverso connessioni

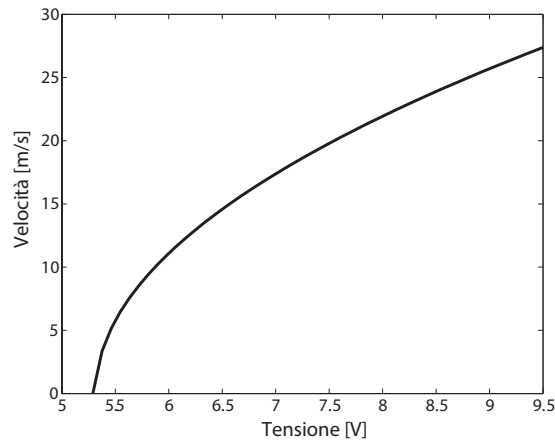
flessibili, per assorbire le vibrazioni dovute al gruppo motore. La massima velocità in camera di prova è di  $40 \text{ m/s}$  e la potenza assorbita dal motore è di  $4 \text{ kW}$ .



**Figura 3.3:** Schema della galleria del vento per le pesate. [83]

#### Taratura della galleria

La velocità in camera di prova è regolabile attraverso una manopola di controllo e misurabile grazie a un tubo di Pitot, collegato a un trasduttore di pressione differenziale. Un altro trasduttore di pressione è collegato a una presa statica a parete. Lo scopo della taratura è quello di poter ottenere le misure di velocità in galleria solamente attraverso la presa a parete, poiché durante le prove con gli attuatori è necessario rimuovere il tubo di Pitot per evitare interferenze aerodinamiche ed elettriche. Il procedimento è molto semplice: abbiamo acquisito i segnali di tensione in uscita ai due trasduttori per diverse regolazioni della manopola di controllo, in assenza del profilo in galleria. Conoscendo le costanti di taratura dei due trasduttori appositamente calibrati per questa serie di prove, abbiamo correlato il valore di tensione corrispondente alla presa statica con il valore di pressione dinamica misurato attraverso il Pitot, e quindi con la velocità in galleria (Fig. 3.4).



**Figura 3.4:** Curva di taratura velocità - tensione.

## 3.2 Profili

In questa sezione vengono descritti il progetto e la realizzazione del profilo NACA0015 utilizzato per le prove di pesata in galleria del vento e viene brevemente descritto il profilo NACA0013 per la galleria a fili di fumo già precedentemente realizzato per la tesi di Bogani [81].

La scelta è ricaduta su un profilo NACA0015 soprattutto per la possibilità di un confronto con i risultati disponibili in letteratura, dove è il profilo di gran lunga più utilizzato.

Nonostante fosse già a disposizione un profilo NACA0015 in galleria del vento, è stata necessaria la realizzazione di un nuovo profilo pensato *ad hoc* in maniera tale da assolvere al meglio gli scopi prefissati. Lasciando inalterate le dimensioni di corda e apertura del modello già esistente ( $c = 100 \text{ mm}$  e  $b = 292 \text{ mm}$ ), la modifica principale riguarda il dorso del profilo: poiché gli attuatori hanno uno spessore non trascurabile ( $150\text{-}200 \mu\text{m}$ ), è stata pensata la realizzazione di una cava di  $0.7 \text{ mm}$  di profondità sul dorso del profilo per permetterne l'alloggiamento, cercando di ridurre al minimo il disturbo dell'aerodinamica da parte degli attuatori stessi. L'estensione in corda della cava è stata pensata in maniera tale da far sì che l'anodo si trovasse quanto più possibile in prossimità del punto di separazione allo stallo che, da un'analisi preliminare effettuata con X-foil per condizioni simili a quelle delle prove, è risultato essere compreso tra il 3% e l'8% della corda, quindi in prossimità del bordo d'attacco. Tuttavia, per problemi di tipo realizzativo, in quanto in tale posizione la curvatura del profilo è ancora troppo elevata, non è stato possibile allocare l'inizio della cava in tale posizione e si è deciso di spostarla al 10% della corda, con un'estensione fino al 70% per permettere l'alloggiamento

dell'attuatore.

Importante nella realizzazione del profilo è stata la scelta del materiale, in quanto è stato necessario soddisfare due specifiche: buon isolamento elettrico e facile realizzabilità attraverso la fresa a controllo numerico. Le elevate tensioni in gioco richiedono infatti che il materiale impiegato sia isolante: un buon compromesso è stato possibile scegliendo l'UREOL, una tipologia di poliuretano espanso. Tra i diversi tipi di UREOL a disposizione è stato scelto il meno poroso per limitare l'assorbimento di umidità, che avrebbe potuto inficiare le caratteristiche isolanti del materiale.

Per permettere l'alloggiamento del profilo sulla bilancia, è stata realizzata una bacchetta in acciaio attraverso lavorazione al tornio, inserita nel profilo per una profondità di 60 *mm* e fissata con una colla epossidica a due componenti per impedire che il profilo vi ruotasse attorno una volta in galleria.

Infine, è stato necessario provvedere alla realizzazione di due *end plates*, utili a limitare gli effetti di bordo. Sebbene anche questi fossero già disponibili, la loro composizione in metallo non li rendeva particolarmente indicati per le applicazioni previste, dunque sono stati ricavati *ex novo* da un foglio di plexiglass di spessore 1.7 *mm*. I disegni di progetto del profilo, della bacchetta e degli *end plates* sono riportati in App. C.

Per le visualizzazioni è stato utilizzato il NACA0013 progettato e realizzato da Bogani per la sua tesi ([81]). Grazie alla simmetria del NACA0013 è possibile verificare l'angolo di incidenza nulla in base alla visualizzazione delle linee di corrente. Lo spessore massimo è stato limitato a 20 *mm* per limitare gli effetti di bloccaggio, pertanto la corda misura 153.8 *mm*. Anche su questo profilo è stata realizzata una cava sul dorso per permettere l'alloggiamento dell'attuatore, la quale si estende dall'8% all'83% della corda. Il profilo è stato ricavato da un blocco a strati policarbonato-resina epossidica ed ha un'apertura di 30 *mm*.



**Figura 3.5:** Profilo NACA0015 per le prove di pesata.

## 3.3 Attuatori

Gli attuatori, sia di tipo corona (Sez. 3.3.1) sia DBD (Sez. 3.3.2), sono di facile realizzazione, in quanto è sufficiente un foglio di materiale isolante e del nastro di alluminio. Più complicata è l'architettura del circuito di alimentazione, soprattutto nel caso del DBD. Nella sezione 3.3.3 viene presentato lo studio parametrico effettuato sulla geometria degli elettrodi.

Tutti gli elettrodi sono stati realizzati con nastro di alluminio di spessore  $0.12\text{ mm}$  e pertanto sono elettrodi piani. Caratteristica comune ai corona e ai DBD è che le estremità laterali degli elettrodi devono essere arrotondate per prevenire la formazione di archi elettrici indesiderati, in quanto gli spigoli causano un forte incremento locale del campo elettrico. Proprio in base a tale considerazione, e sviluppando il lavoro intrapreso da Bogani ([81]), abbiamo pensato di utilizzare una configurazione a punte per l'anodo (o elettrodo esposto nel caso del DBD): il vantaggio, nel caso di attuatore a corona, è che il campo elettrico viene concentrato in punti preferenziali. Nel caso di DBD, con tale configurazione, oltre alla classica componente longitudinale di velocità indotta dall'attuatore, si genera anche una componente trasversale, che ha effetti benefici sul riattacco dello strato limite (il principio di funzionamento è analogo a quello di un generatore di vortici).

### 3.3.1 Corona

Gli attuatori a corona che abbiamo realizzato sono costituiti da due elettrodi piani, posti su un foglio di materiale isolante: la configurazione scelta è dunque di tipo *plate-to-plate*. Il primo materiale isolante provato è stato l'acetato di cellulosa, del quale, sebbene avesse un buon comportamento in regime *glow*, altrettanto non può essere detto in regime di arco elettrico. Da prove al banco è infatti risultata la perforazione pressoché istantanea del dielettrico all'insorgere dell'arco, probabilmente in seguito ad un aumento locale della temperatura, che rendeva inutilizzabili gli attuatori. La scelta quindi si è spostata sul Kapton.

Nel nostro caso è stata realizzata una scarica a corona positiva applicando un potenziale positivo all'anodo e mettendo a terra il catodo attraverso un generatore di alta tensione in corrente continua, che garantisce un massimo valore di tensione di  $+25\text{ kV}$  e di corrente di  $0.5\text{ mA}$ . La sensibilità originaria del generatore è di  $0.1\text{ kV}$ ; tuttavia l'aggiunta di un commutatore esterno permette una regolazione più fine, così da poter raggiungere la condizione ottimale di plasma uniforme sfruttando il valore massimo di tensione possibile prima della comparsa dell'arco.

Il circuito inoltre prevede l'innesto di un *ballast resistor* (resistenza zavorra)

in serie all'anodo per limitare i picchi di corrente che conducono alla transizione all'arco elettrico (Fig. 2.5). Il valore di tale resistenza è stato scelto dopo diverse prove ed è pari a  $1\text{ M}\Omega$ : l'assenza o l'applicazione di un carico di resistenza inferiore a  $1\text{ M}\Omega$  infatti causava l'insorgere di una scarica altamente instabile, caratterizzata dalla presenza costante dell'arco; *ballast* di entità superiore invece limitavano in maniera eccessiva il passaggio di corrente, non permettendo di raggiungere, per le tensioni massime applicabili, il regime *glow*.

Anche il posizionamento degli elettrodi è stato scelto successivamente a delle prove al banco. La necessità principale era quella di trovare un compromesso ottimale tra estensione del plasma nella distanza *inter-elettrodo*, tensione fornita dal generatore e dimensioni della cava realizzata sul profilo. Le prove svolte hanno riguardato principalmente due distanze tra l'estremità delle punte dell'anodo ed il catodo, che permettessero l'alloggiamento di tutti gli elettrodi realizzati nella cava del profilo:  $10\text{ mm}$  e  $15\text{ mm}$ . Il campo elettrico necessario per la stabilizzazione di un regime di tipo *glow* si assesta attorno ai valori di  $8\text{ kV/cm}$ ; disponendo quindi di un generatore di alta tensione che ci permettesse di raggiungere tensioni ben superiori ai  $15\text{ kV}$ , siamo stati in grado di ottenere tali valori di campo elettrico anche per una distanza pari a  $15\text{ mm}$ . Poiché le dimensioni della cava sul dorso del profilo ce lo consentivano, abbiamo dunque optato per una distanza di  $15\text{ mm}$ , così da avere un'estensione superficiale del plasma più elevata a parità di campo elettrico, rendendo l'attuatore più prestante. L'architettura del circuito è illustrata in Fig. C.4 in App. C.

### 3.3.2 DBD

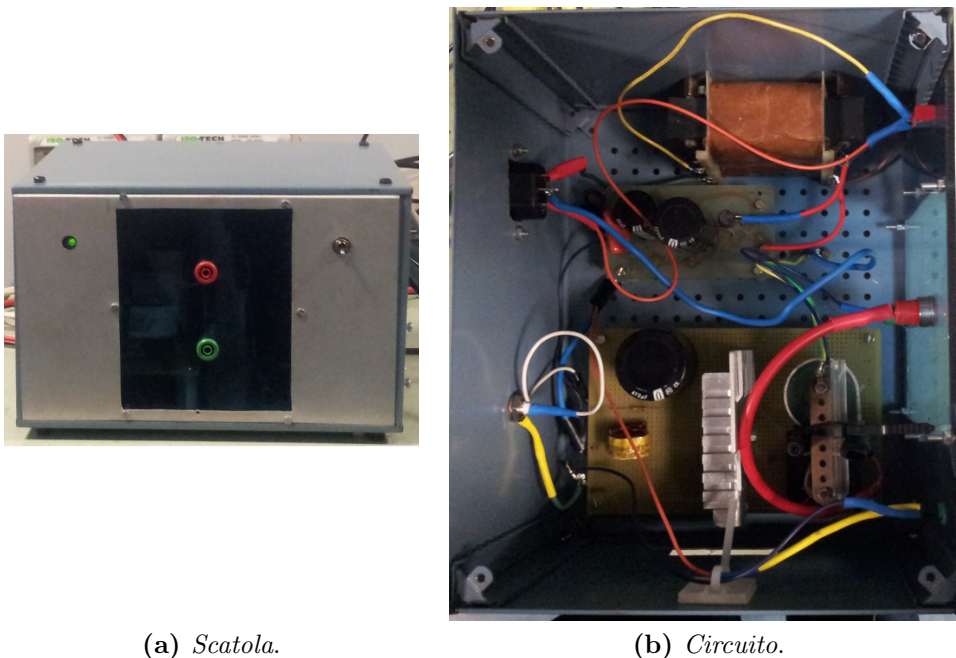
L'attuatore DBD è tipicamente costituito da due elettrodi, posti ai due lati di un foglio di materiale dielettrico. Inizialmente abbiamo utilizzato come dielettrico il lucido per proiettore (acetato di cellulosa,  $\epsilon = 3.2 - 3.9$ ), che però presentava l'inconveniente di perforarsi molto rapidamente, causando quindi il passaggio diretto di corrente fra gli elettrodi tramite l'arco e rendendo inutilizzabile l'attuatore. Tale perforazione del dielettrico, che seppur in maniera molto minore e dopo tempi di utilizzo più lunghi si è presentata anche utilizzando come dielettrico il Kapton (pellicola poliimmide sviluppata dalla DuPont,  $\epsilon = 3.4$ ), è probabilmente legata o a un aumento locale di temperatura o a un valore locale eccessivo del campo elettrico. Personalmente, sebbene il Kapton abbia una temperatura massima di esercizio di  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , propendiamo per la prima ipotesi, in quanto la rigidità dielettrica del Kapton utilizzato è elevatissima e pari a  $177\text{ kV/mm}$ , mentre invece sono sufficienti alcune decine di secondi di utilizzo per scaldare in maniera consistente il die-

lettrico, come ci si può rendere conto al tatto. Tale aumento di temperatura è legato alla potenza elettrica che viene dissipata nel materiale dielettrico; per evitare la rottura dell'attuatore, soprattutto nelle prove al banco in assenza di una corrente fluida esterna che ha un effetto di raffreddamento, è stato necessario evitare tempi di utilizzo continuativo superiori a qualche minuto. Per evitare la formazione di plasma sul lato inferiore del dielettrico, l'elettrodo inferiore è stato inizialmente affiancato e coperto con nastro isolante, con scarsi risultati: il plasma si formava comunque al di sotto del nastro isolante; è stata inoltre valutata la possibilità di utilizzare della colla epossidica bi-componente per ottenere lo stesso effetto, ma tale soluzione è stata scartata perché più laboriosa dal punto di vista realizzativo e non particolarmente efficace. Infine la scelta è ricaduta su un rivestimento acrilico spray ad alte prestazioni, che ha permesso di evitare la formazione di plasma sul lato inferiore, come confermato dalla forma d'onda della corrente misurata (Fig. 4.1).

Per quanto riguarda il dielettrico, la scelta del materiale è infine ricaduta sul Kapton, come già scritto in precedenza. Avendo a disposizione dei fogli di Kapton di spessore  $0.075\text{ mm}$ , abbiamo provato diverse configurazioni variando lo spessore del dielettrico, sovrapponendo uno o più strati di Kapton tramite nastro adesivo o colla epossidica a due componenti, al fine di trovare la configurazione ottimale, valutata visivamente in base all'estensione del plasma generato. La necessità di tali prove è dovuta al fatto che, se da una parte a parità di tensione applicata produce più forza un attuatore con dielettrico più sottile (almeno fino a saturazione, situazione che non ci ha riguardato), dall'altra parte tuttavia la tensione in uscita al circuito di alimentazione, a causa dell'architettura del circuito medesimo, dipende dal carico, ossia dall'attuatore stesso, che costituisce un carico di tipo capacitivo. Aumentare lo spessore del dielettrico equivale ad allontanare le armature di un condensatore, e pertanto riduce la capacità, consentendo di ottenere tensioni sensibilmente più alte; è noto che le prestazioni dell'attuatore, a pari spessore del dielettrico, aumentano con la tensione. In base all'estensione del plasma valutata visivamente, tuttavia la configurazione ottimale è risultata quella con un solo strato di Kapton (spessore  $0.075\text{ mm}$ ), ed è quella utilizzata in tutti i risultati riportati nel capitolo seguente, a meno che non sia specificato diversamente.

Il circuito di pilotaggio del DBD consiste essenzialmente in un convertitore *flyback* che viene alimentato in tensione continua; inoltre viene fornito un segnale ad onda quadra, proveniente da un generatore di funzione e regolabile in ampiezza e frequenza. Il trasformatore *flyback*, quando il segnale in ingresso eccita la sua frequenza di risonanza, che dipende dal carico ma è comunque nell'ordine delle decine di kilohertz, dà in uscita al circuito un

segnale sinusoidale alla stessa frequenza dell'onda quadra in ingresso, e con tensioni dell'ordine del kilovolt (anche queste dipendenti dal carico), che permettono di alimentare l'attuatore. In origine l'alimentazione del *flyback* era affidata ad un alimentatore esterno Iso-Tech IPS606-D, che forniva 63 V in continua in ingresso al circuito; dal momento che le prestazioni del circuito aumentano sensibilmente all'aumentare della tensione di alimentazione, abbiamo deciso di realizzare un alimentatore apposito, in grado di fornire 75 V. Tale alimentatore è stato quindi collocato insieme al circuito in un'apposita scatola (Fig. 3.6). Una rappresentazione schematica completa del circuito e dell'alimentatore è riportata in Fig. C.5 in App. C.



**Figura 3.6:** Scatola e circuito di alimentazione e pilotaggio del DBD.

Sebbene il circuito di pilotaggio del DBD sia ulteriormente ottimizzabile, per esempio fornendo tensioni ancora maggiori in ingresso <sup>1</sup>, tuttavia questo costituisce un ottimo esempio di circuito ad elevato rapporto qualità/prezzo dal momento che, pur essendo decisamente economico, assolve in maniera

---

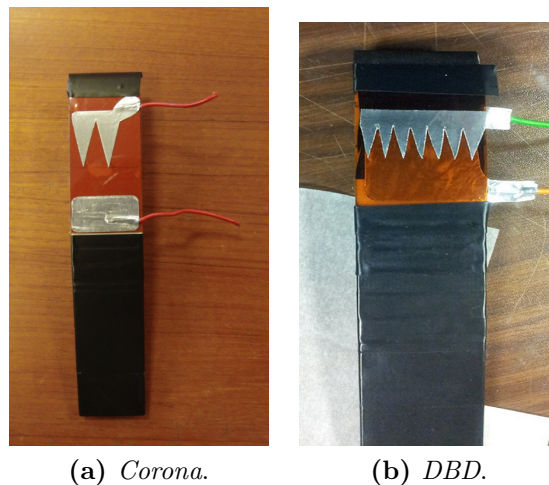
<sup>1</sup>Avendo la possibilità, con un trasformatore più prestante, di aumentare ulteriormente la tensione di alimentazione, fino a circa 120 V (oltre i quali si rischia di compromettere l'integrità di alcuni componenti del circuito), si verificherebbe un aumento della tensione in uscita dal *flyback*; per lavori futuri tuttavia sono già in fase di studio nuovi sistemi decisamente più versatili, in particolare un circuito amplificatore più trasformatore in uscita, in grado di fornire tensioni più elevate e di essere controllato in frequenza.



più che adeguata ai suoi scopi. L'alternativa sul mercato infatti è costituita da alimentatori che costano decine di migliaia di euro, mentre il costo del nostro circuito si attesta sulle decine di euro.

### 3.3.3 Forma degli elettrodi

Per quanto riguarda le prove di visualizzazione si è preferito caratterizzare qualitativamente il comportamento degli attuatori, senza ottimizzare la forma degli elettrodi. Le dimensioni degli elettrodi erano vincolate alla ridotta apertura del profilo non superando in nessun caso i  $25\text{ mm}$  in tale direzione, così da lasciare un margine tra l'estremità dell'elettrodo e la parete della galleria. Sono state provate diverse configurazioni dell'anodo (o elettrodo esposto per il DBD) sia con punte che senza (Fig. 3.7).



**Figura 3.7:** Alcuni attuatori utilizzati per le prove di visualizzazione.

Uno studio parametrico sulla geometria degli elettrodi, e in particolare modo sull'influenza della forma dell'anodo (o elettrodo esposto per il DBD) sulle prestazioni, valutate in termini di variazioni delle forze aerodinamiche sul profilo, è stato invece effettuato per le prove quantitative di pesata. Per quanto riguarda l'anodo (o l'elettrodo esposto), oltre a una configurazione base senza punte, ossia con estremità rettilinea dell'elettrodo, sono state provate diverse configurazioni con punte di forma triangolare; la forma del catodo (o elettrodo inferiore) invece è stata mantenuta costante. Sono stati utilizzati elettrodi esattamente identici sia come anodo per il corona che come elettrodo esposto per il DBD. La dimensione utile in apertura per tutti gli elettrodi è di  $200\text{ mm}$ . Per gli attuatori a corona la distanza fra gli elettrodi

è fissata a 15 *mm* mentre per i DBD si è scelto di posizionare le valli delle punte dell'elettrodo esposto in esatta corrispondenza con l'estremità (rettilinea) dell'elettrodo inferiore.

In particolare, per quanto riguarda l'ottimizzazione della geometria, una prima serie di attuatori è stata realizzata variando l'altezza delle punte triangolari fra 3 e 20 *mm*, mantenendo costante e pari a 20 il numero delle punte. Inoltre, è stato indagato anche l'effetto del numero di punte, mantenendone costante l'altezza. In Tab. 3.1 sono riassunte le caratteristiche delle diverse configurazioni provate, mentre in Fig. C.6 in App. C sono riportati i relativi disegni. Per quanto riguarda l'attuatore a corona è stata provata anche una configurazione *wire-to-plate*, in cui l'anodo è costituito da un filo di rame del diametro di 0.2 *mm*.

**Tabella 3.1:** Caratteristiche geometriche degli attuatori provati.

Attuatore	1	2	3	4	5	6	7
Numero punte	0	20	20	20	20	10	40
Altezza punte ( <i>mm</i> )	0	3	5	10	20	20	20
Larghezza punte ( <i>mm</i> )	0	10	10	10	10	20	5

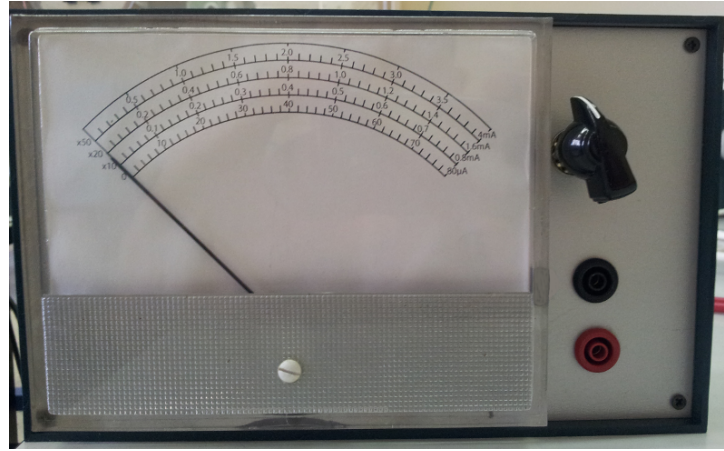
## 3.4 Strumenti di misura

In questa sezione si descrivono gli strumenti utilizzati sia per le misure elettriche sia per quelle aerodinamiche.

### 3.4.1 Misure elettriche

#### Amperometro

Per la misura della corrente che attraversa l'attuatore a corona è stato realizzato un microamperometro specifico (Fig. 3.8), a partire da un amperometro da pannello con un fondo scala originario di 80  $\mu A$ . Grazie all'utilizzo di appositi rivestimenti e isolamenti, lo strumento è in grado di funzionare anche alle elevate tensioni raggiunte. La portata originale dello strumento è stata incrementata, attraverso uno *shunt* variabile per mezzo di un commutatore (Fig. C.4), appositamente realizzato, di 10, 20 e 50 volte. Dal momento che la formula che lega la portata  $k$  desiderata alla resistenza di *shunt* è  $R_{shunt} = R_A/(k - 1)$  e poiché la resistenza interna dell'amperometro ( $R_A$ ) è di 1500  $\Omega$ , le resistenze di *shunt* utilizzate valgono rispettivamente 160  $\Omega$ , 80  $\Omega$  e 30  $\Omega$ .



**Figura 3.8:** Amperometro.

### Oscilloscopio

Mentre il generatore di tensione continua che alimenta l'attuatore a corona permette di visualizzare direttamente il valore della tensione applicata, per misurare la tensione sinusoidale sul DBD è stato utilizzato un oscilloscopio a due canali Tektronix TDS3032. Poiché le tensioni da misurare eccedevano abbondantemente il fondo scala dello strumento, anche utilizzando sonde con fattore di attenuazione 10, è stato necessario utilizzare un partitore di tensione, opportunamente realizzato, per ridurre di un ulteriore fattore 10 la tensione letta dall'oscilloscopio. Tale partitore, che ha un'accuratezza di  $\pm 1\%$ , è costituito da 20 resistenze da  $1\text{ M}\Omega$  in serie: il primo ramo ha  $R_A = 2\text{ M}\Omega$ , il secondo  $R_B = 18\text{ M}\Omega$ . Il fattore di riduzione  $\alpha$ , tale per cui  $V_{out} = \alpha V_{in}$ , è calcolato in Eq. (3.1).

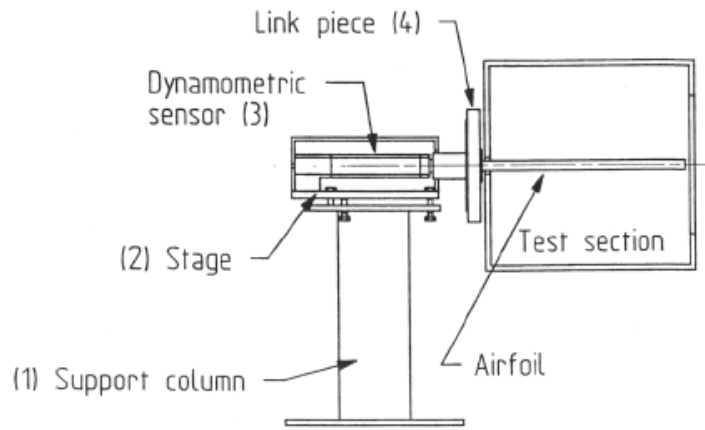
$$\alpha = \frac{R_A}{R_A + R_B} = 0.1 \quad (3.1)$$

Grazie all'utilizzo di speciali isolamenti, il partitore è in grado di funzionare anche per tensioni molto elevate, fino a  $8\text{ kV}$ . Anche la forma d'onda della corrente, per entrambi gli attuatori, è stata acquisita con l'oscilloscopio, per mezzo di una resistenza di *shunt* posta fra il catodo (o l'elettrodo inferiore) e la massa. Sono state utilizzate tre resistenze diverse, rispettivamente da  $10\ \Omega$ , da  $100\ \Omega$  e da  $1000\ \Omega$ : la seconda e la terza configurazione sono meno sensibili al rumore, permettendo quindi di visualizzare forme d'onda più pulite. Per acquisire le forme d'onda di corrente e tensione riportate nella Sez. 4.1 è stato utilizzato un oscilloscopio Isotech IDS8064 in quanto ha una risoluzione temporale maggiore rispetto all'oscilloscopio citato in precedenza.

### 3.4.2 Misure aerodinamiche e visualizzazioni

#### Bilancia aerodinamica

Per la misura delle forze aerodinamiche abbiamo usato una bilancia aerodinamica estensimetrica a tre componenti, modello EI-450 della DELTALAB (Fig. 3.9), la cui taratura era già stata effettuata in un lavoro di tesi precedente ([84]): in Eq. (3.2) è presentata la relazione tra le tensioni lette in uscita dai tre canali della bilancia ed i valori in termini di forza per mezzo della matrice di taratura.



**Figura 3.9:** Schema della bilancia aerodinamica a tre componenti. [85]

$$\begin{bmatrix} L \\ D \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.3120_{[N/V]} & -0.2345_{[N/V]} & -0.9442_{[N/V]} \\ 0.3290_{[N/V]} & 10.3941_{[N/V]} & 0.66625_{[N/V]} \\ -0.0095_{[Nm/V]} & -0.0108_{[Nm/V]} & 10.4198_{[Nm/V]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_V \\ D_V \\ M_V \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Come si può osservare, i valori sulla diagonale sono i più elevati in quanto legati alla misura di forza o momento corrispondente. I valori non nulli fuori dalla diagonale sono indice degli effetti incrociati.

Acquisendo i valori di tensione di portanza, momento e resistenza attraverso una scheda di acquisizione collegata ad un computer, siamo stati quindi in grado di ricavare i valori di forza e momento medi su di una finestra temporale di 5 s.

### Trasduttori di pressione

Le misure di velocità in galleria del vento sono state ricavate a partire da misure di pressione, attraverso il procedimento di taratura della galleria descritto in Sez. 3.1. In particolare, sono stati utilizzati due trasduttori di pressione modello 267 della Setra, collegati rispettivamente a un tubo di Pitot e a una presa statica a parete. Questi trasduttori, che hanno un fondo-scala di  $0 - 10 V$ , corrispondente a  $\pm 2.5 W.C.$ , sono stati ricalibrati appositamente per questo lavoro di tesi, in modo da migliorarne l'accuratezza, che originariamente era pari a  $\pm 1\%$  FS.

### Macchina fotografica

Le visualizzazioni sono state effettuate con una macchina fotografica Casio Exilim EX-FH25, che ha permesso di acquisire fotografie e video. In particolare per quanto riguarda le prime, abbiamo impostato la dimensione delle immagini più grande a disposizione, ossia  $3648 \times 2736$  pixel, con una sensibilità (ISO) di 400 od 800 e un tempo di esposizione di 1 s. La profondità in bit delle immagini è di 24. I video invece sono stati acquisiti in modalità standard e hanno dimensione dell'immagine di  $640 \times 480$  pixel, con un *frame rate* di 30 *fps*.

Le immagini e i filmati ottenuti sono stati processati a posteriori per migliorare la qualità delle visualizzazioni, in particolare andando ad aumentare il contrasto.



# Capitolo 4

## Risultati e discussioni

In questo capitolo vengono presentati i risultati sperimentali ottenuti, attraverso prove al banco (Sez. 4.1), volte a indagare principalmente le caratteristiche elettriche degli attuatori, visualizzazioni (Sez. 4.2), per caratterizzarne qualitativamente il comportamento, e pesate (Sez. 4.3), per ottenere informazioni quantitative sulle prestazioni indotte dagli attuatori. Lo scopo di tali prove è quello di ottimizzare la geometria degli attuatori, sia corona sia DBD. In particolare, con i risultati ottenuti attraverso le pesate, viene effettuato anche un confronto tra le performance indotte dai due tipi di attuatori.

### 4.1 Prove al banco

Le prove al banco in primo luogo sono consistite nell'accendere l'attuatore in aria calma e sottoporre il plasma a ispezione visiva. La facilità di stabilizzazione della scarica, l'estensione e la luminosità del plasma sono alcuni dei parametri che abbiamo indagato. Un'ulteriore serie di prove, grazie all'utilizzo dell'oscilloscopio e dell'amperometro, ha invece permesso una caratterizzazione delle grandezze elettriche, in particolare tensione e corrente. L'ispezione visiva ha permesso di stabilire la configurazione più performante in termini di estensione e luminosità del plasma per il DBD, ottenuta con lo spessore più sottile del dielettrico fra quelli provati (75, 150 e 225  $\mu m$ ). Per quanto riguarda l'attuatore a corona, i risultati più interessanti hanno riguardato la facilità di accensione e stabilizzazione della scarica con le configurazioni a punte, rispetto a quella base con l'anodo piano. Mentre per la configurazione base (attuatore 1, Tab. 3.1) è stato impossibile ottenere una scarica di plasma stabile, e per quella con la dimensione inferiore delle punte (attuatore 2, Tab. 3.1) è stato necessario favorire l'accensione e la stabilizzazione della scarica tramite un flusso d'aria esterno, senza comunque

riuscire a eliminare completamente transizioni all'arco elettrico indesiderate, gli attuatori con le punte più lunghe (attuatori 4-7, Tab. 3.1) presentano un'accensione immediata e un'ottima stabilità della scarica, con una scarsa propensione alla transizione all'arco, grazie al fatto che le punte costituiscono un luogo preferenziale per l'accensione del plasma. Si è osservato che tale comportamento viene favorito dall'aumentare della profondità delle punte. La scarica è talmente stabile da risultare poco sensibile all'umidità, anche per valori fino al 70%, ben superiori ai limiti riscontrati in letteratura (si veda Sez. 2.1.6).

Per quanto riguarda gli attuatori a corona, l'impossibilità di realizzare una scarica di plasma con l'anodo piano (attuatore 1), ci ha condotto ad utilizzare, come tipicamente avviene in letteratura, una configurazione *wire-to-plate*, in cui l'anodo è costituito da un filo di rame, come configurazione base. Questa problematica trae origine dal fatto che la scala dell'anodo non è sufficientemente piccola rispetto a quella del catodo. Come riportato in Sez. 2.1.5, l'anodo deve avere dimensioni (lunghezza<sup>1</sup> e spessore nel caso di elettrodi piani, diametro nel caso di fili) molto inferiori rispetto al catodo affinché si possa instaurare una scarica a corona.

Una seconda serie di prove ha permesso di misurare il valore della corrente elettrica che attraversa gli attuatori, visualizzarne la forma d'onda e stimare la potenza necessaria al funzionamento degli attuatori medesimi. Per quanto riguarda il DBD, le forme d'onda di tensione e corrente acquisite sono riportate in Fig. 4.1, per la quale è stata utilizzata la resistenza di *shunt* da 1000  $\Omega$ . Come predetto dalla teoria (Sez. 2.2.1), è possibile osservare uno sfasamento di 90° fra le forme d'onda sinusoidali di tensione e corrente. In particolare, la corrente è costituita da una componente capacitiva, sinusoidale e sfasata di 90° con la tensione, e da una corrente di scarica, costituita da rapide pulsazioni, che appaiono subito dopo ogni inversione di polarità. Questa corrente di scarica è asimmetrica: durante il semiciclo positivo le pulsazioni sono positive, più intense, e corrispondono ai filamenti o *streamer*, mentre durante il semiciclo negativo sono più frequenti, ma meno intense e corrispondono al regime *glow*.

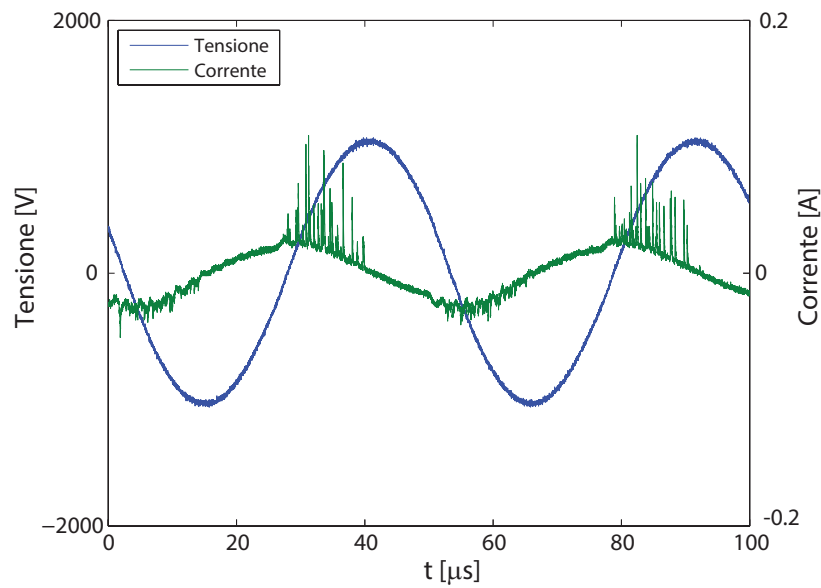
E' stato acquisito anche il segnale della corrente che attraversa l'attuatore a corona (Fig. 4.2), attraverso lo *shunt* da 1000  $\Omega$ : questa è essenzialmente una corrente continua sulla quale sono sovrapposti dei picchi corrispondenti agli *streamer*.

Per quanto riguarda i valori delle grandezze elettriche misurate, è necessario precisare che questi variano da attuatore ad attuatore. Per quanto

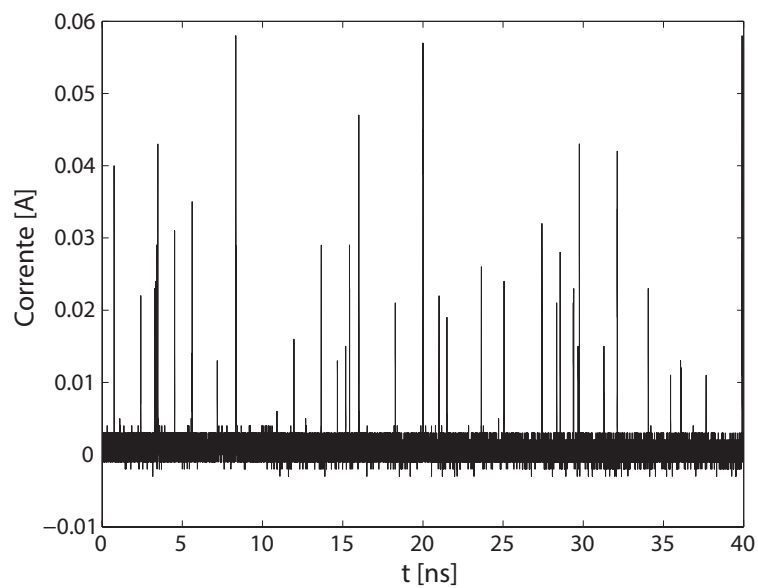
---

<sup>1</sup>Con lunghezza si intende la dimensione longitudinale dell'elettrodo.





**Figura 4.1:** Tensione e corrente misurate sul DBD.



**Figura 4.2:** Corrente misurata nella scarica a corona.

riguarda il DBD, la tensione massima in uscita al circuito di pilotaggio, oltre che la frequenza di risonanza del medesimo, dipendono dal carico, ossia dalle dimensioni dell'attuatore, che costituisce un carico di tipo capacitivo: una

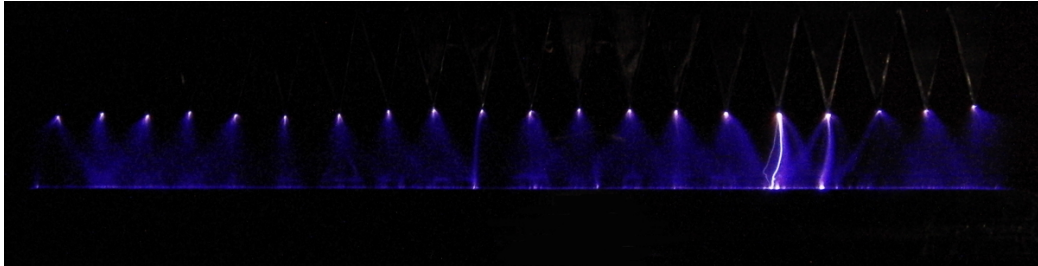
maggior apertura dell'attuatore, ad esempio, si traduce in un aumento del carico capacitivo, e quindi in una riduzione della tensione e della frequenza di risonanza. Allo stesso modo per quanto riguarda i corona, una distanza maggior fra anodo e catodo implica la necessità di raggiungere tensioni più elevate per alimentare la scarica. I valori riportati in Tab. 4.1 si riferiscono agli attuatori utilizzati per le prove di pesata (Sez. 3.3.3). Come si può facilmente osservare, il DBD richiede una potenza maggior per il mantenimento della scarica: tuttavia la potenza *attiva*, ossia quella che effettivamente serve per produrre il plasma, è solo una frazione di quella totale, che è costituita anche da una componente capacitiva, legata alla componente capacitiva della corrente e responsabile del riscaldamento del dielettrico. Infatti, per ogni ciclo della tensione, il plasma si forma solo oltre una certa tensione di soglia (che è stata stimata essere intorno ai 500 V di ampiezza). La potenza attiva stimata per i DBD è di circa 4–6 W, comunque superiore alla potenza necessaria per attivare l'attuatore a corona. Il rapporto fra la potenza attiva e quella totale è limitato dalla non ottimale efficienza del particolare circuito di pilotaggio del DBD, che fornisce tensioni non particolarmente elevate rispetto alla tensione di soglia.

**Tabella 4.1:** Caratteristiche elettriche tipiche degli attuatori provati.

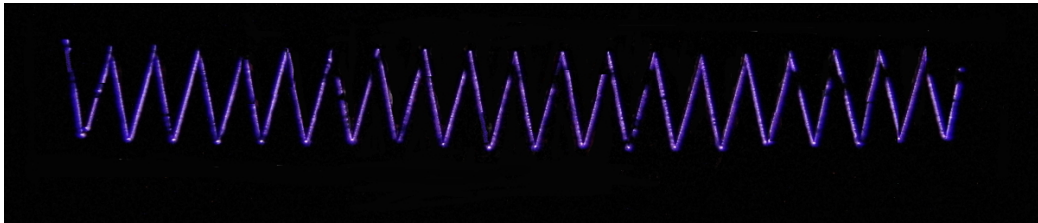
Attuatore	Corona	DBD
Tensione RMS ( <i>kV</i> )	12.5 – 13.5	0.8 – 1
Corrente RMS ( <i>mA</i> )	0.1 – 0.3	10 – 20
Frequenza ( <i>kHz</i> )	–	8 – 14
Potenza totale ( <i>W</i> )	1.5 – 3	11 – 18

In Fig. 4.3 sono mostrate fotografie del plasma, scattate dall'alto, sia per l'attuatore a corona sia per il DBD, ottenute con un tempo di esposizione di 1 s. La scarica a corona (Fig. 4.3a) ha origine dalle punte dell'anodo e si espande secondo una geometria a ventaglio verso il catodo; è possibile osservare la presenza di almeno 2 *streamer*, ossia filamenti di plasma luminosi, e di un arco transitorio, ossia un arco elettrico che si forma in maniera alternata al plasma e che sembra sovrapposto al plasma stesso, ma solo a causa del tempo di esposizione di questa fotografia, ben superiore alla durata di un arco transitorio (in realtà quando si forma l'arco la scarica a corona scompare). Il plasma prodotto dal DBD invece ha una morfologia completamente diversa (Fig. 4.3b), dal momento che si forma praticamente su tutto il contorno delle punte. L'estensione del plasma è sensibilmente minore rispetto al corona anche a causa delle limitate tensioni raggiungibili. Se fosse possibile

fornire tensioni superiori, quello che si osserverebbe sarebbe simile a quanto mostrato in Fig. 2.54b.



(a) Corona



(b) DBD

**Figura 4.3:** Fotografie degli attuatori funzionanti. Entrambe le immagini si riferiscono ad attuatori con geometria tipo 5, come da Tab. 3.1.

## 4.2 Visualizzazioni

Le visualizzazioni a fili di fumo sono state effettuate per caratterizzare qualitativamente il comportamento degli attuatori su un profilo NACA0013 a diverse incidenze; in particolare l'interesse si è focalizzato sulla capacità degli attuatori di ritardare lo stallo, garantendo un riattacco, completo o parziale, dello strato limite per incidenze superiori a quella di stallo nominale del profilo.

### 4.2.1 Considerazioni preliminari

Le visualizzazioni sono state effettuate nella galleria del vento apposita, descritta in Sez. 3.1. Il tracciante utilizzato è fumo prodotto dall'evaporazione di olio di paraffina. Entro l'approssimazione a bassi numeri di Reynolds, l'equazione di moto per una particella di tracciante sferica immersa in un

fluido è descritta in Eq. (4.1) ([86]).

$$\begin{aligned} \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = & \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_f \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \frac{4}{3}\pi a^3 (\rho_p - \rho_f) \mathbf{g} - 6\pi\mu a \left[ (\mathbf{v}_p - \mathbf{U}) - \frac{1}{6}a^2 \nabla^2 \mathbf{U} \right] + \\ & - 6\pi\mu a^2 \int_0^t \frac{d}{d\tau} \left[ (\mathbf{v}_p - \mathbf{U}) - \frac{1}{6}a^2 \nabla^2 \mathbf{U} \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\nu(t-\tau)}} + \\ & - \frac{2}{3}\pi a^3 \frac{d}{d\tau} \left[ (\mathbf{v}_p - \mathbf{U}) - \frac{1}{10}a^2 \nabla^2 \mathbf{U} \right] + \mathbf{L}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

dove  $a$  è il raggio della particella,  $\mathbf{U}$  la velocità del fluido e  $\mathbf{g}$  l'accelerazione di gravità. L'Eq. (4.1) ci dice che la forza di inerzia della particella eguaglia rispettivamente la somma di:

- forze non inerziali
- forze di volume nette
- forze viscoso quasi-stazionarie
- forze della storia temporale (Basset)
- forze di massa aggiuntive
- portanza, generata da una circolazione attorno alle particelle.

Per particelle molto piccole, la prima parte del termine viscoso quasi-stazionario domina sul membro di destra dell'equazione. Con l'ipotesi aggiuntiva che

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \frac{d\mathbf{U}}{dt}, \quad (4.2)$$

l'Eq. (4.1) si semplifica:

$$\mathbf{U} - \mathbf{v}_p = \frac{2}{9} \frac{a^2 (\rho_p - \rho_f)}{\mu} \frac{d\mathbf{v}_p}{dt}. \quad (4.3)$$

Il termine  $\mathbf{U} - \mathbf{v}_p$  è chiamato *slip velocity*, ossia velocità di slittamento della particella di tracciante rispetto al fluido circostante. Affinché il tracciante segua fedelmente il fluido, tale termine deve andare a zero; per ottenere tale risultato è possibile imporre alternativamente  $\rho_p = \rho_f$ , ossia che la densità del tracciante e del fluido siano uguali, cosa impossibile se il fluido è aria, oppure  $a \rightarrow 0$ , ossia utilizzare particelle quanto più possibile piccole, a scapito

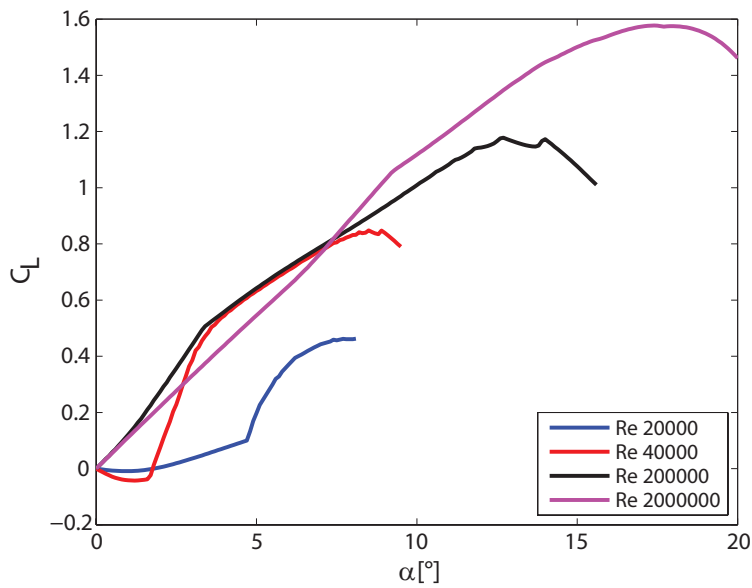
però della loro visibilità. La dimensione media del raggio delle particelle prodotte dall'evaporazione dell'olio di paraffina è nell'ordine di  $1 \mu m$ , pertanto sufficientemente ridotta da garantire una buona tracciabilità del fluido.

### 4.2.2 Modellazione del fenomeno

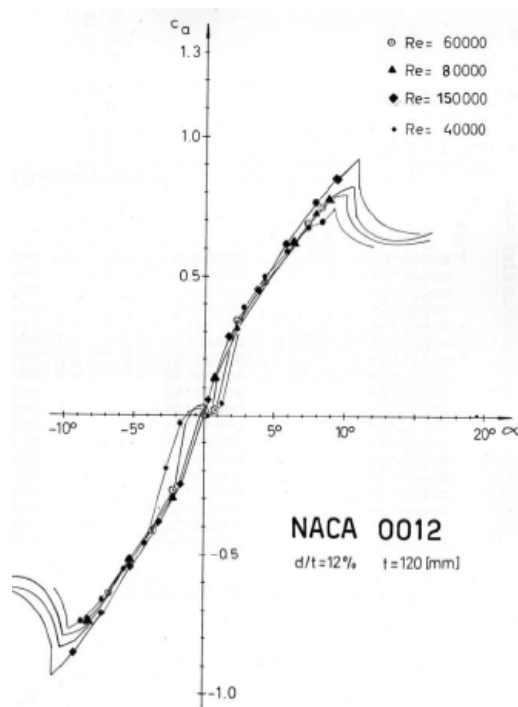
La velocità della corrente in galleria del vento è di  $1.35 m/s$ , valore che è stato misurato per un precedente lavoro di tesi ([82]). Il profilo utilizzato, un NACA0013, possiede una corda di  $153.8 mm$ . Il numero di Reynolds sul profilo pertanto è:

$$Re = \frac{\rho U c}{\mu} \simeq 14000 \quad (4.4)$$

Come si può osservare dall'Eq. (4.4), il numero di Reynolds per le prove di visualizzazione è estremamente basso. E' stato utilizzato il software X-Foil per prevedere il comportamento della curva di portanza, sebbene a numeri di Reynolds così bassi le previsioni non siano sempre pienamente attendibili. In particolare, per  $Re < 20000$ , X-Foil fornisce risultati con scarso significato fisico, dal momento che non è in grado di individuare lo stallo. La curva a  $Re = 20000$  viene quindi considerata rappresentativa di quanto accade durante la prova. Da quanto si può osservare in Fig. 4.4, per numeri di Reynolds particolarmente bassi, quali quelli caratteristici di questa prova, non è presente il caratteristico tratto lineare del  $C_L$  che si può invece individuare a  $Re = 2 * 10^6$ . Al contrario, per  $0^\circ < \alpha < 5^\circ$  è presente un primo tratto in cui il profilo risente poco delle variazioni di incidenza: la derivata  $C_{L\alpha}$  è piccola, probabilmente perché il disallineamento del profilo è dello stesso ordine dello spessore dello strato limite, che a Reynolds così bassi è molto consistente. Per  $\alpha > 5^\circ$  il  $C_L$  tende quindi a portarsi su una retta fino allo stallo: a  $Re = 20000$  tuttavia questo secondo tratto rettilineo è breve (mentre è possibile individuarlo facilmente nella curva a  $Re = 40000$ ), poiché degenera rapidamente in una regione non lineare, fino ad arrivare allo stallo che avviene per  $\alpha \simeq 8^\circ$ . La regione fra questi due tratti viene identificata come una regione di isteresi: è possibile quindi modellare la curva del coefficiente di portanza con due tratti rettilinei distinti, connessi da un ciclo di isteresi. La bontà di questi ragionamenti trova conferma in letteratura, sebbene il materiale disponibile a Reynolds così bassi sia davvero limitato, e in particolare confinato al settore aeromodellistico. In Fig. 4.5 è possibile osservare per un profilo NACA0012 e  $Re = 40000$  un comportamento simile a quello previsto da X-Foil.



**Figura 4.4:** Curve del coefficiente di portanza calcolate con X-Foil per un profilo NACA0013 al variare dell'incidenza, per diversi numeri di Reynolds.



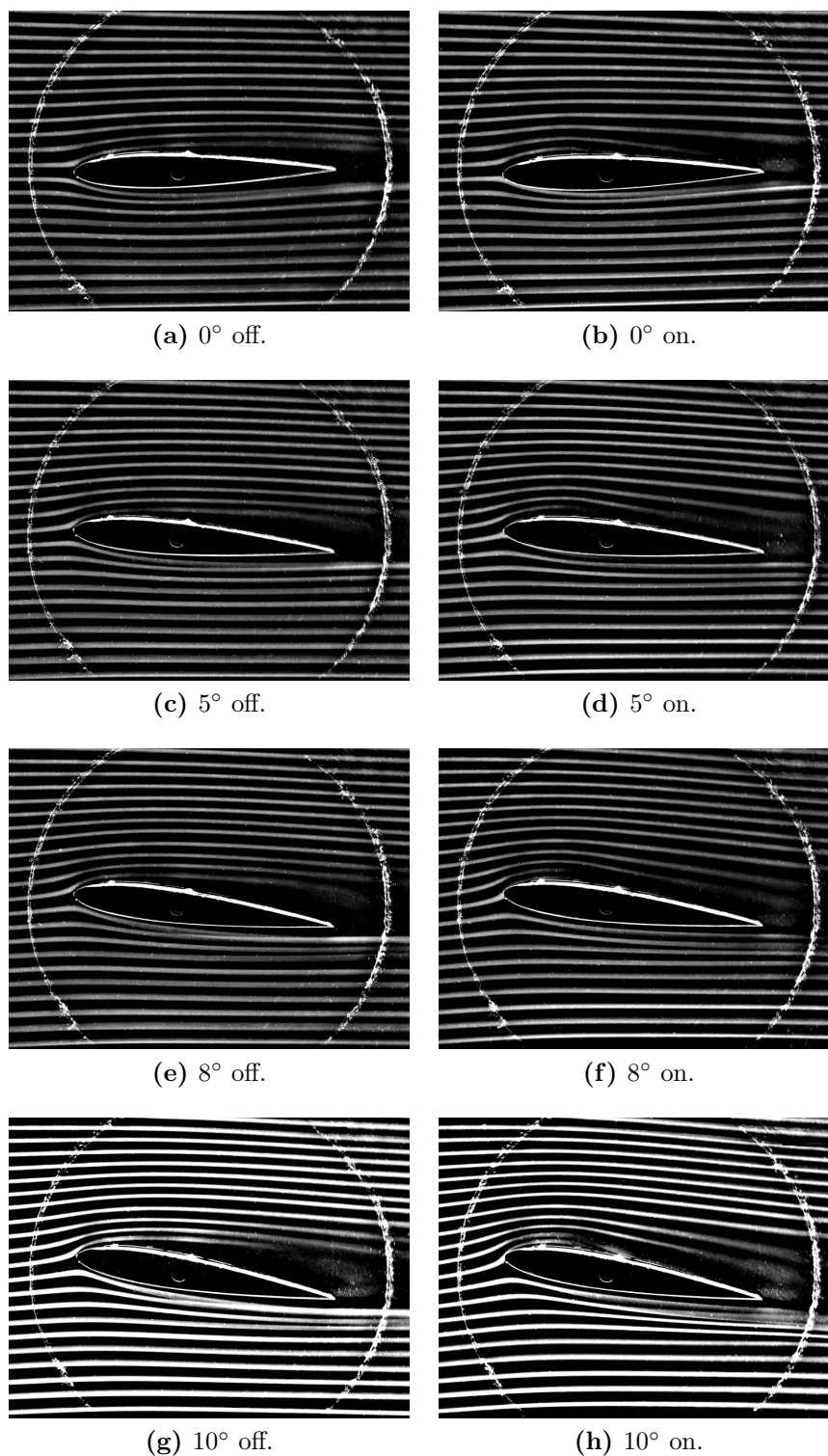
**Figura 4.5:** Curve del coefficiente di portanza per un profilo NACA0012 al variare dell'incidenza, per diversi numeri di Reynolds. [87]

### 4.2.3 Risultati

I risultati presentati in questa sezione consistono in un confronto delle linee di corrente a pari incidenza nel caso di attuatore spento e acceso. Risulta evidente che entrambi gli attuatori garantiscono un riattacco dello strato limite e un ritardo dello stallo per angoli di incidenza ben superiori rispetto a quello nominale. La deviazione delle linee di corrente avviene in maniera pressoché istantanea con l'accensione degli attuatori, caratteristica che permetterebbe l'utilizzo degli attuatori al plasma per applicazioni di *flow control* in *real time*. L'obiettivo di questa serie di prove è quello di caratterizzare qualitativamente l'effetto degli attuatori e di confrontarne le prestazioni, in particolare in termini di ritardo dello stallo.

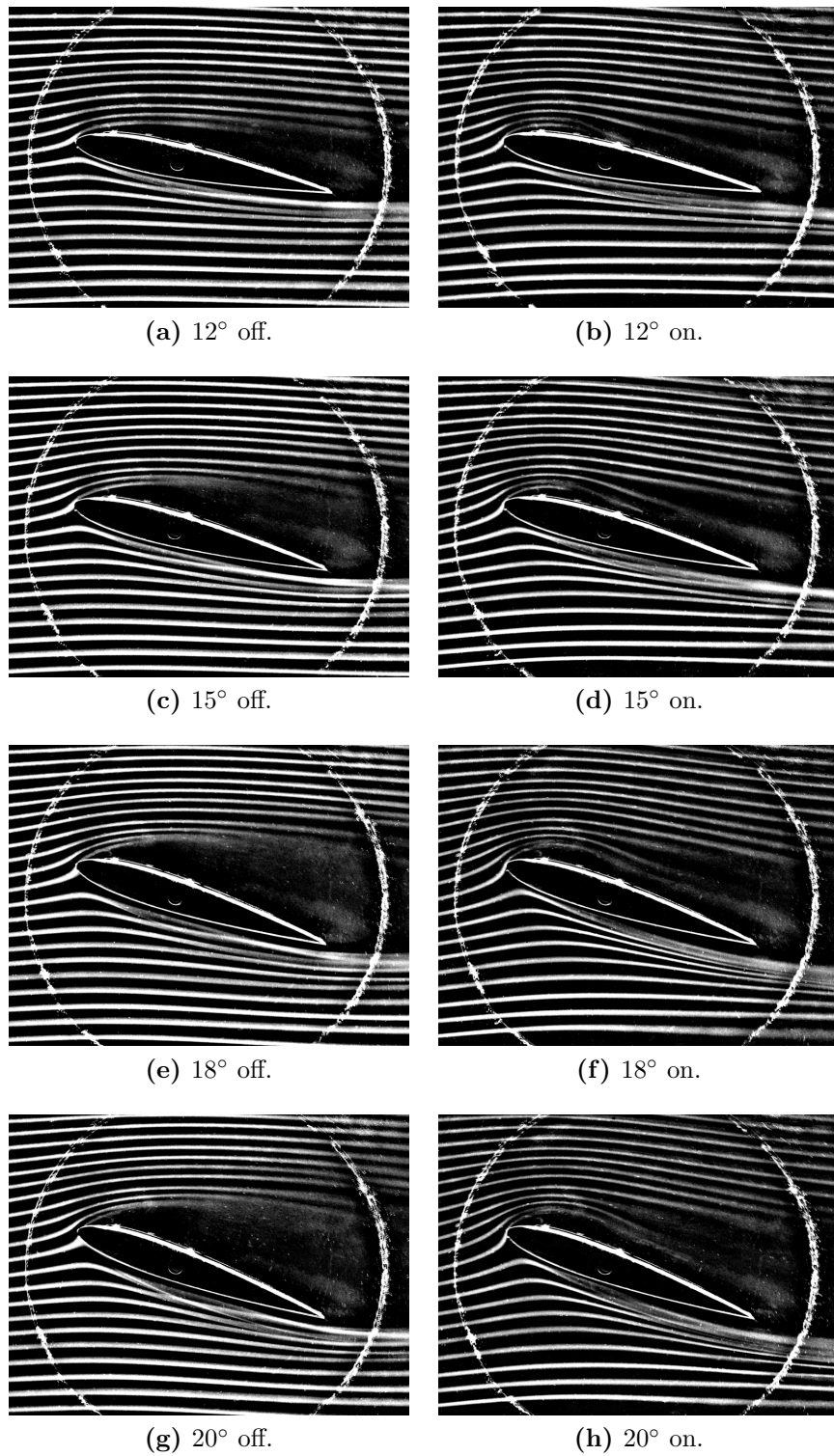
#### Corona

L'attuatore scelto per le visualizzazioni ha una larghezza utile di  $20\text{ mm}$  e l'anodo presenta due punte lunghe  $20\text{ mm}$  e larghe  $10\text{ mm}$  ciascuna. La distanza fra anodo e catodo è di  $12\text{ mm}$ . La tensione di alimentazione è di  $10.7\text{ kV}$  e la corrente che attraversa l'attuatore è di  $0.18\text{ mA}$ . La posizione in corda, relativa al termine delle punte, ossia dove si forma il plasma, è al 20%. Tale posizione risulta non particolarmente ottimale, in quanto è stato stabilito con il precedente lavoro di tesi di Bogani ([81]) che il punto ottimale di applicazione per ritardare lo stallo è il più vicino possibile al punto di separazione, quindi in prossimità del bordo d'attacco. Tuttavia l'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di operare un confronto fra l'attuatore a corona e il DBD, che è stato collocato nella medesima posizione in corda. Come si può osservare da Fig. 4.6 l'effetto dell'attuatore è già ben visibile attraverso la deviazione delle linee di flusso sul dorso ad incidenze precedenti a quelle di stallo che, come mostrato in Fig. 4.4 e verificato sperimentalmente, avviene intorno agli  $8^\circ$ . La motivazione è legata al fatto che l'attuatore contrasta la separazione del flusso che, per angoli di incidenza pre-stallo, si sposta gradualmente dal bordo d'uscita fino a raggiungere, in corrispondenza dello stallo, il bordo d'attacco. L'effetto diventa particolarmente rilevante a partire dall'incidenza di stallo (Fig. 4.6f), in quanto l'azione dell'attuatore permette un riattacco completo dello strato limite lungo tutta la corda del profilo fino a  $20^\circ$  (Fig. 4.7h), ben  $12^\circ$  oltre lo stallo. Tuttavia, l'effetto dell'attuatore è osservabile anche ad incidenze superiori: a  $22^\circ$  (Fig. 4.8b) lo strato limite è quasi completamente attaccato, con un principio di separazione in corrispondenza del bordo d'uscita; a  $25^\circ$  (Fig. 4.8d) la deviazione delle linee di corrente è ancora apprezzabile; tra  $28^\circ$  (Fig. 4.8f) e  $30^\circ$  (Fig. 4.8h) l'effetto si può ritenere quasi esaurito, seppur in minima parte ancora presente.

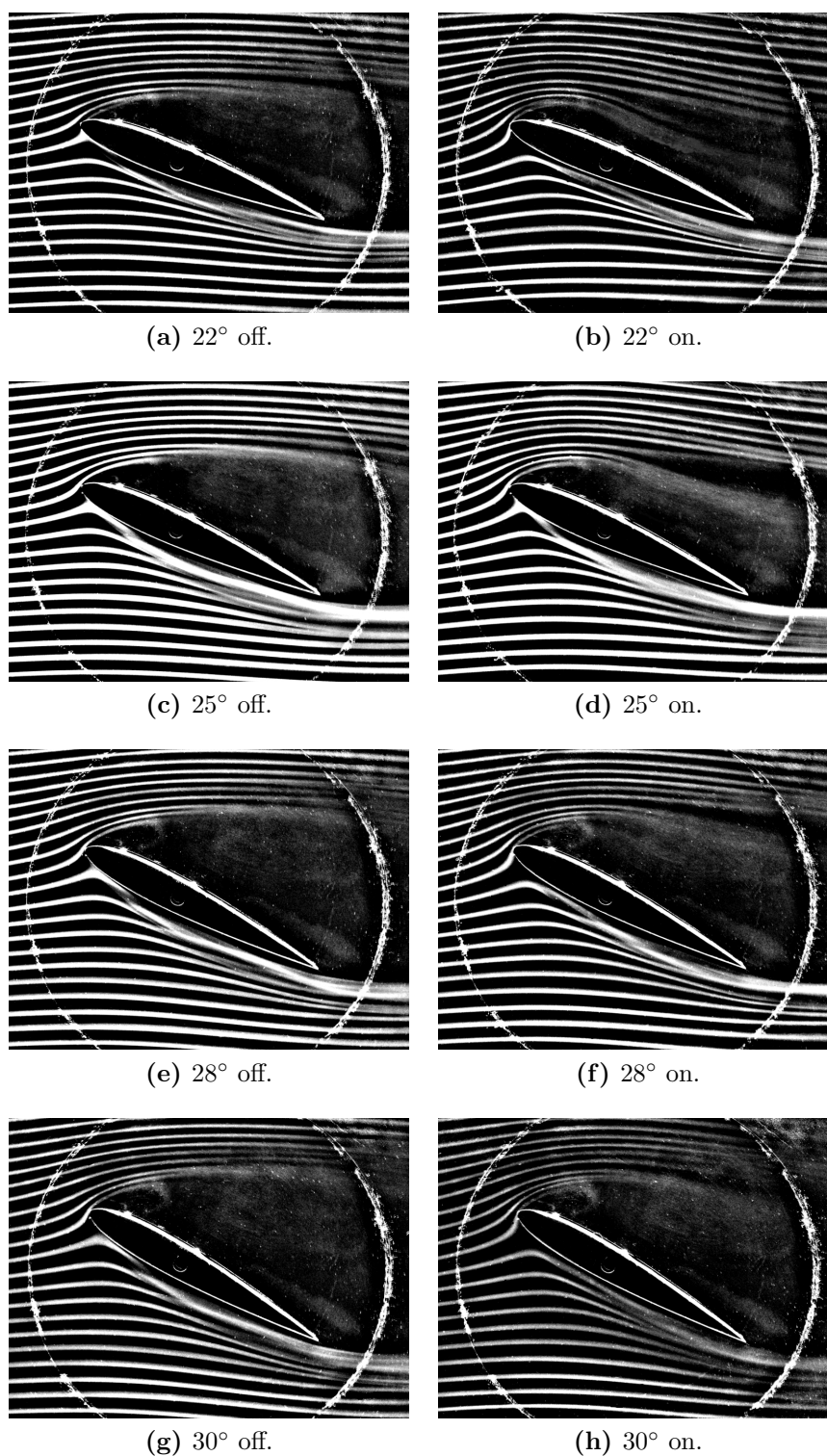


**Figura 4.6:** Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore a corona spento e acceso a diverse incidenze.





**Figura 4.7:** Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore a corona spento e acceso a diverse incidenze.

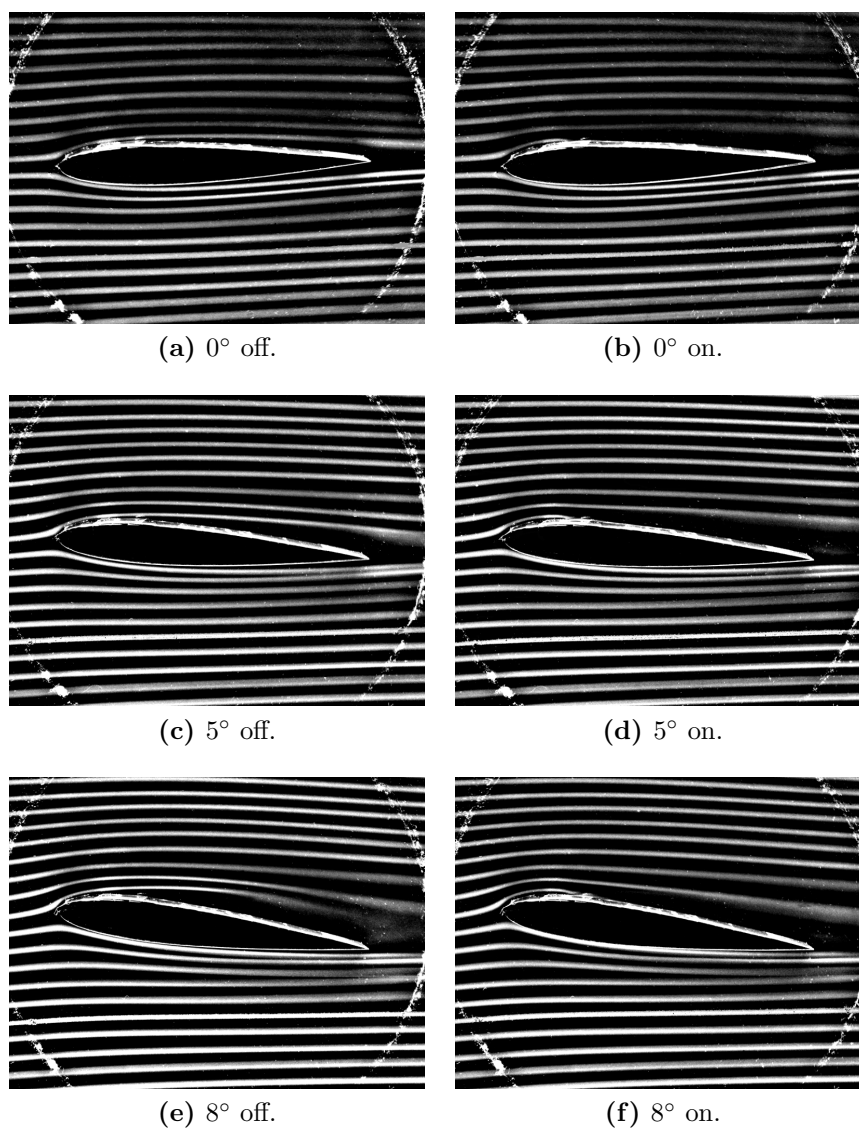


**Figura 4.8:** Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore a corona spento e acceso a diverse incidenze.

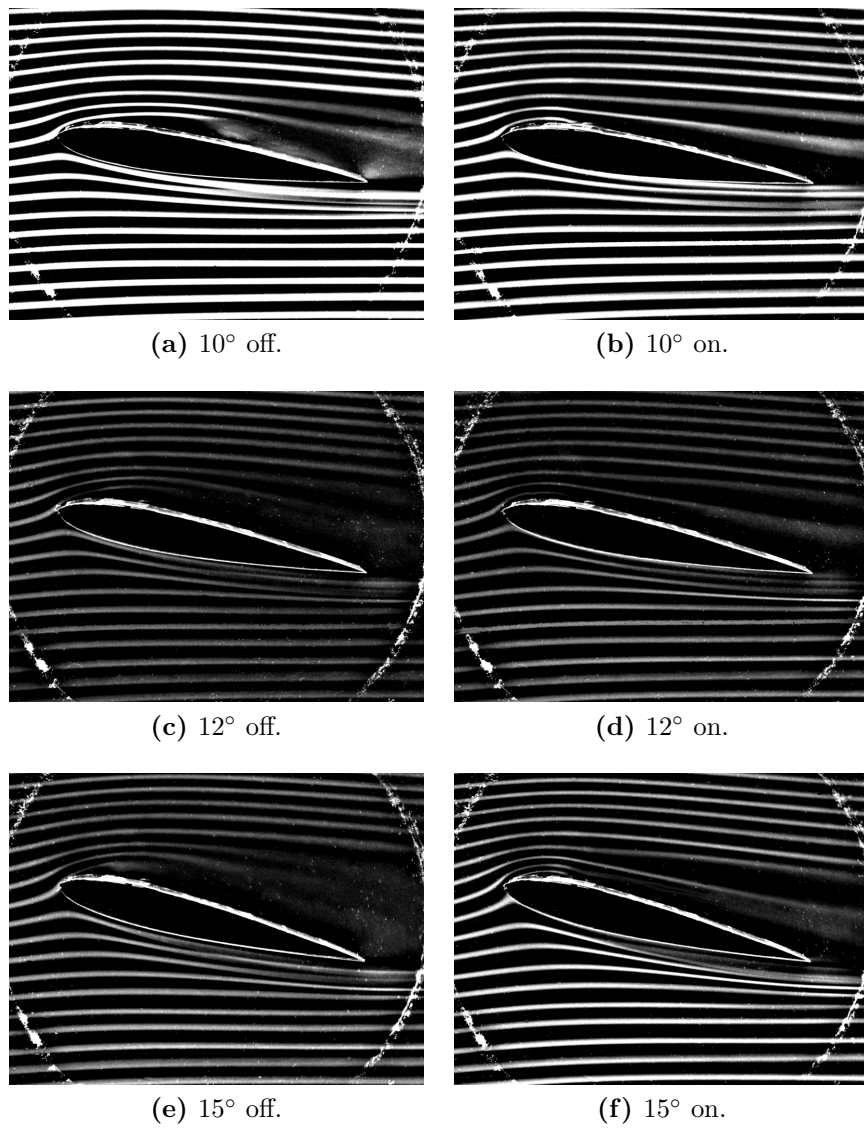
## DBD

L'attuatore scelto per le visualizzazioni mostrate in questa sezione ha un'apertura utile di  $23\text{ mm}$ : l'elettrodo esposto è costituito da 5 punte triangolari da  $4.6\text{ mm}$  di base ed  $1.5\text{ mm}$  di altezza. La lunghezza dell'elettrodo inferiore, isolato con nastro isolante, è di  $15\text{ mm}$ , mentre la lunghezza totale dell'elettrodo esposto è di  $9\text{ mm}$ . Il dielettrico è costituito da due strati di Kapton incollati con una colla epossidica bicomponente; il suo spessore complessivo è di  $0.25\text{ mm}$ . La collocazione in corda scelta è la medesima dell'attuatore a corona. La tensione applicata è di  $6.5\text{ kV}_{pp}$  ad una frequenza di  $19.4\text{ kHz}$ . L'estensione del plasma è compresa fra  $3$  e  $4\text{ mm}$ . Gran parte delle considerazioni effettuate per l'attuatore a corona sono valide anche per il DBD, come si può osservare nelle figure 4.9, 4.10, 4.11. Tuttavia, il DBD perde di efficacia ad incidenze inferiori rispetto al corona: il flusso riattacca completamente fino a  $18^\circ$  (Fig. 4.11b) a fronte dei  $20^\circ$  (Fig. 4.7h) del corona. Inoltre, per incidenze superiori, il decadimento delle prestazioni del DBD è più rapido; infatti, già a  $25^\circ$  (Fig. 4.11f) di incidenza l'effetto è del tutto trascurabile. Anche a  $20^\circ$ , ossia solo  $2^\circ$  oltre l'incidenza limite in cui avviene il riattacco completo del flusso, l'effetto del DBD è modesto (Fig. 4.11d); al contrario, con il corona, si verifica comunque un riattacco parziale (Fig. 4.8b). Una motivazione plausibile per le prestazioni inferiori del DBD è legata alle limitate tensioni ottenibili con il circuito a disposizione. Bisogna comunque sottolineare il fatto che, a parità di prestazioni, il DBD richiede più potenza rispetto all'attuatore a corona, come si può osservare dai valori riportati in Tab. 4.1.

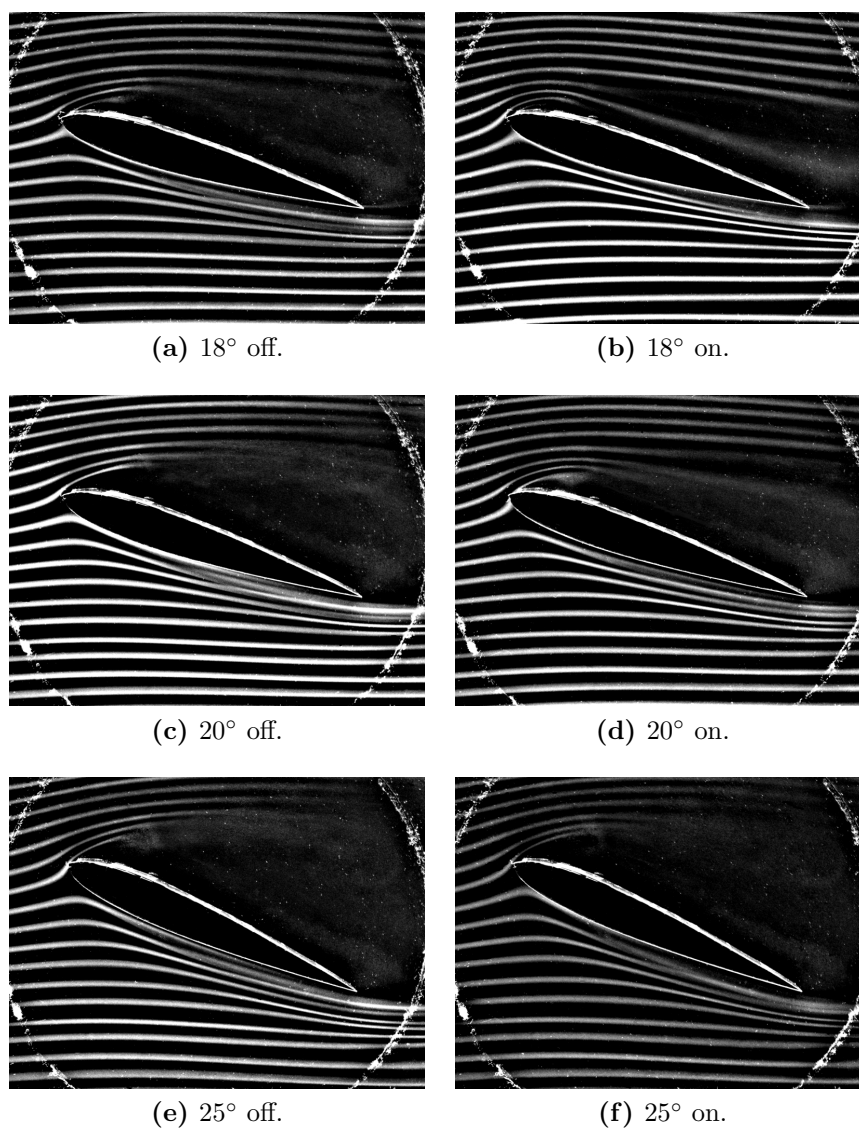
Un'ulteriore osservazione può essere fatta analizzando la Fig. 4.10b: la linea di fumo in prossimità del dorso del profilo viene deviata bruscamente verso la parete del profilo in corrispondenza dell'attuatore permettendo così di apprezzare l'effetto di *aspirazione* dell'attuatore stesso, il quale induce una componente di velocità verticale verso il basso. E' evidente anche che l'accensione dell'attuatore, pur garantendo il riattacco dello strato limite, non impedisce la formazione di una bolla di separazione dovuta al fatto che il punto di separazione si trova a monte dell'attuatore stesso. Un avanzamento della sua collocazione al bordo d'attacco consentirebbe una maggiore efficacia di attuazione, inibendo totalmente la separazione.



**Figura 4.9:** Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore DBD spento e acceso a diverse incidenze.



**Figura 4.10:** Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore DBD spento e acceso a diverse incidenze.



**Figura 4.11:** Visualizzazioni a fili di fumo con attuatore DBD spento e acceso a diverse incidenze.

## 4.3 Pesate

In questa sezione viene descritta l'attività sperimentale di misura delle forze aerodinamiche in galleria del vento, che ha permesso di ricavare informazioni quantitative sul funzionamento degli attuatori al plasma. Le prestazioni dei diversi attuatori, sia corona sia DBD, descritti in Tab. 3.1 vengono valutate in termini di incremento del coefficiente massimo di portanza ottenuto con l'attuatore acceso, rispetto al caso di attuatore spento, per diversi valori del numero di Reynolds e per due differenti posizioni in corda. Viene quindi individuata una geometria ottimale per entrambi i tipi di attuatori.

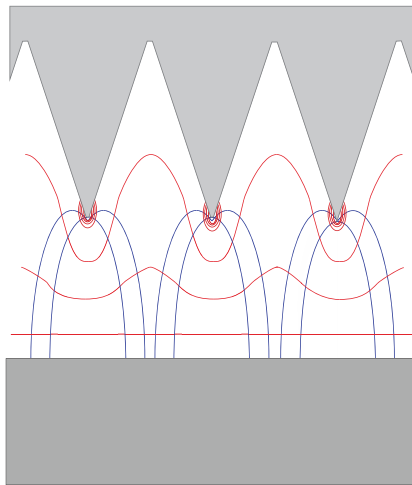
### 4.3.1 Descrizione dei principi fisici di funzionamento

Il lavoro di ottimizzazione geometrica svolto in questa tesi ha riguardato l'indagine delle prestazioni degli attuatori con una geometria a punte. Sebbene lo scopo degli attuatori a corona e DBD sia il medesimo, ossia energizzare lo strato limite e garantire una posticipazione dell'incidenza di stallo con un conseguente aumento del coefficiente massimo di portanza, i principi fisici alla base della particolare efficacia di una geometria a punte sono diversi per le due tipologie di attuatori.

Per quanto riguarda l'attuatore a corona, la punta è un luogo preferenziale di innesco della scarica poiché causa una maggiore concentrazione del campo elettrico, come si può osservare in Fig. 4.12 <sup>2</sup>: più acuta è la punta, maggiore è il campo elettrico in sua prossimità. Questo favorisce la facilità di innesco della scarica e la sua stabilizzazione. Infatti, nel caso di configurazione *wire-to-plate* o *plate-to-plate* tradizionale, i punti preferenziali di innesco corrispondono ad asperità naturali, difetti di lavorazione o causati da fusioni locali dovute alla scarica. In questo caso vi è il rischio che, al posto del plasma, da tali siti si generino archi elettrici in maniera incontrollata. Una indagine approfondita sull'efficacia di tale configurazione per attuatori a corona ed in particolare l'ottimizzazione della geometria delle punte non è mai stata indagata in maniera dettagliata prima di questo lavoro di tesi. La motivazione va ricercata nello spostamento dell'interesse negli ultimi anni verso la ricerca sui DBD proprio perché la scarica a corona è storicamente ritenuta instabile e pertanto meno preferibile per applicazioni aeronautiche.

---

<sup>2</sup>La rappresentazione 2D di figura è una semplificazione; in realtà la presenza del dielettrico e dell'aria, rispettivamente sotto e sopra gli elettrodi, complica leggermente la morfologia tridimensionale del campo elettrico. Tuttavia, la rappresentazione intende mettere in risalto l'effetto legato alla presenza delle punte, che si esprime in una concentrazione del campo elettrico in corrispondenza delle stesse e in una deviazione delle linee iso-potenziali.



**Figura 4.12:** Linee di campo e curve iso-potenziali del campo elettrico per un attuatore a corona dotato di punte. La rappresentazione bidimensionale di figura costituisce una semplificazione di un fenomeno tridimensionale.

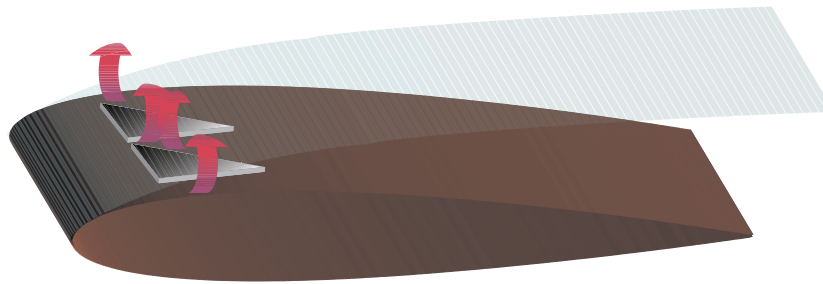
Nel caso del DBD, la scelta di una geometria a punta ha motivazioni diverse a causa dei differenti fenomeni fisici che intervengono. Infatti, la particolare geometria permette la formazione di plasma sui lati della punta triangolare, inducendo anche una componente trasversale della velocità. In questo modo si verifica la formazione di vortici che richiamano vicino a parete aria dall'esterno dello strato limite. Questo processo energizza lo strato limite permettendo di ottenere gli effetti benefici desiderati. Il principio di funzionamento pertanto è simile a quello di un generatore di vortici (Fig. 4.13). La dimensione dei vortici generati, che dipende dalla geometria delle punte, deve essere sufficiente a richiamare aria veloce dall'esterno dello strato limite<sup>3</sup>: affinché ciò avvenga la distanza fra le punte deve essere tale da permettere lo sviluppo di vortici di dimensioni adeguate.

Infine, un ulteriore effetto benefico della geometria a punta rispetto a quella piana, come mostrato da Thomas et al. in [64], è un incremento della produzione di spinta soprattutto alle basse tensioni. Ciò è dovuto al fatto che, come già sottolineato per gli attuatori a corona, il campo elettrico è maggiormente concentrato in alcuni punti, favorendo una diminuzione della tensione di innesco del plasma.

---

<sup>3</sup>Ai limitati numeri di Reynolds delle prove, lo strato limite in corrispondenza dello stallo ha uno spessore consistente, dell'ordine di alcuni millimetri.





**Figura 4.13:** Principio di funzionamento del DBD come generatore di vortici.

### 4.3.2 Modellazione del fenomeno

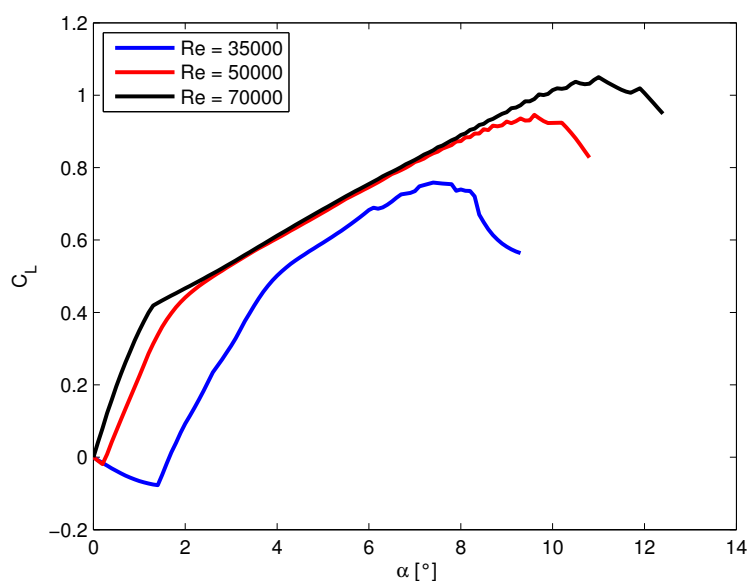
Le prove di pesata sono state realizzate per tre valori nominali della velocità in galleria, ossia 5, 7.5 e 10  $m/s$ . Poiché il profilo NACA0015 utilizzato ha una corda di 100  $mm$ , i numeri di Reynolds corrispondenti sono pari a circa 35000, 50000 e 70000<sup>4</sup>. In Fig. 4.14 sono riportate le curve di portanza per tali valori del numero di Reynolds. Le curve esibiscono un comportamento non lineare per incidenze pre-stallo poiché i numeri di Reynolds sono limitati. In particolare la non linearità della curva per  $Re = 35000$  risulta particolarmente evidente; per incidenze tra  $0^\circ$  e  $2^\circ$  circa la pendenza assume un valore negativo per poi diventare positiva ad incidenze superiori. Inoltre, comportamento osservabile anche per le curve agli altri Reynolds, la pendenza cambia di valore ad un'incidenza compresa tra  $1^\circ$  e  $4^\circ$  a seconda del numero di Reynolds. Lo stallo nominale avviene tra i  $7^\circ$  e gli  $8^\circ$  per  $Re = 35000$ , intorno ai  $9^\circ$  per  $Re = 50000$  e tra i  $10^\circ$  e  $11^\circ$  per  $Re = 70000$ .

Nelle nostre prove, la presenza degli attuatori sul dorso del profilo e dei cavetti necessari alla loro alimentazione ha contribuito ad un lieve decadimento delle prestazioni aerodinamiche rispetto alle condizioni ideali del profilo *pulito*, conducendo a valori del coefficiente di portanza lievemente inferiori rispetto a quelli previsti da X-foil e andando a modificare leggermente le caratteristiche dello stallo.

### 4.3.3 Procedura operativa

L'obiettivo delle prove è stato quello di effettuare un'ottimizzazione geometrica degli attuatori: i parametri che sono stati fatti variare, a parità di estensione in apertura degli attuatori, sono la lunghezza delle punte, a parità del numero totale di punte e quindi della dimensione della base delle stesse,

<sup>4</sup>Come valori di densità e viscosità sono stati considerati i valori standard di  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  e  $\mu = 1.81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .



**Figura 4.14:** Curve  $C_L - \alpha$  per NACA0015 ai diversi numeri di Reynolds.

e il numero delle punte, a parità dello loro lunghezza. La denominazione dei diversi attuatori provati segue la numerazione riportata in Tab. 3.1: in particolare indicheremo con la lettera C o D seguita dal numero corrispondente a una certa geometria, l'attuatore corona o DBD considerato al momento. Per quanto riguarda il corona, con attuatore C1 indichiamo la configurazione base *wire-to-plate*, mentre per il DBD, l'attuatore D1 presenta un elettrodo esposto piano.

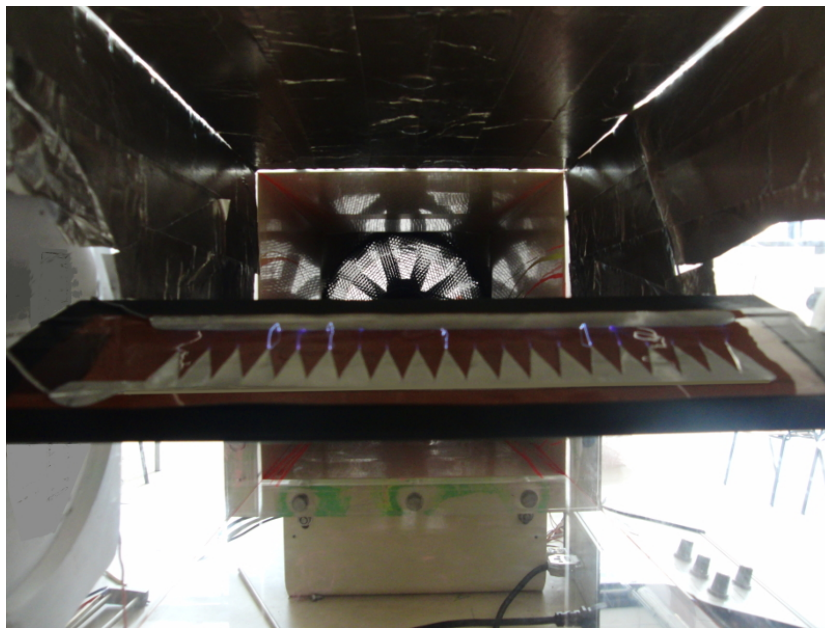
Le prove sono state eseguite a tre differenti valori nominali di velocità (5, 7.5 e 10  $m/s$ ) e in due posizioni in corda (10% e 40%) per tutti gli attuatori a corona, ad eccezione del C1 che è stato provato esclusivamente al 10%<sup>5</sup>. Per il DBD invece è stata considerata una sola posizione in corda (10%) e la sola velocità di 5  $m/s$  per tutti gli attuatori, ad eccezione dell'attuatore più performante, che è stato provato a tutte le velocità. La motivazione di ciò è dovuta al fatto che l'efficacia degli attuatori al crescere della velocità si riduceva rapidamente. Analogamente per quanto riguarda la posizione in corda, i DBD collocati al 40% della corda non hanno mostrato effetti apprezzabili nemmeno alla velocità più bassa considerata.

La posizione di riferimento in corda si riferisce al primo punto in cui si genera il plasma, ossia al termine delle punte dell'anodo per quanto riguarda gli

<sup>5</sup>Per tenere in posizione e in tensione il filo di rame sono state utilizzate due viti alle estremità del profilo attorno alle quali il cavo è stato avvolto. La loro collocazione al 40% della corda era impossibile, vista la vicinanza con il perno di supporto.

attuatori a corona, mentre per quanto riguarda i DBD alle base delle stesse, come si può apprezzare in Fig. 4.3.

Per quanto riguarda le prove al 40% della corda, gli attuatori sono stati posizionati all'interno della cava creata appositamente sul dorso del profilo, con nastro biadesivo al fine di garantire una perfetta adesione. Questo non ha creato particolari disturbi all'aerodinamica del profilo. Analizzando quindi i primi risultati ottenuti con gli attuatori in tale posizione, abbiamo deciso di provarli in una posizione più avanzata in corda, al fine di ottenere effetti maggiori, in quanto l'efficacia dell'attuazione migliora avvicinandosi al punto di separazione. Questo ha comportato tuttavia una degradazione delle prestazioni aerodinamiche del profilo, in quanto la cava realizzata non era sufficientemente estesa da permettere l'alloggiamento degli attuatori al 10% della corda: pertanto gli attuatori sono stati collocati direttamente sulla superficie del profilo. La conseguenza di ciò si traduce in una leggera diminuzione del coefficiente massimo di portanza ed in uno stallo più graduale. Il profilo installato in galleria e dotato di un attuatore a corona è mostrato in Fig. 4.15.



**Figura 4.15:** Profilo e attuatore a corona in galleria del vento. Lo spazio tra gli elettrodi è stato evidenziato innescando intenzionalmente degli archi elettrici.

I valori di portanza, resistenza e momento sono stati acquisiti simultaneamente per ogni prova, ma la sola portanza è stata considerata ai fini della nostra analisi, in quanto il parametro scelto per valutare la bontà di un at-

tuatore è l'incremento del coefficiente massimo di portanza.

Le caratteristiche elettriche misurate sugli attuatori durante le prove sono quelle riportate in Tab. 4.1. Le prove sono state tutte eseguite alla stessa tensione (a meno dell'incertezza strumentale).

### **Eddy current**

Durante le prove dei DBD, è stato riscontrato un disturbo nelle misure fornite dalla bilancia. In un primo momento, l'ipotesi più accreditata era quella di un accumulo di carica elettrostatica sulle pareti in plexiglass della galleria, che portava alla nascita di forze coulombiane di attrazione tra il profilo e la parete superiore della galleria stessa. Per cercare di contrastare il fenomeno, la metà superiore delle pareti interne della camera di prova è stata rivestita con nastro di alluminio e messa a terra. Tuttavia, ciò non ha risolto il problema. Ulteriori indagini ci hanno fatto propendere per una diversa ipotesi, legata alla nascita di correnti di Foucault (*eddy currents*): queste sono delle correnti indotte in masse metalliche conduttrici che si trovano immerse in un campo magnetico variabile o che, muovendosi, attraversano un campo magnetico costante o variabile. In ogni caso è la variazione del flusso magnetico che genera queste correnti. Il termine *eddy current* (letteralmente correnti di vortice) deriva dal comportamento del remo quando lo si immerge nell'acqua, il quale crea piccoli vortici mentre la barca avanza.

Nel caso in questione, il DBD, operando a tensioni variabili ad altissima frequenza, causa la nascita di un campo magnetico variabile, il quale investe il goniometro metallico della bilancia, provocando la formazione di queste correnti che passano quindi, attraverso la spina di supporto, all'interno del corpo bilancia, disturbando le misure.

Tale problema è stato risolto sostituendo il disco metallico (pezzo (4) di Fig. 3.9) che permette di variare l'incidenza del profilo con un manicotto in nylon realizzato tramite lavorazione al tornio.

### 4.3.4 Risultati

#### Curve $C_L - \alpha$

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti in termini di incremento percentuale del coefficiente massimo di portanza ( $\Delta C_{L_{max}}$ ) per tutte le prove eseguite; inoltre vengono mostrate alcune curve  $C_L - \alpha$  che abbiamo misurato, con lo scopo di mostrare l'effetto dell'attuazione. Tutte le restanti curve sono riportate in App. D. L'incremento del coefficiente massimo di portanza, riportato per tutte le prove eseguite nella Tab. 4.2 per i corona e nella Tab. 4.3 per i DBD, è calcolato come:

$$\Delta C_{L_{max}} = \frac{\max C_{L_{on}} - \max C_{L_{off}}}{\max C_{L_{off}}} \quad (4.5)$$

In Fig. 4.16 vengono mostrate le curve di portanza del profilo senza e con l'azione dell'attuatore C7 per le tre velocità provate e per la posizione in corda più avanzata. E' immediato osservare che l'azione dell'attuatore è visibile a partire dall'incidenza di stallo, come previsto dalla teoria, e che l'autorità del controllo decade al crescere della velocità: l'angolo di incidenza di stallo viene ritardato di  $2^\circ$  circa per  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $1^\circ$  per  $U = 7.5 \text{ m/s}$  e non si osserva alcuna posticipazione per  $U = 10 \text{ m/s}$  pur verificandosi un leggero incremento del  $C_{L_{max}}$ . Inoltre, come si può constatare dalla Tab. 4.2, i valori del  $\Delta C_{L_{max}}$  percentuale si riducono all'aumentare della velocità.

Lo stesso comportamento è osservabile in Fig. 4.17 anche per l'attuatore DBD nelle medesime condizioni di prova.

Considerando il fatto che gli attuatori appena descritti sono i più prestanti rispettivamente per i corona ed i DBD, si può notare un'efficacia leggermente inferiore per il DBD che, in particolare alla velocità più elevata, non mostra effetti significativi. Bisogna inoltre sottolineare che, come mostrato in Tab. 4.1, il DBD richiede maggiore potenza per indurre prestazioni confrontabili, se non leggermente inferiori, rispetto al corona.

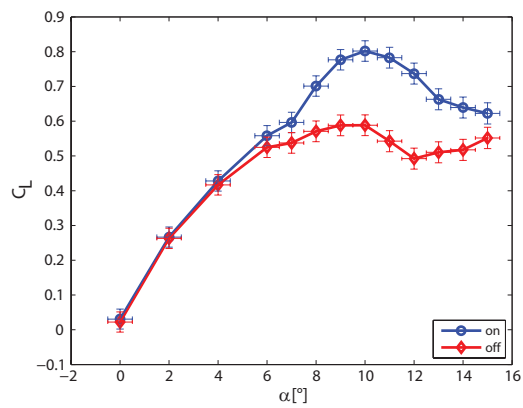
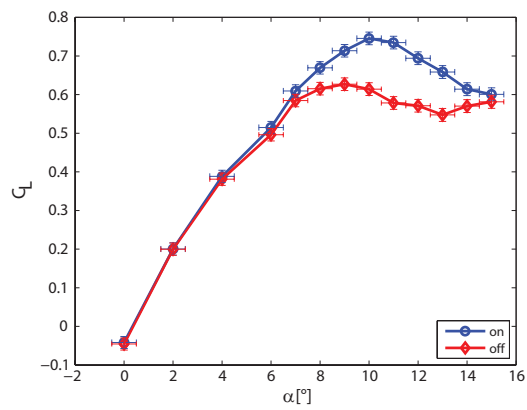
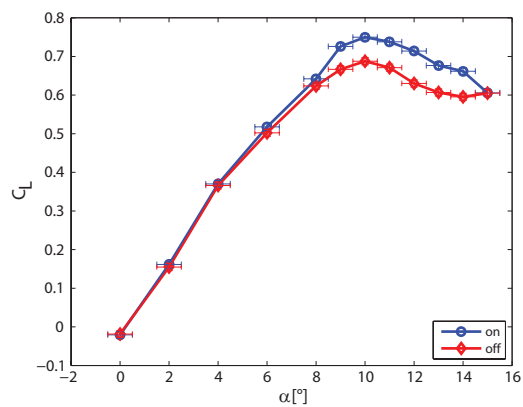
In Fig. 4.18, si mostra il comportamento di un attuatore a corona (C5), per una velocità fissata al variare della posizione in corda. Come atteso, l'effetto dell'attuatore si riduce in maniera significativa per la posizione più arretrata; questo è legato al fatto che l'attuazione è maggiormente efficace se avviene in prossimità del punto di separazione, ossia nei pressi del bordo d'attacco. Come anticipato precedentemente, le curve di portanza con l'attuatore spento per le due posizioni in corda differiscono, come è evidente dalle Fig. 4.18a e 4.18b e motivato nella Sez. 4.3.3.

**Tabella 4.2:** Valori del  $\Delta C_{L_{max}}$  percentuale per gli attuatori a corona.

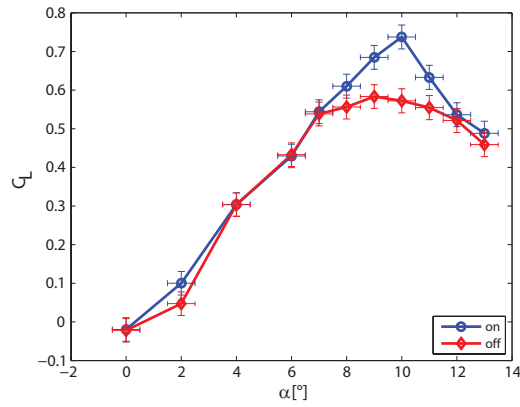
	Velocità [m/s]	$\Delta C_{L_{max}\%}$ per $x/c = 40\%$	$\Delta C_{L_{max}\%}$ per $x/c = 10\%$
C1	5	-	30.48
	7.5	-	9.77
	10	-	2.81
C2	5	4.76	15.17
	7.5	0.37	4.59
	10	0.93	2.75
C3	5	20.35	24.19
	7.5	3.49	6.82
	10	2.32	4.92
C4	5	27.4	30.04
	7.5	6.08	14.92
	10	2.75	6.36
C5	5	20.16	30.59
	7.5	3.28	16.64
	10	1.99	7.43
C6	5	15.43	25.65
	7.5	2.47	12.01
	10	1.54	2.48
C7	5	28.8	36.3
	7.5	10.2	18.92
	10	3.55	9.04

**Tabella 4.3:** Valori del  $\Delta C_{L_{max}}$  percentuale per gli attuatori DBD.

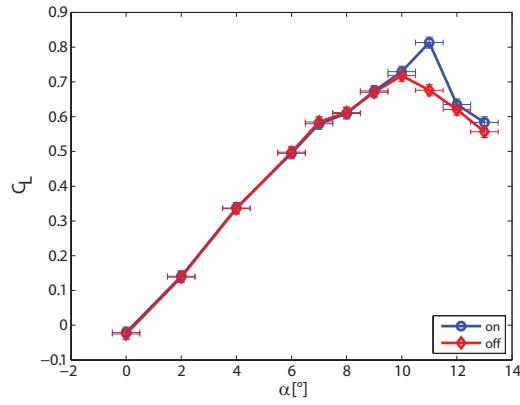
	Velocità [m/s]	$\Delta C_{L_{max}\%}$ per $x/c = 10\%$
D1	5	17.73
D2	5	13.76
D3	5	10.83
D4	5	6.69
D5	5	18.52
D6	5	26.41
	7.5	13.24
	10	1.14
D7	5	0.96

(a)  $C7$ ,  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(b)  $C7$ ,  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(c)  $C7$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .

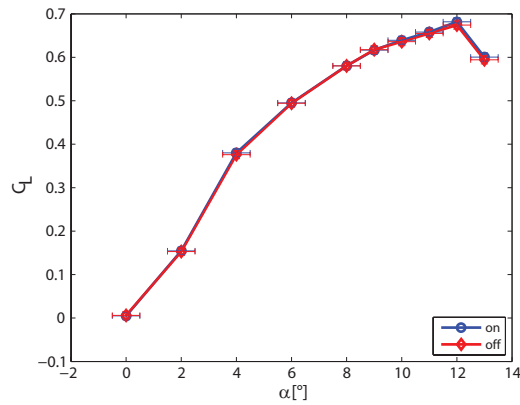
**Figura 4.16:** Curve di portanza per l'attuatore C7 collocato al 10% della corda e per tre differenti velocità in galleria.



(a) D6,  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .



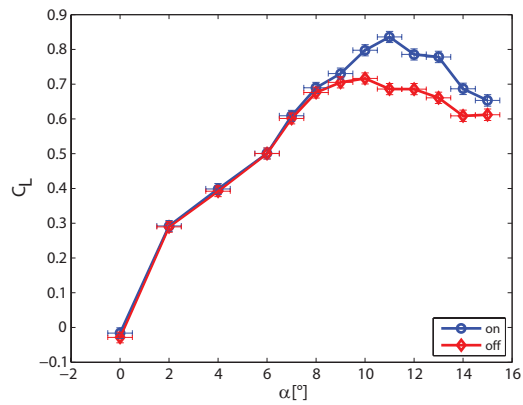
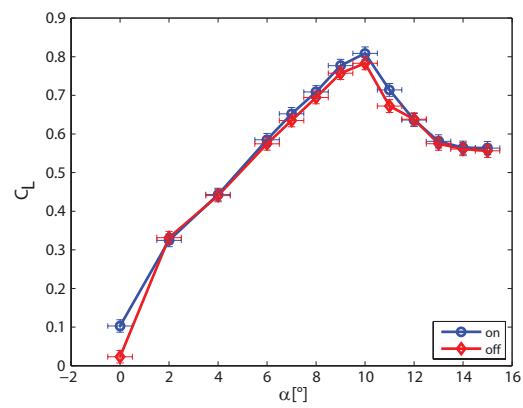
(b) D6,  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .



(c) D6,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .

**Figura 4.17:** Curve di portanza per l'attuatore D6 collocato al 10% della corda e per tre differenti velocità in galleria.

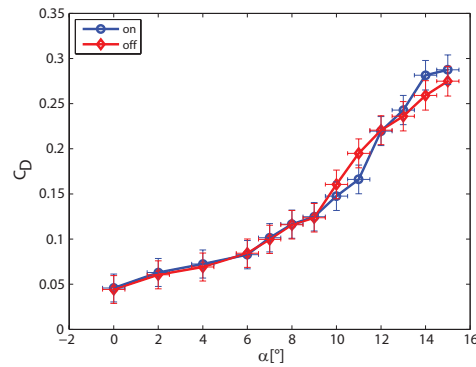


(a)  $x/c = 10\%$ .(b)  $x/c = 40\%$ .

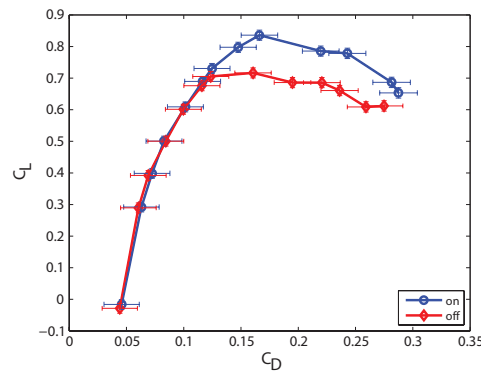
**Figura 4.18:** Confronto delle curve di portanza per l'attuatore C5 al 10% e al 40% della corda a 7.5 m/s.

**Curve  $C_D - \alpha$**

Sebbene per questo lavoro di tesi ci siamo limitati all'analisi delle curve di portanza per caratterizzare le prestazioni degli attuatori, riportiamo a titolo d'esempio il comportamento del coefficiente di resistenza al variare dell'incidenza ed una curva polare (Fig. 4.19) per un attuatore a corona. L'attuatore induce una riduzione del  $C_D$  per tutte le incidenze a partire da quella di stallo e fino a quando è in grado di mantenere lo strato limite attaccato. Confrontando infatti le Fig. 4.18a e 4.19a che si riferiscono alla medesima prova, l'azione dell'attuatore sulla portanza e sulla resistenza è ben evidente per gli angoli di incidenza compresi tra  $9^\circ$  e  $11^\circ$ . Tale risultato si riflette direttamente sulla polare che mostra un aumento di portanza in corrispondenza di una riduzione di resistenza nei pressi dello stallo (Fig. 4.19b).



(a)  $C_D - \alpha$ .



(b) Polare.

**Figura 4.19:** Curva di resistenza e polare dell'attuatore C5 per  $U = 7.5 \text{ m/s}$  e  $x/c = 10\%$ .

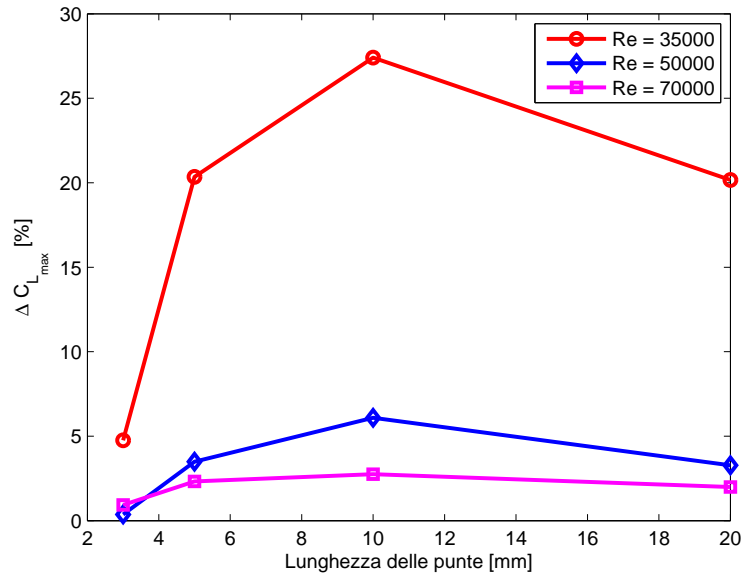
### Curve $\Delta C_{L_{max}}$ – lunghezza punte

In questa sezione vengono riportati i risultati dello studio parametrico condotto in funzione della lunghezza delle punte sia per gli attuatori a corona che per i DBD. Il numero delle punte è fissato a 20.

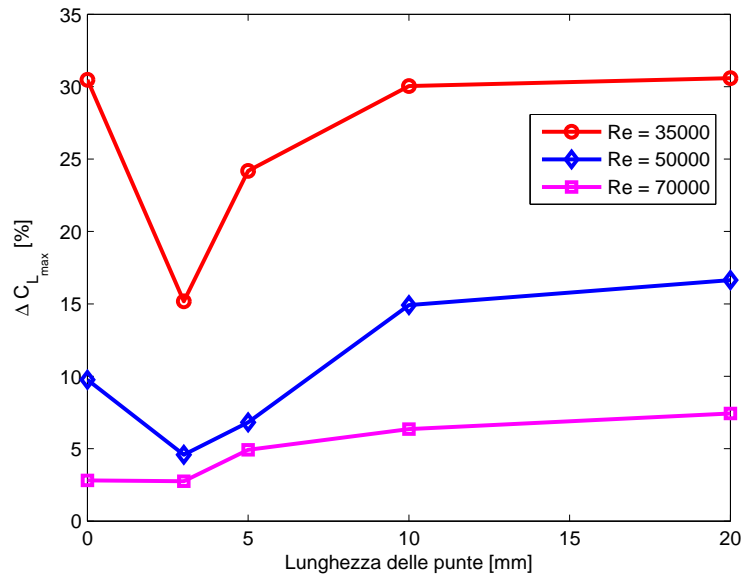
Per quanto riguarda gli attuatori a corona si evince un comportamento differente a seconda della posizione in corda. In particolare in Fig. 4.20 viene mostrato l'incremento del coefficiente massimo di portanza per gli attuatori collocati al 40% della corda: è individuabile un massimo per una lunghezza delle punte di 10 mm per tutti i numeri di Reynolds. Osservando invece la Fig. 4.21, l'andamento riscontrato con gli attuatori posti al 10% della corda è di tipo asintotico: a  $Re = 35000$  il limite asintotico è praticamente raggiunto per una lunghezza delle punte di 10 mm; ai numeri di Reynolds superiori il limite asintotico viene raggiunto per lunghezze delle punte più elevate. È interessante in questo caso operare il confronto con il caso base *wire-to-plate*, identificato con una lunghezza delle punte di 0 mm nei grafici di questa sezione. Per  $Re = 35000$  il limite asintotico è confrontabile con il valore di  $\Delta C_{L_{max\%}}$  indotto dall'attuatore C1; tuttavia, a Reynolds più elevati il valore di  $\Delta C_{L_{max\%}}$  cui si tende con una configurazione a punte è ben superiore rispetto a quello indotto da una configurazione *wire-to-plate*. Tale comportamento asintotico è legato alla deviazione delle linee isopotenziali del campo elettrico dovuta alla presenza delle punte. Se in assenza di punte, tali linee isopotenziali risultano parallele alle estremità degli elettrodi, l'introduzione delle punte ne causa una deviazione, come mostrato in Fig. 4.12, tanto più accentuata quanto più è allungata la punta; a ciò corrisponde anche un aumento locale del campo elettrico. Tuttavia, oltre una certa lunghezza delle punte la deviazione delle linee isopotenziali diventa indipendente dalla profondità della punta stessa, poiché il campo elettrico non risente più delle condizioni al contorno imposte dalla geometria a monte della punta.

Il decadimento delle prestazioni associato alle punte meno acute in Fig. 4.21 è dovuto alla minore estensione del plasma rispetto alla configurazione *wire-to-plate* ed al fatto che l'effetto punta non è ancora del tutto efficace per punte di questa lunghezza: pertanto le punte più corte forniscono le prestazioni peggiori.

Il diverso comportamento riscontrato per le due posizioni in corda potrebbe essere legato alla natura differente dello strato limite che, da previsioni di X-Foil, è sempre laminare al 10% della corda per tutti i Reynolds provati all'incidenza di stallo, mentre si presenta turbolento al 40% della corda. Questo comporta una morfologia diversa, ed in particolare una differente pendenza a parete, dei profili di velocità con i quali il plasma si trova ad interagire e ciò potrebbe spiegare questa differenza di comportamento.

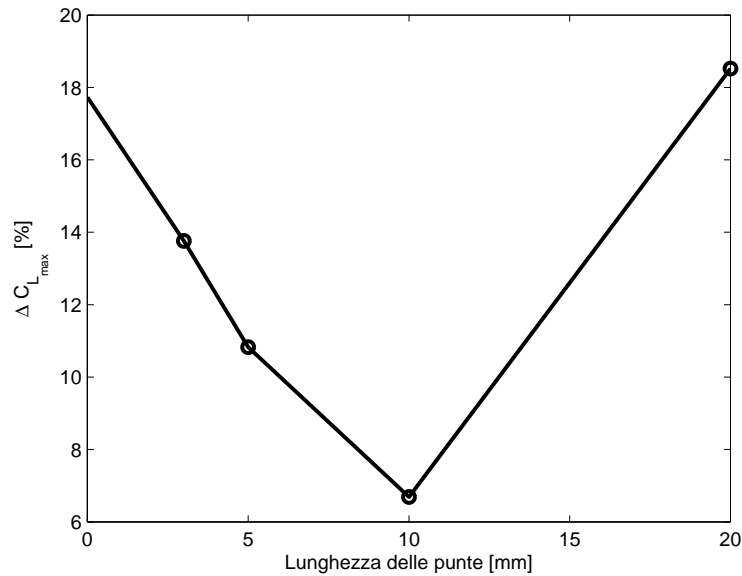


**Figura 4.20:** Corona:  $\Delta C_{L_{max}}\%$  al variare della lunghezza delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 40\%$ ).



**Figura 4.21:** Corona:  $\Delta C_{L_{max}}\%$  al variare della lunghezza delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 10\%$ ).

Nel caso degli attuatori DBD, l'andamento del  $\Delta C_{L_{max}\%}$  al variare della lunghezza delle punte presenta un minimo marcato in corrispondenza di  $l = 10 \text{ mm}$  (Fig. 4.22). La ragione di tale comportamento è spiegata dal principio fisico di funzionamento del DBD dotato di punte. Rispetto alla configurazione piana, in cui tutta la potenza attiva viene spesa per fornire un incremento di quantità di moto longitudinale, la presenza delle punte fa sì che la quantità di moto indotta abbia una componente trasversale: infatti, l'attuatore induce localmente una velocità in direzione normale all'estremità dell'elettrodo superiore. Per punte di dimensioni comprese tra 3 e 10 mm questo va a penalizzare le prestazioni del DBD poiché parte della potenza viene impiegata per generare velocità trasversale senza alcun beneficio apprezzabile. Per punte di 20 mm le prestazioni sono invece confrontabili con quelle del caso base: quello che accade è che l'attuatore inizia a funzionare come generatore di vortici quando la componente di velocità trasversale è sufficientemente elevata da creare vortici di dimensioni tali da richiamare aria veloce dall'esterno dello strato limite (Sez. 4.3.1).



**Figura 4.22:** DBD:  $\Delta C_{L_{max}\%}$  al variare della lunghezza delle punte per  $Re = 35000$ .

#### Curve $\Delta C_{L_{max}}$ – numero delle punte

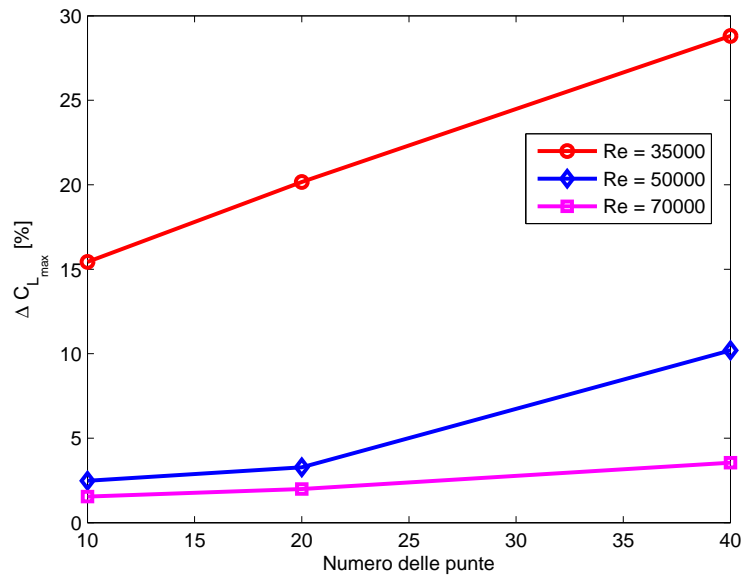
In questa sezione vengono riportati i risultati dello studio parametrico condotto in funzione del numero delle punte sia per gli attuatori a corona

che per i DBD. La lunghezza delle punte è fissata a 20 mm. In questo caso il comportamento per gli attuatori a corona al variare della posizione in corda è analogo come si può osservare in Fig. 4.23 e 4.24: ad un aumento del numero di punte è associato un incremento delle prestazioni. Dalla Fig. 4.24 si può inoltre effettuare un'ulteriore osservazione riguardo la superiorità di una configurazione a punte piuttosto che quella *wire-to-plate*. Per numeri di Reynolds pari a 50000 e 70000 qualsiasi configurazione con le punte provata fornisce prestazioni migliori rispetto alla configurazione base; anche per  $Re = 35000$  si può osservare un comportamento analogo anche se solo per un numero di punte superiore a 10. Le prestazioni più elevate fornite dalla geometria a punte sono dovute alla presenza di punti preferenziali di innesco del plasma. All'aumentare del numero di punte, e quindi quando la distanza fra le punte diventa molto piccola rispetto al gap tra gli elettrodi, si tende idealmente ad una geometria a *pettine* con un numero elevato di punti di innesco. A parità di apertura, un maggior numero di punte garantisce una maggiore estensione del plasma nello spazio *inter-elettrodo*, in quanto le punte sono più vicine ed i ventagli attraverso cui si espande il plasma risultano sempre più sovrapposti. Il ragionamento potrebbe tuttavia essere limitato dal fatto che, per punte eccessivamente vicine (ossia per un numero eccessivo delle stesse), il comportamento delle punte potrebbe assimilarsi a quello del filo continuo proprio della configurazione *wire-to-plate*, perdendo quindi i benefici legati ai punti preferenziali di innesco della scarica; sono ancora in corso studi al riguardo.

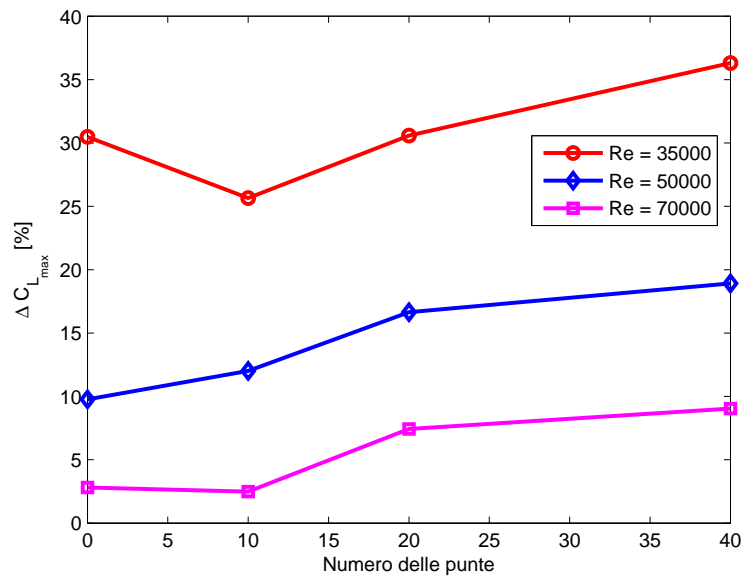
Nel caso del DBD si può osservare in Fig. 4.25 la presenza di un ottimo per un numero di punte pari a 10. La ragione di questo comportamento è ancora una volta legata al funzionamento del DBD come generatore di vortici. Infatti, nel caso con 10 punte le prestazioni sono migliori rispetto al caso di elettrodo piano poiché ha luogo tale fenomeno. All'aumentare del numero di punte, lo spazio fra le stesse diminuisce, riducendo di conseguenza le dimensioni dei vortici generati i quali perdono progressivamente di efficacia (Sez. 4.3.1).

#### Curve $\Delta C_{L_{max}}$ – posizione in corda

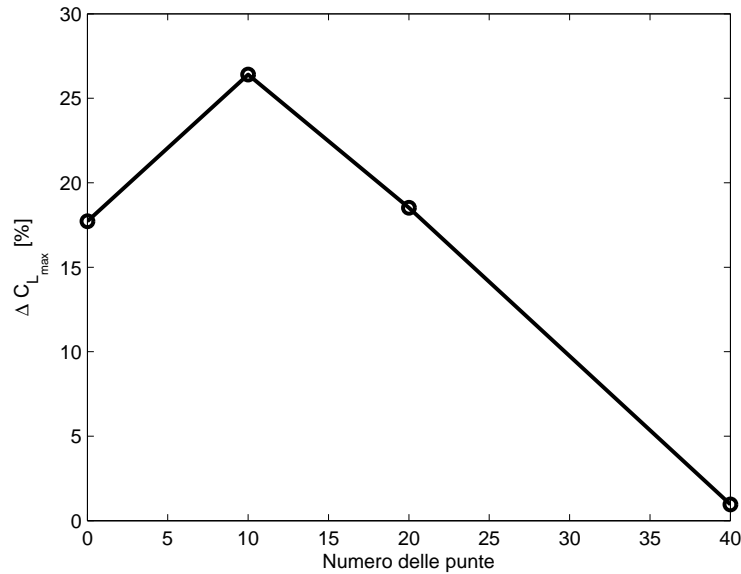
In Fig. 4.26 viene mostrato il decadimento delle prestazioni degli attuatori a corona in seguito ad un arretramento della loro posizione in corda, a tutti i numeri di Reynolds provati. Con un'indagine effettuata solamente su due posizioni in corda non è possibile identificare una qualche legge che descriva tale comportamento; tuttavia tale decadimento delle prestazioni è previsto dalla teoria e viene confermato da questa serie di prove.



**Figura 4.23:** Corona:  $\Delta C_{L_{max\%}}$  al variare del numero delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 40\%$ ).



**Figura 4.24:** Corona:  $\Delta C_{L_{max\%}}$  al variare del numero delle punte per tre diversi numeri di Reynolds ( $x/c = 10\%$ ).



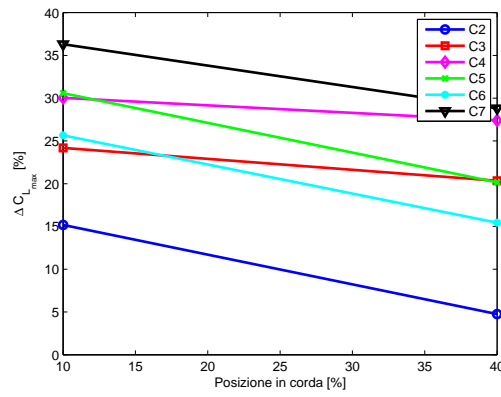
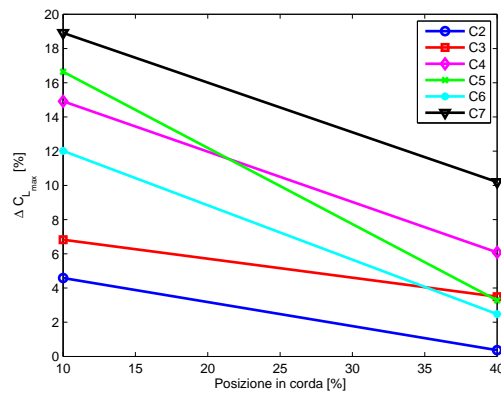
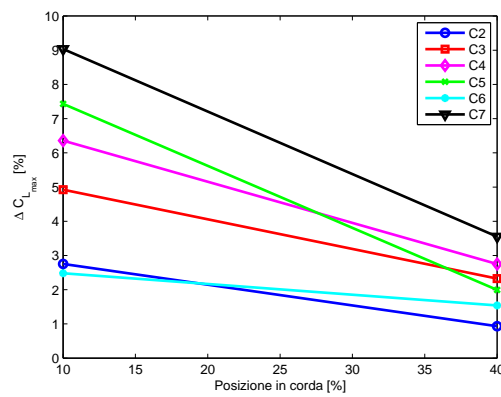
**Figura 4.25:** DBD:  $\Delta C_{L_{max}\%}$  al variare del numero delle punte per  $Re = 35000$ .

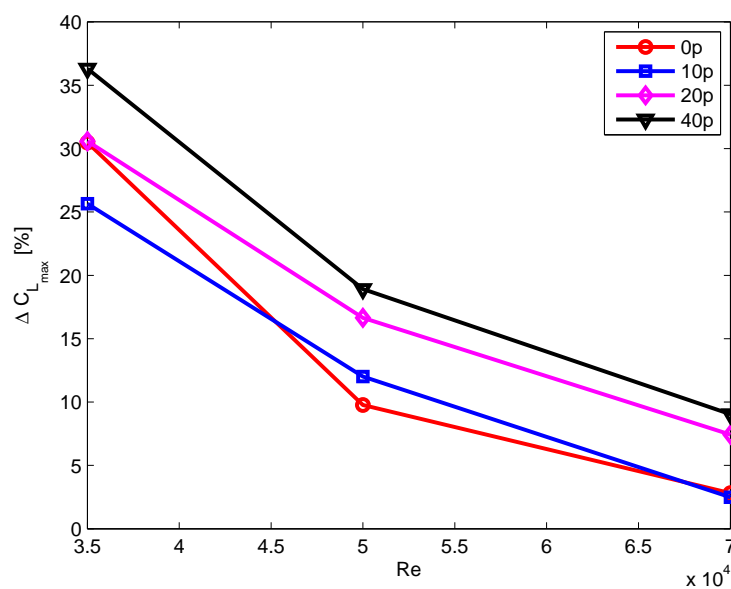
#### Curve $\Delta C_{L_{max}}$ – Reynolds

Questa sezione è dedicata allo studio del  $\Delta C_{L_{max}\%}$  al variare del numero di Reynolds. Nella Fig. 4.27 è riportato l'andamento dell'incremento del coefficiente massimo di portanza parametrizzato sul numero delle punte per gli attuatori a corona. Quello che si può osservare per ogni geometria dell'attuatore è un decadimento delle prestazioni all'aumentare del numero di Reynolds a prescindere dalla posizione in corda. Per la posizione in corda più arretrata si riscontra una tendenza a raggiungere un valore asintotico già ai Reynolds indagati (Fig. 4.27b); tale comportamento probabilmente è verificabile anche per la posizione in corda più avanzata per numeri di Reynolds più elevati. La ragione del decadimento delle prestazioni è legata alla diminuzione dell'autorità del controllo dovuta al fatto che, mentre la potenza immessa nello strato limite dagli attuatori è costante, quella del flusso esterno aumenta con il cubo della velocità.

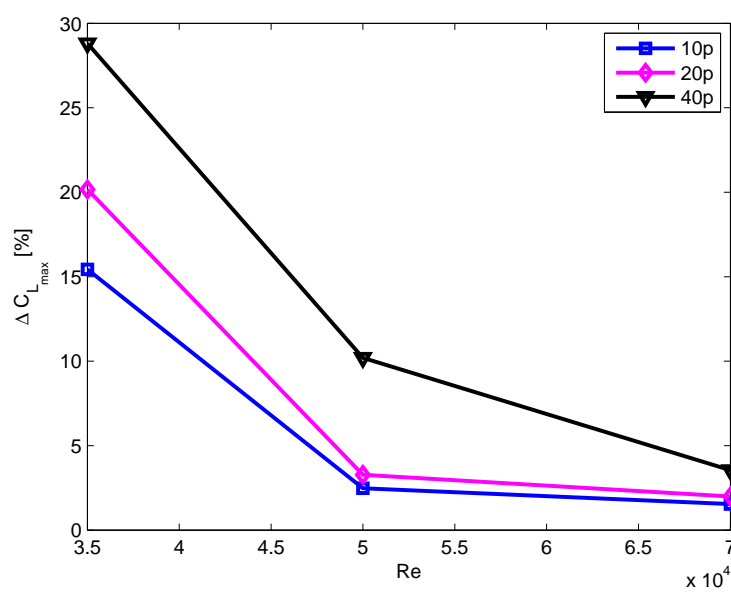
Un risultato particolarmente interessante è visibile in Fig. 4.27a: per  $Re = 35000$  la configurazione *wire-to-plate* induce prestazioni confrontabili con l'attuatore a 20 punte; al crescere del numero di Reynolds tuttavia presenta un decadimento più rapido rispetto a tutte le configurazioni con punte, ragione per cui si può ipotizzare una superiorità della geometria a punte per applicazioni ad alto numero di Reynolds.



(a)  $Re = 35000$ .(b)  $Re = 50000$ .(c)  $Re = 70000$ .**Figura 4.26:** Corona:  $\Delta C_{L_{max}}$  al variare della posizione in corda.

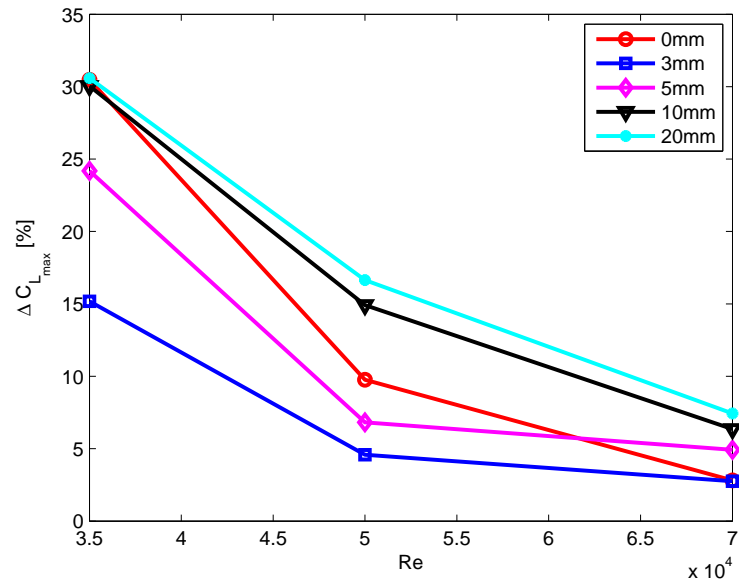
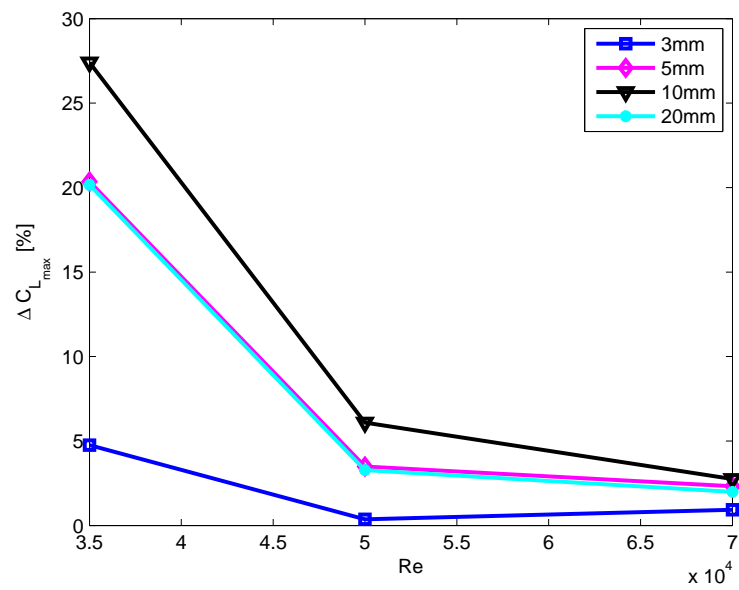


(a)  $x/c = 10\%$ .



(b)  $x/c = 40\%$ .

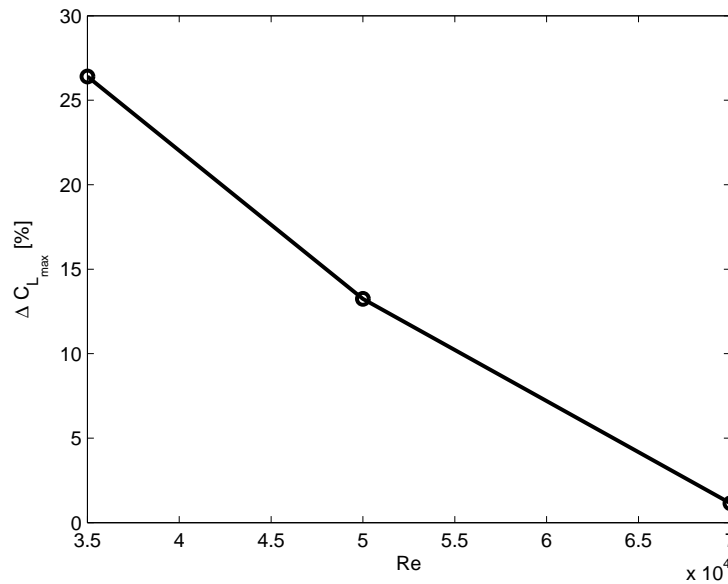
**Figura 4.27:** Corona:  $\Delta C_{L_{max}}$  al variare del Reynolds parametrizzato sul numero di punte.

(a)  $x/c = 10\%$ .(b)  $x/c = 40\%$ .

**Figura 4.28:** Corona:  $\Delta C_{L_{max}}$  al variare del Reynolds parametrizzato sulla lunghezza delle punte.

In Fig. 4.28 è riportato l'andamento del  $\Delta C_{L_{max}\%}$  al variare del numero di Reynolds parametrizzato sulla lunghezza delle punte. Le considerazioni precedenti valgono in gran parte anche per questi risultati. Da sottolineare è anche in questo caso il comportamento dell'attuatore *wire-to-plate*: se a  $Re = 35000$  le prestazioni sono confrontabili con quelle degli attuatori a punte più efficaci ( $l = 10$  e  $20$  mm), al crescere del numero di Reynolds tali performance decadono più velocemente e già a  $Re = 70000$  qualsiasi configurazione a punte è preferibile (Fig. 4.28a).

Nel caso del DBD le prestazioni al variare del numero di Reynolds sono state indagate esclusivamente per l'attuatore più efficace al Reynolds più basso (D6). Come già riscontrato per gli attuatori a corona, in Fig. 4.29 si può osservare il decadimento delle prestazioni al variare del numero di Reynolds.



**Figura 4.29:** DBD:  $\Delta C_{L_{max}\%}$  al variare del numero di Reynolds per l'attuatore D6.

### 4.3.5 Analisi delle incertezze

In questa sezione viene analizzata la propagazione degli errori nelle misure del  $C_L$  presentate nella Sez. 4.3.4. Di seguito vengono riportate le incertezze di misura legate a ciascuno strumento utilizzato.

- Calibro ventesimale:  $w_c = \pm \frac{1}{40}$  mm. E' stato utilizzato per la misura di corda ed apertura del profilo.

- Bilancia:  $w_F = \pm 0.02 N$ . Cautelativamente è stata assunta come incertezza il doppio della risoluzione dello strumento.
- Trasduttori di pressione:  $w_P = \pm 1 mV$ . La calibrazione dei trasduttori di pressione ha permesso di migliorare l'accuratezza originaria dello strumento, che era pari a  $w_P = \pm 0.1 V$ .
- Goniometro:  $w_\alpha = \pm 0.5^\circ$ .

La propagazione degli errori è stata effettuata tramite RSS (*root sum square*), indicata in Eq. (4.6), dove con  $V$  indichiamo la misura indiretta della quale si vuole conoscere l'incertezza  $w_V$  e con  $x_i$  le misure dirette dalle quali dipende il funzionale  $V$ .

$$w_V = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial V}{\partial x_i} w_{x_i} \right)^2}. \quad (4.6)$$

Nel caso in questione il funzionale  $V$  è il coefficiente di portanza in Eq. (4.7).

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 b c}. \quad (4.7)$$

Avendo correlato le misure del tubo di Pitot e della presa statica durante la procedura di taratura della galleria (Sez. 3.1), è possibile ottenere la misura di pressione dinamica in galleria indirettamente attraverso l'interpolazione lineare di Eq. (4.8).

$$P_{din} = k P_{st} + q, \quad (4.8)$$

con le costanti di interpolazione  $k$  e  $q$  affette anch'esse da incertezza. Applicando la propagazione degli errori di Eq. (4.6) al coefficiente di portanza di Eq. (4.7), dove la pressione dinamica è stata sostituita con l'espressione di Eq. (4.8), è possibile calcolare l'incertezza sul coefficiente di portanza stesso mediante l'Eq. (4.9).

$$w_{C_L} = \frac{L}{(k P_{st} + q) b c} \sqrt{\frac{w_L^2}{L^2} + \left( \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right) w_c^2 + \frac{(P_{st} w_k)^2 + (k w_{P_{st}})^2 + w_q^2}{(k P_{st} + q)^2}}. \quad (4.9)$$

Secondo tale analisi i valori di incertezza relativa tipici si assestano nell'ordine del 3.5 – 5% per  $U = 5 m/s$ , 2 – 3% per  $U = 7.5 m/s$  e 1 – 2% per  $U = 10 m/s$ .

### 4.3.6 Confronto con la letteratura

E' interessante operare un confronto tra i risultati ottenuti nel presente lavoro di tesi e quelli riportati in letteratura per attuatori a geometria piana, ossia senza punte. Bisogna innanzitutto puntualizzare che, sebbene gli attuatori a corona siano stati sviluppati per primi, tuttavia esistono molti meno esempi rispetto ai DBD in letteratura riguardo alla loro applicazione in problemi di *flow control*, quale il controllo della separazione dello strato limite su profili aerodinamici. In pratica tutta la letteratura utilizzata per questo confronto riguarda i DBD, in quanto non è stato possibile trovare alcun articolo riguardo l'applicazione di attuatori a corona su profili aerodinamici.

In [88], gli autori misurano le curve di portanza per un profilo NACA0015 in galleria del vento a  $Re = 158000$  ( $U = 20$  m/s), con attuatore DBD spento e acceso. L'attuatore era collocato esattamente al bordo d'attacco ed alimentato con una tensione di  $11$  kV<sub>pp</sub> a una frequenza di  $5$  kHz. L'incidenza di stallo viene posticipata di  $2^\circ$ , con un incremento del  $C_{L_{max}}$  del  $4.5\%$ . Ricordiamo che il nostro DBD più prestante non è più in grado di riattaccare lo strato limite a un numero di Reynolds pari a circa la metà di questo: tuttavia il risultato non sorprende, in quanto i DBD utilizzati in [88] vengono alimentati con tensioni  $5$  volte superiori alle nostre.

In [89], gli autori applicano un DBD in configurazione tradizionale al  $10\%$  della corda di un NACA0015 in galleria del vento a  $Re = 30500$  ( $U = 3.8$  m/s). L'incremento di  $C_{L_{max}}$  è del  $32\%$  circa, con il DBD alimentato con una tensione di  $5$  kV<sub>pp</sub> (circa  $2$  volte quella utilizzata nelle nostre prove) a una frequenza di  $3.5$  kHz. E' interessante sottolineare che noi abbiamo ottenuto un valore del  $\Delta C_{L_{max}}$  del  $26.4\%$  (attuatore D6) per un numero di Reynolds leggermente superiore ( $35000$ ) e una tensione pari a circa la metà; nelle stesse condizioni, gli attuatori a corona hanno permesso di ottenere prestazioni ancora più elevate.

In [90], gli autori dimostrano l'efficacia dei DBD per il controllo della separazione ad alti angoli di incidenza su un NACA0015 anche a numeri di Reynolds più elevati, ossia  $217000$  e  $307000$  (corrispondenti rispettivamente a velocità in galleria di  $21$  e  $30$  m/s). Gli attuatori, di apertura pari a circa  $300$  mm, erano collocati esattamente al bordo d'attacco e alimentati con una tensione di  $11$  kV<sub>pp</sub>, per un consumo di potenza di circa  $20$  W. Gli incrementi del  $C_{L_{max}}$  sono intorno al  $2\%$  per entrambi i numeri di Reynolds. Risultati ben più significativi vengono raggiunti utilizzando un'attuazione instazionaria (Sez. 2.2.3), tramite la quale gli autori ottengono valori del  $\Delta C_{L_{max}}$  del  $13\%$  e del  $5\%$  rispettivamente per i due numeri di Reynolds provati, con un consumo di potenza di soli  $2$  W.

# Capitolo 5

## Conclusioni e sviluppi futuri

### Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha permesso di indagare la possibilità di utilizzare attuatori al plasma per il controllo della separazione ad alti angoli di incidenza su un profilo aerodinamico. L'attenzione è stata focalizzata sull'ottimizzazione della geometria a punte con l'obiettivo di trovare una configurazione che inducesse le migliori prestazioni in termini di incremento del coefficiente massimo di portanza.

Le visualizzazioni, pur svolte a un numero di Reynolds limitato di 14000, hanno confermato l'effettività degli attuatori al plasma come strumenti per il controllo della separazione: le immagini ed i filmati ottenuti consentono di osservare come gli attuatori causino un riattacco dello strato limite istantaneo anche ad angoli di incidenza ben superiori a quello di stallo nominale, ossia fino a  $10^\circ$  e  $12^\circ$  oltre lo stallo, rispettivamente per DBD e corona.

Da un punto di vista quantitativo, le prove di pesata hanno confermato come primo risultato quanto previsto dalla teoria, ovvero una riduzione delle prestazioni, a parità di parametri elettrici e geometrici, all'aumentare del numero di Reynolds e in corrispondenza di un arretramento in corda dell'attuatore. Infatti, in primo luogo, il controllo perde di autorevolezza all'aumentare della velocità della corrente esterna poiché la potenza del flusso esterno aumenta con il cubo della velocità, al contrario della potenza immessa nello strato limite dall'attuatore, che rimane costante. In secondo luogo, l'efficacia del controllo diminuisce allontanando l'attuatore dal punto di separazione, ossia dal bordo d'attacco, poiché è necessaria più energia per far riattaccare un flusso già separato, piuttosto che per inibire la separazione agendo a monte o in corrispondenza della stessa.

L'introduzione della geometria a punte, innovativa per i corona e tuttora in fase di ricerca per i DBD a livello di letteratura, ha fornito dei risultati interessanti.

Per quanto riguarda i corona, il primo di tali risultati è la facilità di innescare ed un'elevata stabilità della scarica rispetto alle configurazioni tradizionali di tipo *wire-to-plate* e *plate-to-plate*, caratteristiche che vengono maggiormente accentuate utilizzando punte particolarmente acuminate, ossia per un rapporto base/altezza minore o uguale a 1. Inoltre, la configurazione a punte si è mostrata stabile anche per condizioni di umidità elevata e pulizia del dielettrico non ottimale, agenti esterni che tipicamente favoriscono la transizione all'arco in geometrie tradizionali. L'interesse della comunità scientifica e dell'industria verso gli attuatori a corona è diminuito considerevolmente negli ultimi anni proprio a causa della facilità di instabilizzazione della scarica: i risultati esposti in questo lavoro di tesi, che potrebbero aver risolto la problematica appena citata, puntano a rinvigorire l'interesse verso tali attuatori. La configurazione ottimale tra gli attuatori a corona provati, sia in termini di prestazioni aerodinamiche che di stabilità della scarica, è stata riscontrata nell'attuatore C7 (Tab. 3.1, Fig. C.6). In generale si è registrato che ad un aumento della lunghezza delle punte e del numero delle stesse, a parità di apertura e distanza *inter-elettrodo*, corrisponde un miglioramento delle prestazioni, almeno fino al raggiungimento di un valore asintotico per quanto riguarda la lunghezza delle punte. Inoltre, un risultato particolarmente significativo riguarda il confronto delle prestazioni al variare del numero di Reynolds tra la configurazione base *wire-to-plate* e ciascuna delle configurazioni a punte: se a bassi Reynolds la configurazione base induce prestazioni confrontabili con quelle degli attuatori a punte migliori, con il crescere di tale parametro, le *performance* del *wire-to-plate* decadono molto più rapidamente. Tale risultato lascia intendere che, per applicazioni ad alto numero di Reynolds degli attuatori a corona, sia preferibile la scelta di una geometria a punte.

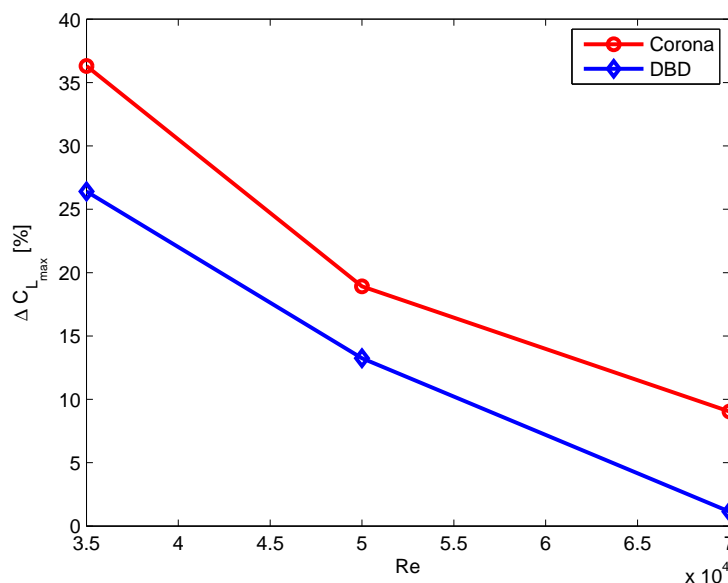
Per quanto riguarda i DBD, la configurazione ottimale corrisponde all'attuatore D6 (Tab. 3.1, Fig. C.6), che fornisce prestazioni superiori anche rispetto al caso base di elettrodo esposto piano. La motivazione di tale risultato è dovuta al fatto che tale configurazione permette di sfruttare al meglio il DBD come generatore di vortici. Infatti, a parità di apertura, un numero eccessivo di punte implica una distanza limitata fra le stesse e quindi la generazione di vortici di dimensioni ridotte, non sufficienti a richiamare aria dall'esterno dello strato limite.

In Fig. 5.1 viene infine mostrato il confronto tra gli attuatori C7 e D6, ossia i più prestanti rispettivamente per i corona e i DBD, al variare del numero di Reynolds, alla stessa posizione in corda. Si può osservare che l'attuatore a corona è più prestante ad ogni Reynolds indagato pur richiedendo una quantità di potenza inferiore rispetto al DBD (Tab. 4.1). Bisogna tuttavia sottolineare che i valori di tensione con cui sono stati alimentati i DBD



---

durante le prove sono particolarmente ridotti; è lecito pensare che, se si disponesse di un'alimentazione in grado di fornire tensioni più elevate, il DBD sarebbe in grado di garantire le medesime prestazioni, se non addirittura superiori, rispetto al corona, comunque al prezzo di un consumo di potenza di un ordine di grandezza superiore.



**Figura 5.1:** Confronto del  $\Delta C_{L_{max}\%}$  al variare del numero di Reynolds tra corona e DBD.

In conclusione, valutando quanto precedentemente esposto, ed in particolare facendo riferimento al miglioramento delle caratteristiche di stabilità della scarica a corona con la geometria innovativa ed al confronto fra il consumo energetico delle due tipologie di attuatori, si ha modo di pensare che gli attuatori a corona debbano suscitare un rinnovato interesse nell'ambito della ricerca scientifica.

### Sviluppi futuri

Un ulteriore sviluppo per questo lavoro di tesi riguarda principalmente la possibilità di disporre di un circuito di alimentazione dei DBD più prestante, in grado di fornire tensioni più elevate e di essere controllato in frequenza. Al fine di poter estendere l'utilizzo degli attuatori anche ad applicazioni aerodinamiche di carattere industriale, è necessario dimostrare la loro efficacia anche a numeri di Reynolds di interesse aeronautico (almeno fino a  $10^6$ ).

Per esempio, considerando la strada intrapresa negli ultimi anni dalla ricerca scientifica in tale ambito, sarebbe interessante impiegare l'attuazione instazionaria, che sembra fornire risultati decisamente migliori a un prezzo di potenza inferiore rispetto a quella tradizionale. L'attuazione *unsteady* implica un'accensione ed uno spegnimento controllati ad una frequenza ottimale, ossia quella che permette di avere  $St = fL_{sep}/U \approx 1$ , dove  $L_{sep}$  è la lunghezza della bolla di separazione ed  $f$  è la frequenza di accensione e spegnimento dell'attuatore.

Prestazioni più elevate possono essere inoltre ottenute utilizzando attuatori multipli impiegati simultaneamente sullo stesso profilo a differenti posizioni in corda.

Infine, dopo aver sviluppato una tecnologia adeguata per l'alimentazione in corrente alternata, potrebbe essere interessante valutare le prestazioni di un attuatore *sliding discharge* (App. B) che combina le caratteristiche degli attuatori a corona e DBD in un unico dispositivo.

# Bibliografia

- [1] HM Mott-Smith. History of “plasmas”. *Nature*, 233:219, 1971.
- [2] M Gad-el Hak. Flow control: The future. *Journal of Aircraft*, 38(3):402–418, 2001.
- [3] JK Wimpres. Aerodynamic technology applied to takeoff and landing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 154:962–981, 1968.
- [4] M Gad-el Hak. *Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management*. Cambridge University Press, 2000.
- [5] M Quadrio and F Auteri. Slide del corso di instabilità e turbolenza, 2012.
- [6] P Moin and T Bewley. Feedback control of turbulence. *Appl. Mech. Rev*, 47(6):S3–S13, 1994.
- [7] L Löfdahl and M Gad-el Hak. Mems applications in turbulence and flow control. *Progress in Aerospace Sciences*, 35(2):101–203, 1999.
- [8] SW Janson, H Helvajian, and K Breuer. Mems, microengineering and aerospace systems. *AIAA paper*, 3802, 1999.
- [9] M Gad-el-Hak et al. *The MEMS handbook*. CRC press, 2010.
- [10] JL Gilarranz, LW Traub, and OK Rediniotis. Characterization of a compact, high-power synthetic jet actuator for flow separation control. *AIAA paper*, 127(2002):12, 2002.
- [11] A Baron and M Quadrio. Turbulent drag reduction by spanwise wall oscillations. *Applied Scientific Research*, 55(4):311–326, 1995.
- [12] J Choi, C Xu, and H Sung. Drag reduction by spanwise wall oscillation in wall-bounded turbulent flows. *AIAA journal*, 40(5):842–850, 2002.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [13] J Ketcham and HR Velkoff. Effect of an electrostatic field on boundary-layer transition. *AIAA Journal*, 6(7):1381–1383, 1968.
- [14] JR Roth. *Industrial Plasma Engineering. Volume 1: Principles*. Institute of Physics Publishing, 1995.
- [15] A Macchi. Appunti su scariche di plasma per applicazioni tecnologiche. *CNR-INFN, Dipartimento di Fisica E. Fermi, Università di Pisa*, 2007.
- [16] LB Loeb. *Electrical coronas: their basic mechanisms*. Univ. of California Press, 1965.
- [17] E Moreau. Airflow control by non-thermal plasma actuators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(3):605, 2007.
- [18] CF Gallo. Corona—a brief status report. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 6:550–557, 1977.
- [19] A Fridman, A Chirokov, and A Gutsol. Non-thermal atmospheric pressure discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(2):R1, 2005.
- [20] Y Akishev, O Goossens, T Callebaut, C Leys, A Napatovich, and N Trushkin. The influence of electrode geometry and gas flow on corona-to-glow and glow-to-spark threshold currents in air. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(18):2875, 2001.
- [21] M Goldman, A Goldman, and RS Sigmond. The corona discharge, its properties and specific uses. *Pure Appl. Chem*, 57(9):1353–1362, 1985.
- [22] G Artana, J D’Adamo, , L Léger, E Moreau, and G Touchard. Flow control with electrohydrodynamic actuators. In *39<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. AIAA, 2001.
- [23] M Robinson. Movement of air in the electric wind of the corona discharge. *American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, Transactions of the*, 80(2):143–150, 1961.
- [24] L Léger, E Moreau, and G Touchard. Electrohydrodynamic airflow control along a flat plate by a dc surface corona discharge—velocity profile and wall pressure measurements. *AIAA paper*, 2833:2002, 2002.
- [25] L Léger, E Moreau, G Artana, and G Touchard. Influence of a dc corona discharge on the airflow along an inclined flat plate. *Journal of electrostatics*, 51:300–306, 2001.

- 
- [26] E Moreau, L Léger, and G Touchard. Effect of a dc surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25m/s. *Journal of electrostatics*, 64(3):215–225, 2006.
- [27] G Artana, J D’Adamo, , L Léger, E Moreau, and G Touchard. Flow control with electrohydrodynamic actuators. *AIAA journal*, 40(9):1773–1779, 2002.
- [28] R Sosa, G Artana, E Moreau, and G Touchard. Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators. *Experiments in fluids*, 42(1):143–167, 2007.
- [29] MR Malik, LM Weinstein, and MY Hussaini. Ion wind drag reduction. In *AIAA, Aerospace Sciences Meeting*, volume 1, 1983.
- [30] S El-Khabiry and GM Colver. Drag reduction by dc corona discharge along an electrically conductive flat plate for small reynolds number flow. *Physics of fluids*, 9:587, 1997.
- [31] GM Colver and S El-Khabiry. Modeling of dc corona discharge along an electrically conductive flat plate with gas flow. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 35(2):387–394, 1999.
- [32] L Leger, E Moreau, and G Touchard. Control of low velocity airflow along a flat plate with a dc electrical discharge. In *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, volume 3, pages 1536–1543. IEEE, 2001.
- [33] A Labergue, E Moreau, and G Touchard. A parametric study of surface corona discharge along an insulating flat plate in atmospheric pressure. In *2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP’05.*, pages 490–494. IEEE, 2005.
- [34] E Moreau and G Touchard. Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharges. *Journal of Electrostatics*, 66(1):39–44, 2008.
- [35] E Moreau, G Artana, and G Touchard. Surface corona discharge along an insulating flat plate in air applied to electrohydrodynamically air-flow control: electrical properties. In *Conference series - Institute of Physics*, volume 178, pages 285–290. Philadelphia; Institute of Physics; 1999, 2004.
- [36] BR Maskell. The effect of humidity on a corona discharge in air. Technical report, DTIC Document, 1970.

- [37] CF Gallo, JE Germanos, and JE Courtney. The effect of humidity and temperature variations on the behavior of wire-to-plane coronas. *Applied Optics*, 8(101):111–119, 1969.
- [38] R Mestiri, Ri Hadaji, and SB Nasrallah. Experimental investigation of the electric discharge stability: Behaviour with the air relative humidity. *International Journal of Energy Engineering*, 2013.
- [39] C Louste, E Moreau, and G Touchard. Dc corona surface discharge along an insulating flat plate in air: experimental results. In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002 Annual Report Conference on*, pages 822–826. IEEE, 2002.
- [40] C Louste, E Moreau, and G Touchard. Influence of an insulating flat plate on a dc surface corona discharge at various air relative humidities. *Electrostatics 2003*, pages 273–278, 2004.
- [41] A Labergue, L Leger, E Moreau, G Touchard, and JP Bonnet. Experimental study of the detachment and the reattachment of an air-flow along an inclined wall controlled by a surface corona discharge-application to a plane turbulent mixing layer. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 40(5):1205–1214, 2004.
- [42] A Debien, N Benard, and E Moreau. Streamer inhibition for improving force and electric wind produced by dbd actuators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(21):215201, 2012.
- [43] JR Roth, D Sherman, and S Wilkinson. Boundary layer flow control with one atmosphere uniform glow discharge surface plasma. *AIAA paper*, No. 1998-0328, 1998.
- [44] JR Roth, D Sherman, and S Wilkinson. Electrohydrodynamic flow control with a glow-discharge surface plasma. *AIAA journal*, 38(7):1166–1172, 2000.
- [45] T Corke, M Post, and D Orlov. Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications. *Experiments in Fluids*, 46(1):1–26, 2009.
- [46] T Corke, C L Enloe, and S Wilkinson. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42:505–529, 2010.

- 
- [47] J Pons, E Moreau, and G Touchard. Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics. *Journal of physics D: applied physics*, 38(19):3635, 2005.
- [48] JC Laurentie, J Jolibois, and E Moreau. Surface dielectric barrier discharge: Effect of encapsulation of the grounded electrode on the electromechanical characteristics of the plasma actuator. *Journal of Electrostatics*, 67(2):93–98, 2009.
- [49] CL Enloe, MG McHarg, and Th E McLaughlin. Time-correlated force production measurements of the dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuator. *Journal of applied physics*, 103(7):073302–073302, 2008.
- [50] CL Enloe, Th E McLaughlin, R D Van Dyken, KD Kachner, E J Jumper, and T C Corke. Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: plasma morphology. *AIAA journal*, 42(3):589–594, 2004.
- [51] K Allegraud, O Guaitella, and A Rousseau. Spatio-temporal breakdown in surface dbds: evidence of collective effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(24):7698, 2007.
- [52] I Biganzoli, R Barni, C Riccardi, A Gurioli, and R Pertile. Optical and electrical characterization of a surface dielectric barrier discharge plasma actuator. *Plasma Sources Science and Technology*, 22(2):025009, 2013.
- [53] GI Font and WL Morgan. Recent progress in dielectric barrier discharges for aerodynamic flow control. *Contributions to Plasma Physics*, 47(1-2):103–110, 2007.
- [54] JP Boeuf, Y Lagmich, and LC Pitchford. Contribution of positive and negative ions to the electrohydrodynamic force in a dielectric barrier discharge plasma actuator operating in air. *Journal of Applied Physics*, 106(2):023115–023115, 2009.
- [55] A V Likhanskii, M N Shneider, S O Macheret, and R B Miles. Modeling of dielectric barrier discharge plasma actuator in air. *Journal of Applied Physics*, 103(5):053305–053305, 2008.
- [56] D M Orlov, G I Font, and D Edelstein. Characterization of discharge modes of plasma actuators. *AIAA journal*, 46(12):3142–3148, 2008.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [57] GI Font, S Jung, CL Enloe, TE McLaughlin, WL Morgan, and JW Baughn. Simulation of the effects of force and heat produced by a plasma actuator on neutral flow evolution. *AIAA paper*, 167, 2006.
- [58] M Forte, J Jolibois, J Pons, E Moreau, G Touchard, and M Cazalens. Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control. *Experiments in Fluids*, 43(6):917–928, 2007.
- [59] M Kotsonis, S Ghaemi, R Giepmans, and L Veldhuis. Experimental study on the body force field of dielectric barrier discharge actuators. In *41st AIAA Plasmadynamics and Laser Conference*, 2010.
- [60] C Lon Enloe, T E McLaughlin, R D Van Dyken, KD Kachner, E J Jumper, T C Corke, M Post, and O Haddad. Mechanisms and responses of a dielectric barrier plasma actuator: Geometric effects. *AIAA journal*, 42(3):595–604, 2004.
- [61] D M Orlov, T C Corke, and M Patel. Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator. *AIAA paper*, 1206:2006, 2006.
- [62] T C Corke, M L Post, and D M Orlov. Single-dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: concepts, optimization, and applications. *Journal of Propulsion and Power*, 24(5):935–945, 2008.
- [63] J Huang, T C Corke, and F O Thomas. Plasma actuators for separation control of low-pressure turbine blades. *AIAA journal*, 44(1):51–57, 2006.
- [64] F O Thomas, T C Corke, M Iqbal, A Kozlov, and D Schatzman. Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control. *AIAA journal*, 47(9):2169–2178, 2009.
- [65] R Van Dyken, T E McLaughlin, and C L Enloe. Parametric investigations of a single dielectric barrier plasma actuator. *AIAA paper*, 846:5–8, 2004.
- [66] AR Hoskinson and N Hershkowitz. Differences between dielectric barrier discharge plasma actuators with cylindrical and rectangular exposed electrodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(6):065205, 2010.



- 
- [67] S Roy and CC Wang. Bulk flow modification with horseshoe and serpentine plasma actuators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(3):032004, 2009.
- [68] A Berendt, J Podlinski, and J Mizeraczyk. Comparison of airflow patterns produced by dbd actuators with smooth or saw-like discharge electrode. *Journal of Physics: Conference Series*, 301(1):012018, 2011.
- [69] Z Liu, L Wang, and S Fu. Study of flow induced by sine wave and saw tooth plasma actuators. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 54(11):2033–2039, 2011.
- [70] R Jousot, A Leroy, R Weber, H Rabat, S Loyer, and D Hong. Plasma morphology and induced airflow characterization of a dbd actuator with serrated electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(12):125204, 2013.
- [71] N Balcon, N Benard, Y Lagmich, J-P Boeuf, G Touchard, and E Moreau. Positive and negative sawtooth signals applied to a dbd plasma actuator—influence on the electric wind. *Journal of electrostatics*, 67(2):140–145, 2009.
- [72] M Kotsonis and S Ghaemi. Performance improvement of plasma actuators using asymmetric high voltage waveforms. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(4):045204, 2012.
- [73] M L Post and T C Corke. Separation control using plasma actuators: dynamic stall vortex control on oscillating airfoil. *AIAA journal*, 44(12):3125–3135, 2006.
- [74] H Do, W Kim, MA Cappelli, and MG Mungal. Cross-talk in multiple dielectric barrier discharge actuators. *Applied Physics Letters*, 92(7):071504–071504, 2008.
- [75] M Forte, J Jolibois, M Moreau, and G Touchard. Optimization of a dielectric discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity—application to airfoil flow control. *AIAA Paper*, 2863, 2006.
- [76] N Benard, A Mizuno, and E Moreau. A large-scale multiple dielectric barrier discharge actuator based on an innovative three-electrode design. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(23):235204, 2009.

- [77] N Benard, N Balcon, and E Moreau. Electric wind produced by a surface dielectric barrier discharge operating in air at different pressures: aeronautical control insights. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(4):042002, 2008.
- [78] T Abe, Yi Takizawa, S Sato, and N Kimura. Experimental study for momentum transfer in a dielectric barrier discharge plasma actuator. *AIAA journal*, 46(9):2248–2256, 2008.
- [79] R Anderson and S Roy. Preliminary experiments of barrier discharge plasma actuators using dry and humid air. *AIAA paper*, 369:2006, 2006.
- [80] N Benard, N Balcon, E Moreau, et al. Electric wind produced by a surface dielectric barrier discharge operating over a wide range of relative humidity. *AIAA paper*, 488, 2009.
- [81] S Bogani. *Studio del posizionamento di attuatori al plasma per applicazioni aeronautiche*. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano, 2012.
- [82] M Vitali. *Un attuatore al plasma per applicazioni aeronautiche*. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano, 2012.
- [83] Deltalab. *TECHNICAL MANUAL: Sub-sonic aspiration wind tunnel EA103*.
- [84] G A Benelli. *Gurney flap : analisi teorico-sperimentale*. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano, 2013.
- [85] Deltalab. *TECHNICAL MANUAL: Two and three component aerodynamic balances*.
- [86] C Tropea, A L Yarin, and J F Foss. *Springer handbook of experimental fluid mechanics*, volume 1. Springer, 2007.
- [87] D. Althaus. *Profilpolaren für den Modellflug. 1:*. Neckar-Verlag, 1980.
- [88] M L Post and T C Corke. Separation control using plasma actuators-stationary and oscillating airfoils. *AIAA paper*, 841:2004, 2004.
- [89] YE Akansu, F Karakaya, and A Şanlısoy. Active control of flow around naca 0015 airfoil by using dbd plasma actuator. In *EPJ Web of Conferences*, volume 45, page 01008. EDP Sciences, 2013.

- 
- [90] C He, T C Corke, and M P Patel. Plasma flaps and slats: an application of weakly ionized plasma actuators. *Journal of Aircraft*, 46(3):864–873, 2009.
- [91] JR Roth. *Industrial Plasma Engineering: applications to nonthermal plasma processing. Vol. 2*, volume 2. CRC Press, 2002.
- [92] L Daddi and E Latrofa. Hygrometer based on the corona effect. *Review of Scientific Instruments*, 46(10):1416–1418, 1975.
- [93] M L Post and T C Corke. Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators. *AIAA journal*, 42(11):2177–2184, 2004.
- [94] J Jolibois, M Forte, and E Moreau. Application of an ac barrier discharge actuator to control airflow separation above a naca 0015 airfoil: optimization of the actuation location along the chord. *Journal of Electrostatics*, 66(9):496–503, 2008.
- [95] N Benard, P Braud, J Jolibois, and E Moreau. Airflow reattachment along a naca 0015 airfoil by a surface dielectric barrier discharge actuator—time-resolved particle image velocimetry investigation. *AIAA paper*, 4202, 2008.
- [96] Yi Okita, T N Jukes, K Choi, and K Nakamura. Flow reattachment over an airfoil using surface plasma actuator. In *4th Flow control conference, Seattle, Washington*, 2008.
- [97] M P Patel, T T Ng, S Vasudevan, T C Corke, M Post, T E McLaughlin, and C F Suchomel. Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator. *Journal of aircraft*, 45(1):223–236, 2008.
- [98] N Bénard, J Jolibois, and E Moreau. Lift and drag performances of an axisymmetric airfoil controlled by plasma actuator. *Journal of Electrostatics*, 67(2):133–139, 2009.
- [99] A Berendt, J Podlinski, A Leroy, P Audier, D Hong, and J Mizeraczyk. Piv measurements of the flow around airfoil models equipped with the plasma actuator. In *Proceedings of the 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2012.
- [100] A J Lombardi, P O Bowles, and T C Corke. Closed-loop dynamic stall control using a plasma actuator. *AIAA Journal*, 51(5):1130–1141, 2013.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [101] J Wang, K Choi, L Feng, T Jukes, and R Whalley. Recent developments in dbd plasma flow control. *Progress in Aerospace Sciences*, 62:52–78, 2013.
- [102] A N Vorobiev, R M Rennie, E J Jumper, and T E McLaughlin. Experimental investigation of lift enhancement and roll control using plasma actuators. *Journal of Aircraft*, 45(4):1315–1321, 2008.
- [103] Ml P Patel, T T Ng, S Vasudevan, T C Corke, and C He. Plasma actuators for hingeless aerodynamic control of an unmanned air vehicle. *Journal of Aircraft*, 44(4):1264–1274, 2007.
- [104] T C Corke, B Mertz, and M P Patel. Plasma flow control optimized airfoil. *AIAA paper*, 1208:2006, 2006.
- [105] L Feng, TN Jukes, KS Choi, and JJ Wang. Flow control over a naca 0012 airfoil using dielectric-barrier-discharge plasma actuator with a gurney flap. *Experiments in fluids*, 52(6):1533–1546, 2012.
- [106] J Little, M Nishihara, I Adamovich, and M Samimy. High-lift airfoil trailing edge separation control using a single dielectric barrier discharge plasma actuator. *Experiments in fluids*, 48(3):521–537, 2010.
- [107] Y Sung, W Kim, MG Mungal, and MA Cappelli. Aerodynamic modification of flow over bluff objects by plasma actuation. *Experiments in fluids*, 41(3):479–486, 2006.
- [108] F O Thomas, A Kozlov, and T C Corke. Plasma actuators for landing gear noise reduction. *AIAA paper*, 3010:2005, 2005.
- [109] F O Thomas, A Kozlov, and TC Corke. Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction. *AIAA journal*, 46(8):1921–1931, 2008.
- [110] A Kozlov and F O Thomas. Bluff-body flow control via two types of dielectric barrier discharge plasma actuation. *AIAA journal*, 49(9):1919–1931, 2011.
- [111] Y Li, X Zhang, and X Huang. The use of plasma actuators for bluff body broadband noise control. *Experiments in fluids*, 49(2):367–377, 2010.
- [112] S P Wilkinson. Investigation of an oscillating surface plasma for turbulent drag reduction. *AIAA paper*, 1023:2003, 2003.

- 
- [113] S Grundmann and C Tropea. Experimental damping of boundary-layer oscillations using dbd plasma actuators. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(3):394–402, 2009.
- [114] A Kurz, N Goldin, R King, C Tropea, and S Grundmann. Hybrid transition control approach for plasma actuators. *Experiments in fluids*, 54(11):1–4, 2013.
- [115] N Benard, N Balcon, G Touchard, and E Moreau. Control of diffuser jet flow: turbulent kinetic energy and jet spreading enhancements assisted by a non-thermal plasma discharge. *Experiments in fluids*, 45(2):333–355, 2008.
- [116] C Louste, G Artana, E Moreau, and G Touchard. Sliding discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties. *Journal of Electrostatics*, 63(6):615–620, 2005.
- [117] E Moreau, C Louste, and G Touchard. Electric wind induced by sliding discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Electrostatics*, 66(1):107–114, 2008.
- [118] R Sosa, H Kelly, D Grondona, A Márquez, V Lago, and G Artana. Electrical and plasma characteristics of a quasi-steady sliding discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(3):035202, 2008.
- [119] E Moreau, R Sosa, and G Artana. Electric wind produced by surface plasma actuators: a new dielectric barrier discharge based on a three-electrode geometry. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(11):115204, 2008.
- [120] R Sosa, E Arnaud, E Memin, and G Artana. Study of the flow induced by a sliding discharge. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 16(2):305–311, 2009.
- [121] H Song, Y Li, Q Zhang, M Jia, and Y Wu. Experimental investigation on the characteristics of sliding discharge plasma aerodynamic actuation. *Plasma Science and Technology*, 13(5):608, 2011.
- [122] PA Polivanov, OI Vishnyakov, AA Sidorenko, and AA Maslov. Comparison of flows induced by a dielectric barrier discharge and a sliding discharge. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 54(3):359–366, 2013.



# Appendice A

## Applicazioni degli attuatori al plasma

In questa appendice vengono presentate le principali applicazioni degli attuatori al plasma in ambito industriale e nell'ambito del *flow control*.

### A.1 Applicazioni industriali

L'impiego dei plasmi nel panorama aeronautico non ha visto la luce prima dell'inizio degli anni 90. Tuttavia l'applicazione di dispositivi che sfruttano le proprietà di un gas ionizzato sono da ritrovarsi in diversi ambiti di tipo industriale, che spaziano dai trattamenti superficiali (Sez. A.1.1), tagli al plasma (Sez. A.1.2), fino alla possibilità di impiegare i plasmi come strumenti di misura dell'umidità (Sez. A.1.3), per la produzione di ozono e nella realizzazione di circuiti stampati.

#### A.1.1 Trattamenti superficiali

I trattamenti superficiali sfruttano le specie attive formate in un plasma per modificare un materiale, il che comporta la nascita di reazioni chimiche. Generalmente questo tipo di trattamento si rivela particolarmente vantaggioso anche da un punto di vista di dispendio energetico, in quanto le potenze in gioco si assestano sull'ordine dei  $mW$ , e soprattutto non viene danneggiato il materiale.

I trattamenti superficiali possono essere classificati in base alla proprietà superficiale che viene alterata [91].

**Decontaminazione e sterilizzazione:** in seguito al suo utilizzo, il materiale può essere esposto all'azione di agenti contaminanti, dell'ossida-

zione, di idrocarburi come gli oli, di sporcizia che ne possono alterare le proprietà superficiali. Le superfici possono quindi essere pulite attraverso l'esposizione alle specie attive del plasma. Un'importante applicazione può essere riscontrata in ambito medico, dove l'esposizione al plasma permette l'uccisione di microrganismi di dimensioni dell'ordine del  $\mu m$ .

**Alterazione dell'energia superficiale:** l'esposizione di una superficie all'azione di un plasma solitamente aumenta l'energia superficiale del materiale. Questa azione può dunque intervenire su delle importanti caratteristiche del materiale:

- *bagnabilità*, è la capacità di una superficie solida di assorbire un liquido; ad essa è associato un valore elevato di energia superficiale.
- *porosità*, è incrementata dall'azione del plasma.
- *stampabilità*, è la possibilità di applicare dell'inchiostro o dei disegni stampati su una superficie. Un esempio di impiego può essere nell'ambito alimentare: l'utilizzo di inchiostri a base di acqua per la stampa su contenitori piuttosto che a base di idrocarburi (inquinanti) richiede una più elevata energia superficiale; l'azione del plasma può essere una soluzione per facilitare tale applicazione.

**Alterazione delle proprietà di coesione:** l'azione del plasma può modificare le proprietà coesive del materiale andandone a modificare le catene polimeriche, o i collegamenti tra fibre o ancora cambiare le proprietà coesive di contatto tra superfici.

**Alterazione delle proprietà adesive:** l'esposizione al plasma aumenta le proprietà adesive di un materiale, rendendolo quindi più incline ad instaurare dei legami con altre superfici. Il trattamento può essere effettuato nel momento in cui si necessita l'adesione di vernici a superfici plastiche, sostituendo i tradizionali spray inquinanti.

**Alterazione della finitura del materiale:** l'esposizione prolungata del materiale al plasma, oltre a modificare le caratteristiche elencate finora, può comportare anche l'asportazione di materiale dalla superficie, con conseguente modifica della rugosità, resistenza ai graffi oltre che a proprietà tangibili alla vista come la trasparenza ed il colore.

### A.1.2 Taglio al plasma

La tecnologia del taglio al plasma viene utilizzata principalmente in ambito industriale per acciai e altri materiali. Viene impiegata una *torcia al*

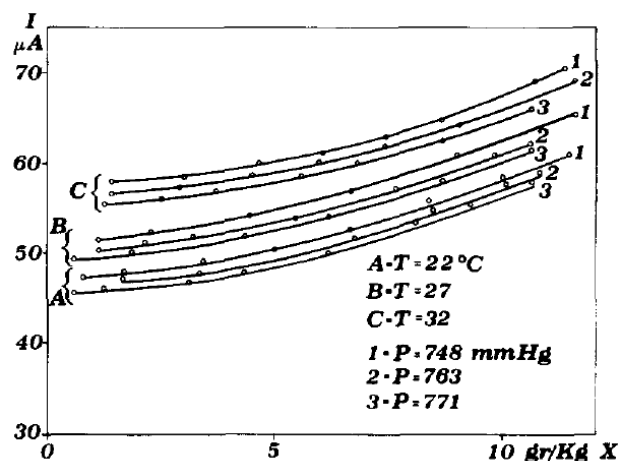


*plasma*, all'estremità della quale vi è un ugello che soffia del gas sul materiale da tagliare. In prossimità dell'ugello vi è inoltre un elettrodo al quale è applicato un elevato voltaggio che genera la formazione di un arco elettrico tra elettrodo e superficie da tagliare, la quale viene riscaldata fino a raggiungere la temperatura di fusione e quindi tagliata.

### A.1.3 Il plasma come igrometro

Gli igrometri basati sull'effetto corona hanno il vantaggio di avere un'elevata velocità di risposta alle variazioni di umidità nell'aria. Si consideri quindi l'applicazione di una differenza di potenziale ai capi di due elettrodi: in Fig. A.1 viene mostrato l'andamento della corrente in diverse condizioni di temperatura e pressione. Come si può osservare la corrente varia sensibilmente, aumentando al variare dell'umidità assoluta.

L'utilizzo del plasma come strumento di misura dell'umidità assoluta è reso allora possibile attraverso un amperometro, un generatore di tensione e le curve di taratura dello strumento come quelle di Fig. A.1 [92].



**Figura A.1:** Andamento della corrente per diversi valori di temperatura e pressione. [92]

## A.2 Applicazioni aerodinamiche

In generale, la maggior parte di queste applicazioni prevede il controllo dello strato limite su un profilo, in modo da ritardarne la separazione e il conseguente stallo. La quasi totalità delle applicazioni presentate è relativa

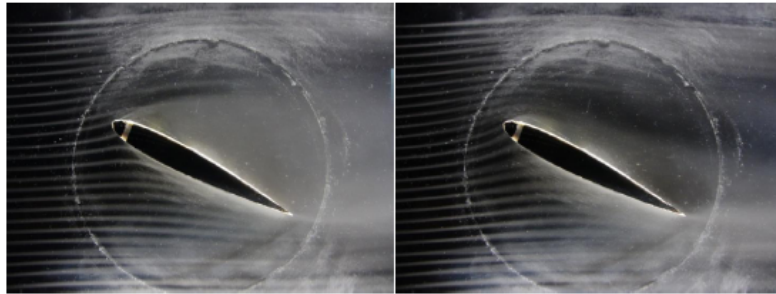
all'utilizzo di attuatori DBD, in quanto, come già sottolineato in precedenza, negli ultimi anni la ricerca nell'ambito degli attuatori al plasma si è concentrata quasi esclusivamente su questi.

### A.2.1 Controllo della separazione su profili

L'applicazione più diffusa degli attuatori al plasma consiste nel controllo della separazione dello strato limite su profili: l'obiettivo è quello di ritardare lo stallo a incidenze superiori rispetto alle caratteristiche del profilo "pulito", attraverso l'immissione di quantità di moto nello strato limite.

Le tesi di Vitali ([82]) e Bogani ([81]), il cui lavoro viene proseguito e ampliato in questo lavoro di tesi, descrivono qualitativamente tramite visualizzazioni l'utilizzo di un attuatore a corona su un profilo NACA 0013, il cui angolo di stallo viene posticipato fino a  $35^\circ$ , ossia di  $20^\circ$  rispetto alla configurazione senza attuatore, per numeri di Reynolds tuttavia limitati, nell'ordine di  $2 * 10^4$  (Fig. A.2). Viene inoltre dimostrato sperimentalmente che l'attuazione è più efficace se agisce in prossimità del punto di separazione: poiché, all'angolo di stallo, questa avviene al bordo d'attacco, l'attuatore dev'essere collocato il più possibile vicino a questo.

Per quanto riguarda l'utilizzo di attuatori DBD, numerosi lavori sperimen-



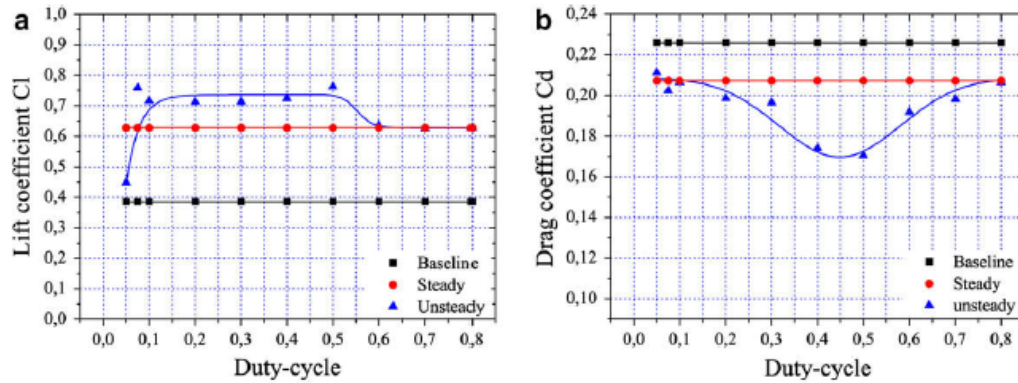
**Figura A.2:** Effetto di un attuatore a corona sul flusso attorno a un profilo NACA 0013 per un'incidenza di  $\alpha = 35^\circ$  e  $Re \simeq 20000$ . Le immagini di sinistra e destra si riferiscono rispettivamente al caso con attuatore spento e acceso. [81]

tali di ricerca sono stati dedicati a questa applicazione, fra cui [89], [93], [94],[95], [96], [97], [98] e [99]. I numeri di Reynolds basati sulla corda utilizzati in questi lavori sono dell'ordine di  $10^4 - 10^5$ : l'efficacia dell'attuatore DBD a Reynolds maggiori non è ancora stata provata e costituisce un grosso limite per applicazioni commerciali di questo dispositivo.

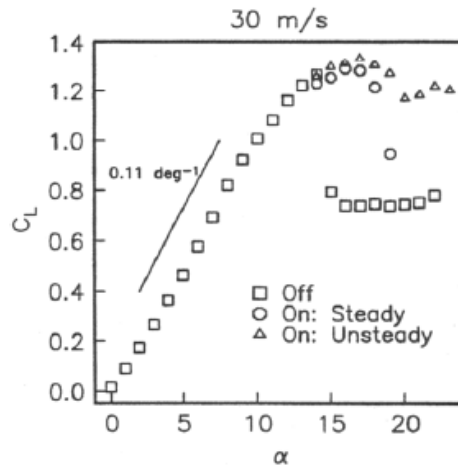
In [93] gli autori operano un confronto fra un metodo passivo, ossia un generatore di vortici, e un DBD posto al bordo d'attacco di un profilo NACA

66<sub>3</sub> – 018. I risultati mostrano un miglior recupero di pressione post-stallo sul dorso del profilo utilizzando l'attuatore al plasma rispetto al generatore di vortici, con l'ulteriore vantaggio che il primo può essere attivato solo quando necessario. Inoltre l'angolo di stallo viene posticipato di 8°. In [94] gli autori dimostrano, utilizzando un profilo NACA 0015, che l'attuazione è maggiormente efficace se avviene in prossimità del punto di separazione. Inoltre studiano anche la possibilità di indurre la separazione (ossia, spostarla verso il bordo d'attacco) utilizzando un DBD che produce un flusso diretto a monte (*counter-flow*): tuttavia la conclusione è che è più facile spostare la separazione a valle, verso il bordo d'uscita, che a monte. Viene infine considerata la possibilità di effettuare un'attuazione instazionaria (Sez. 2.2.3): utilizzando una frequenza di attuazione ottimale, corrispondente a un numero di Strouhal pari a 1, è possibile ottenere un completo riattacco del flusso sul profilo stallato ( $\alpha = 16^\circ$ ) anche con un *duty cycle* del 25%, con un evidente risparmio di potenza. Risultati simili vengono trovati in [95] e [97], mentre in [98] viene addirittura dimostrata la superiorità dell'attuazione instazionaria in quanto produce coefficienti di portanza superiori e coefficienti di resistenza inferiori per incidenze post-stallo, rispetto all'attuazione stazionaria, con consumi di potenza inferiori (Fig. A.3). Mentre il principio fisico alla base dell'attuazione stazionaria è legato all'immissione di considerevole quantità di moto nello strato limite, l'efficacia dell'attuazione instazionaria, che è ottimale se avviene alla frequenza di Strouhal, è legata a un altro meccanismo, ossia l'accrescimento del fenomeno di *vortex shedding*: sono pertanto i vortici che si generano al bordo d'attacco ad energizzare lo strato limite (e pertanto il principio di funzionamento è concettualmente simile a quello dei generatori di vortici). In Fig. A.4 è possibile vedere la curva del coefficiente di portanza al variare dell'incidenza: si può notare che l'attuazione al bordo d'attacco non modifica il  $C_L$  pre-stallo, mentre lo aumenta sensibilmente per le incidenze immediatamente post-stallo, ritardando il crollo del  $C_L$  corrispondente allo stallo fino a 7° con l'attuazione instazionaria. Infine, in [96] l'attuatore, posto vicino al punto di separazione su un NACA 0024, si dimostra particolarmente efficace nel riattaccare il flusso quando viene posto con un certo angolo rispetto alla direzione del flusso medio: anche in questo caso l'attuatore si comporta come un generatore di vortici, diretti nella direzione del flusso (*streamwise*), i quali contribuiscono a riattaccare lo strato limite.

Gli attuatori al plasma possono essere utilizzati anche per contrastare la separazione che avviene sulle pale di turbina, specialmente nello stadio di bassa pressione ai bassi numeri di Reynolds tipici del volo ad alta quota, come mostrato in [63]. Anche in questo caso viene operato un confronto con un generatore di vortici: le prestazioni del DBD, se collocato in prossimità del punto di separazione, sono confrontabili con quelle del generatore di vortici,



**Figura A.3:** Confronto fra coefficienti di (a) portanza e (b) resistenza su un NACA 0015 al variare del *duty cycle* per il flusso base, attuazione stazionaria e instazionaria a un'incidenza di  $16^\circ$ . [ $V = 18 \text{ kV}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $f_{unsteady} = 100 \text{ Hz}$  e pari alla frequenza di Strouhal]. [98]



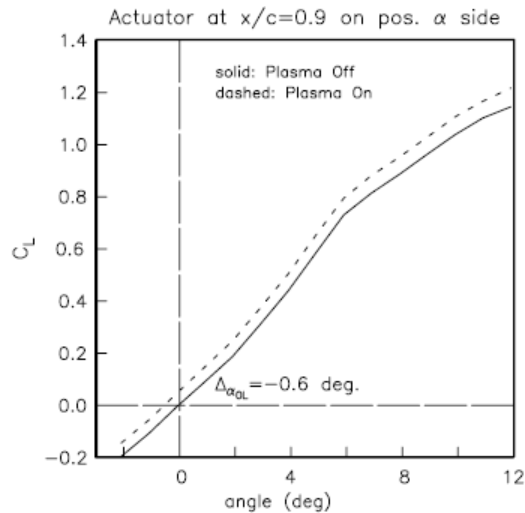
**Figura A.4:** Andamento del coefficiente di portanza al variare dell'incidenza su un NACA 0015 nel caso di attuazione al bordo d'attacco spenta, stazionaria e instazionaria. [ $U_\infty = 30 \text{ m/s}$ ,  $f_{unsteady} = 237 \text{ Hz}$  pari alla frequenza di Strouhal]. [90]

ma, come già detto in precedenza, l'attuatore al plasma presenta il vantaggio di poter essere attivato solo quando necessario, senza causare resistenza parassita quando non attivo.

Infine, l'attuazione al plasma, in particolare quella instazionaria, si è dimostrata particolarmente efficace per contrastare il fenomeno dello stallo dinamico su un profilo oscillante, operando il controllo sia in anello aperto sia chiuso ([73] e [100]).

### A.2.2 Plasma flap

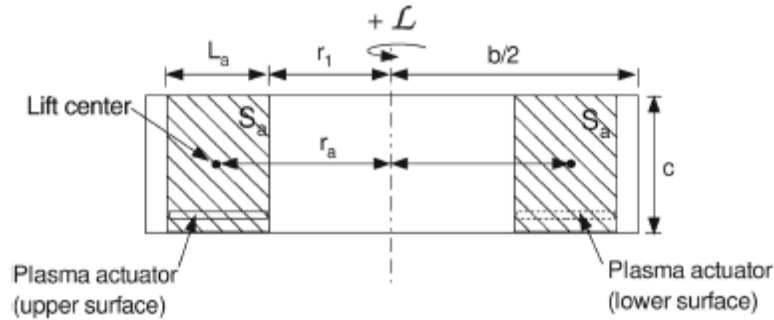
Un'altra possibile applicazione per gli attuatori al plasma consiste nell'andare a sostituire le superfici mobili su un'ala, per esempio ipersostentatori di bordo d'uscita (flap) e alettoni, consentendo un grosso risparmio in termini di peso e complessità meccanica. Inoltre, lo spazio che si crea fra l'ala e la superficie mobile convenzionale è una fonte di notevole rumore oltre a contribuire in maniera consistente alla resistenza di forma e a riflettere le onde radar ([90]). L'applicazione dell'attuatore in prossimità del bordo d'uscita del profilo permette di incrementare il coefficiente di portanza di un valore costante al variare dell'incidenza, pertanto la curva del  $C_L$  risulta traslata verso l'alto (Fig. A.5); il valore massimo del  $C_L$  (appena prima dello stallo) viene quindi aumentato, mentre l'incidenza di stallo rimane invariata. Inoltre, anche la curva polare risulta traslata verso valori più alti del  $C_L$ : questi effetti sono analoghi a quelli causati dall'utilizzo di un ipersostentatore (in [90] gli autori calcolano una deflessione equivalente di  $1.5^\circ$ ). L'utilizzo dell'attuatore vicino



**Figura A.5:** Andamento del coefficiente di portanza al variare dell'incidenza su un NACA 0015 nel caso di attuazione DBD al bordo d'uscita (attuatore posto a  $x/c = 0,9$ ). [ $U_\infty = 21$  m/s,  $V = 7$  kV<sub>pp</sub>]. [90]

al bordo d'uscita causa quindi un aumento di portanza simile a quello dovuto a un aumento di curvatura della linea media. E' quindi possibile utilizzare gli attuatori al plasma per rimpiazzare gli alettoni tradizionali per il controllo del rollio su un velivolo ([90], [101] e [102], in cui viene mostrata anche una perdita di efficacia dell'attuatore all'aumentare della velocità asintotica, e quindi del numero di Reynolds). Questa applicazione viene particolarmente studiata per un futuro utilizzo sugli UAV (*unmanned aerial vehicle*), i quali

devono essere piccoli e molto maneggevoli e pertanto una completa eliminazione delle superfici mobili di controllo è auspicabile: l'obiettivo è quello della *plasma wing*, ossia un'ala senza superfici mobili, che utilizza esclusivamente gli attuatori al plasma per generare i momenti necessari al controllo ([103]). Applicazioni simili a quelle appena descritte, poiché riguardano l'attuatore



**Figura A.6:** Illustrazione della coppia di attuatori usati per il controllo del rollio su un'ala bidimensionale. [90]

collocato in prossimità del bordo d'uscita, sono riportate in [104], [105] e [106]: nel primo di questi articoli il profilo su cui viene applicato un DBD è ottimizzato in modo da mantenere un flusso laminare per gran parte della corda e separare solo presso il bordo d'uscita dove l'accensione dell'attuatore permette di eliminare questa separazione, garantendo quindi, insieme all'utilizzo dell'attuazione instazionaria, migliori prestazioni al *plasma flap*; in [105] un DBD viene montato su un Gurney flap, con il risultato che la portanza sul profilo, già aumentata dalla presenza del Gurney flap, viene aumentata ulteriormente, al prezzo di un piccolo aumento di resistenza (l'effetto è equivalente a un aumento di altezza del flap). Infine in [106] un DBD, operato anche in maniera instazionaria, viene utilizzato per evitare che il flusso separi su un flap deflesso di  $30^\circ$ .

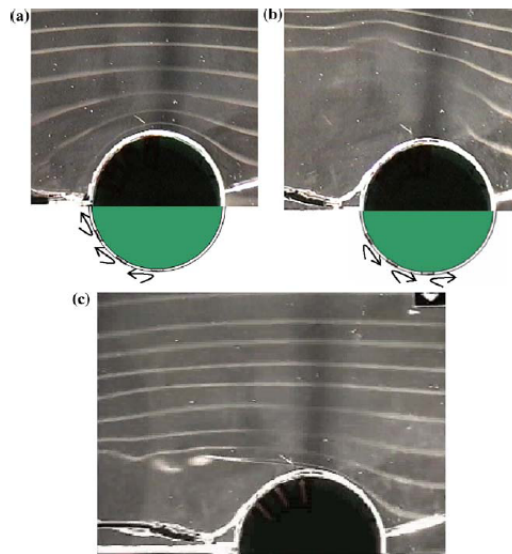
### A.2.3 Controllo su corpi tozzi e riduzione del rumore

La riduzione del rumore, soprattutto in fase di decollo e atterraggio, è diventata uno degli obiettivi primari dell'industria aeronautica, a causa dell'aumento del numero dei voli e di legislazioni restrittive in tal senso; grazie all'utilizzo di motori sempre più silenziosi, una delle maggiori sorgenti di rumore su un aeromobile è stata individuata nel carrello di atterraggio, che può essere identificato come un corpo tozzo. Gli obiettivi del controllo del flusso su corpi tozzi sono tipicamente la limitazione del fenomeno di *vortex shedding*, l'assottigliamento della scia e la conseguente riduzione di resistenza; in

questo modo anche il rumore aerodinamico viene ridotto.

Il carrello di atterraggio può essere modellato in maniera molto semplice come un cilindro: l'idea è quella di creare una *carenatura al plasma*, analoga a una carenatura strutturale, ma con il vantaggio di essere meno pesante e ingombrante, per deviare il flusso e ridurre il rumore.

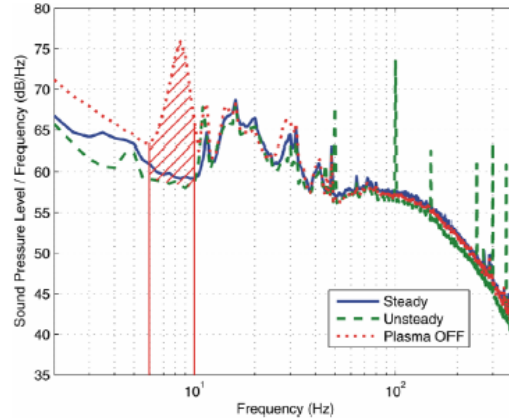
Una prima analisi è stata svolta in [107], in cui due DBD, posti a  $\pm 90^\circ$  rispetto alla corrente media, sono utilizzati con successo sia per ritardare la separazione sul cilindro sia per favorirla, con i DBD che in questo caso agiscono producendo un flusso contrario alla corrente (Fig. A.7). Ulteriori studi



**Figura A.7:** Visualizzazioni a fili di fumo attorno a un cilindro ( $Re = 18000$ ): (a) configurazione classica degli attuatori per contrastare la separazione, (b) configurazione invertita per favorire la separazione e (c) attuatori spenti. [107]

sperimentali sono stati eseguiti da Thomas e Kozlov in [108], [109] e [110] e da Li in [111]. In particolare in [109] vengono messe a confronto l'attuazione stazionaria e quella instazionaria: se da una parte la seconda è in grado di sopprimere completamente il fenomeno del *vortex shedding* con un *duty cycle* del 25%, dall'altra parte la prima modalità è più indicata per la riduzione del rumore (riduzione di 13.3 dB), in quanto l'attuazione *unsteady* produce un tono alla frequenza di attuazione e alle corrispondenti armoniche successive (Fig. A.8). In [110] vengono anche provati gli attuatori disposti nella direzione del flusso (PSVG, *plasma streamwise vortex generators*), i quali generano dei vortici contro-rotanti che promuovono il *mixing* fra la corrente esterna e quella vicino a parete, riducendo la scia e quindi il rumore, mentre in [111]

un attuttore *sliding discharge* (App. B) viene confrontato e preferito a un DBD per la riduzione del rumore su un corpo tozzo costituito da un cilindro e da un montante di sostegno.



**Figura A.8:** Effetto dell’attuazione (stazionaria e instazionaria) sul SPL (*sound pressure level*), rappresentativo del rumore. Si può osservare una riduzione consistente del picco associato alla frequenza di *shedding*. [109]

#### A.2.4 Altre applicazioni

Tra le altre applicazioni degli attuatori al plasma ricordiamo il tentativo, peraltro non completamente riuscito, di riduzione di resistenza d’attrito tramite l’utilizzo di oscillazioni laterali del flusso a parete causate da DBD collocati nella direzione della corrente ([112]) e l’utilizzo di DBD per lo smorzamento e la cancellazione delle onde di Tollmien-Schlichting responsabili della transizione laminare-turbolenta dello strato limite ([113] e [114]). Infine, attuatori al plasma sono stati utilizzati con successo per favorire il *mixing* all’uscita di un diffusore ([115]).



# Appendice B

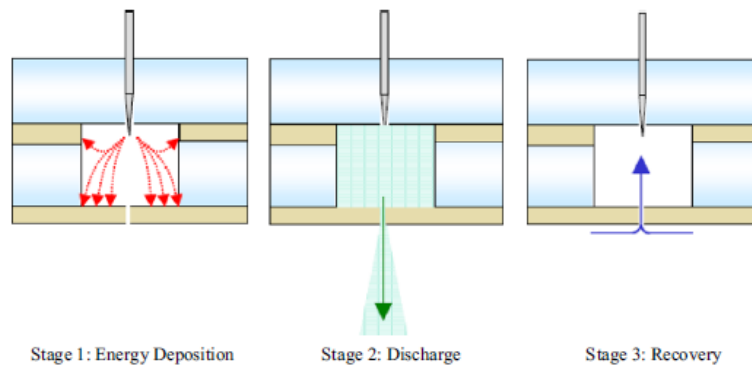
## Altri attuatori al plasma

In questa appendice vengono descritti brevemente altri tipi di attuatori al plasma, differenti dai corona e dai DBD.

L'attuatore ad arco localizzato (*localized arc filament plasma actuator*) sfrutta la formazione di un arco elettrico controllato fra due elettrodi per scaldare rapidamente e localmente l'aria, in modo da produrre perturbazioni fortemente localizzate in flussi transonici e supersonici ([17]).

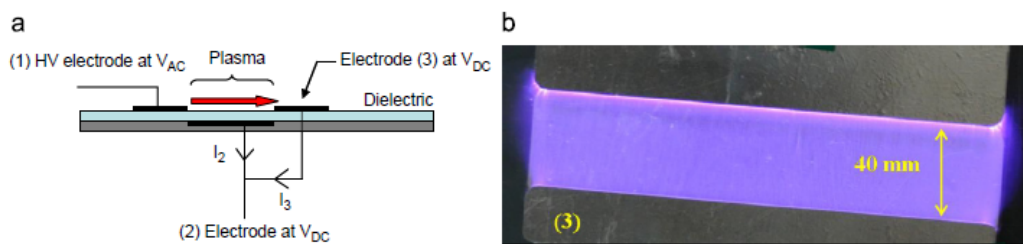
L'attuatore *sparkjet* (Fig. B.1), promettente per il controllo di flussi ad alta velocità, è costituito da una cavità in cui sono posti gli elettrodi e ogni ciclo di funzionamento è diviso in tre fasi: (1) deposizione di energia, in cui una scarica di plasma dentro la cavità scalda rapidamente il gas causando un aumento di pressione, (2) scarica, in cui il gas in pressione viene espulso dalla cavità attraverso un piccolo orifizio, producendo un getto, (3) recupero, in cui il flusso viene aspirato nella cavità, in modo da preservare la conservazione della massa ([101]). Questo ciclo viene ripetuto, in modo da produrre un getto sostenuto simile a quello prodotto dai getti sintetici descritti nel capitolo introduttivo.

Infine, l'attuatore *sliding discharge* ([116], [117], [118], [119], [120], [121] e [122]) è forse quello su cui si concentrano le maggiori speranze per il futuro, in quanto combina i vantaggi del DBD (stabilità di scarica) con quelli del corona (ampia estensione del plasma), sebbene ad oggi, in attesa di ulteriori ottimizzazioni, le prestazioni di questo innovativo tipo di attuatore siano abbastanza simili a quelle del DBD, se non leggermente inferiori. L'attuatore è costituito da tre elettrodi, come si può osservare in Fig. B.2: gli elettrodi (1) e (2), alimentati con tensione alternata e collocati ai due lati del dielettrico, costituiscono un DBD; l'aggiunta dell'elettrodo (3), alimentato con tensione continua negativa, permette l'instaurarsi della *sliding discharge*, che come si può osservare in Fig. B.2 (b) è caratterizzata da un'ampia estensione del plasma, che copre tutta la superficie fra gli elettrodi (1) e (3). Se invece



**Figura B.1:** Schema di funzionamento di un attuttore *sparkjet*. [101]

il terzo elettrodo è alimentato con tensione continua positiva l'aspetto della scarica è del tutto simile a quello del DBD (estensione limitata del plasma), ma le prestazioni sono migliori rispetto al caso precedente.

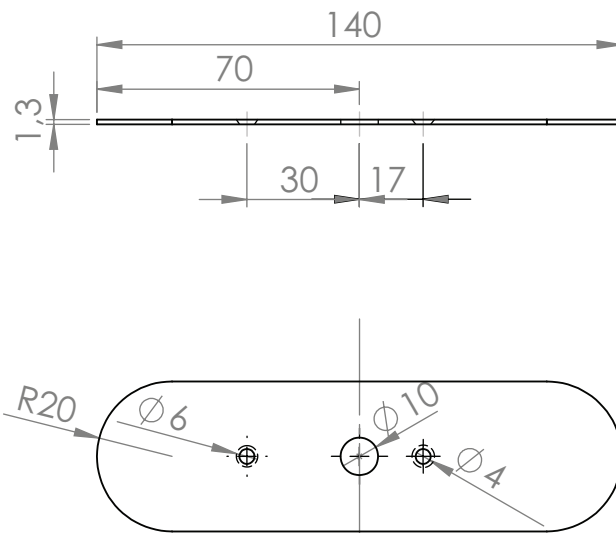


**Figura B.2:** Schema di un attuttore *sliding discharge* (a) e immagine dall'alto del plasma esteso quando  $V_{DC}$  è negativa (b). [117]

# Appendice C

## Disegni e schemi di circuiti

In questa appendice riportiamo i disegni di progetto del profilo NA-CA0015 realizzato, gli schemi elettrici dei circuiti utilizzati e i disegni degli elettrodi provati.



**Figura C.1:** *End plate.*

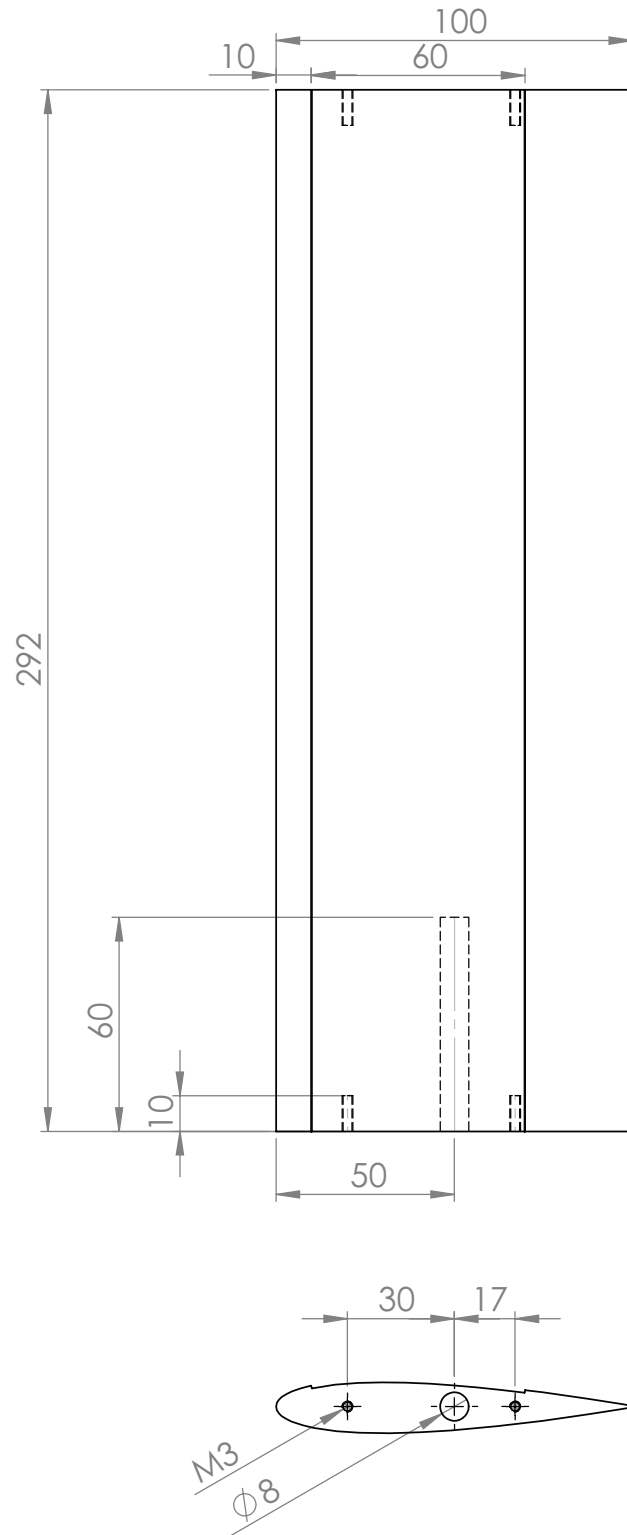


Figura C.2: Profilo NACA0015.

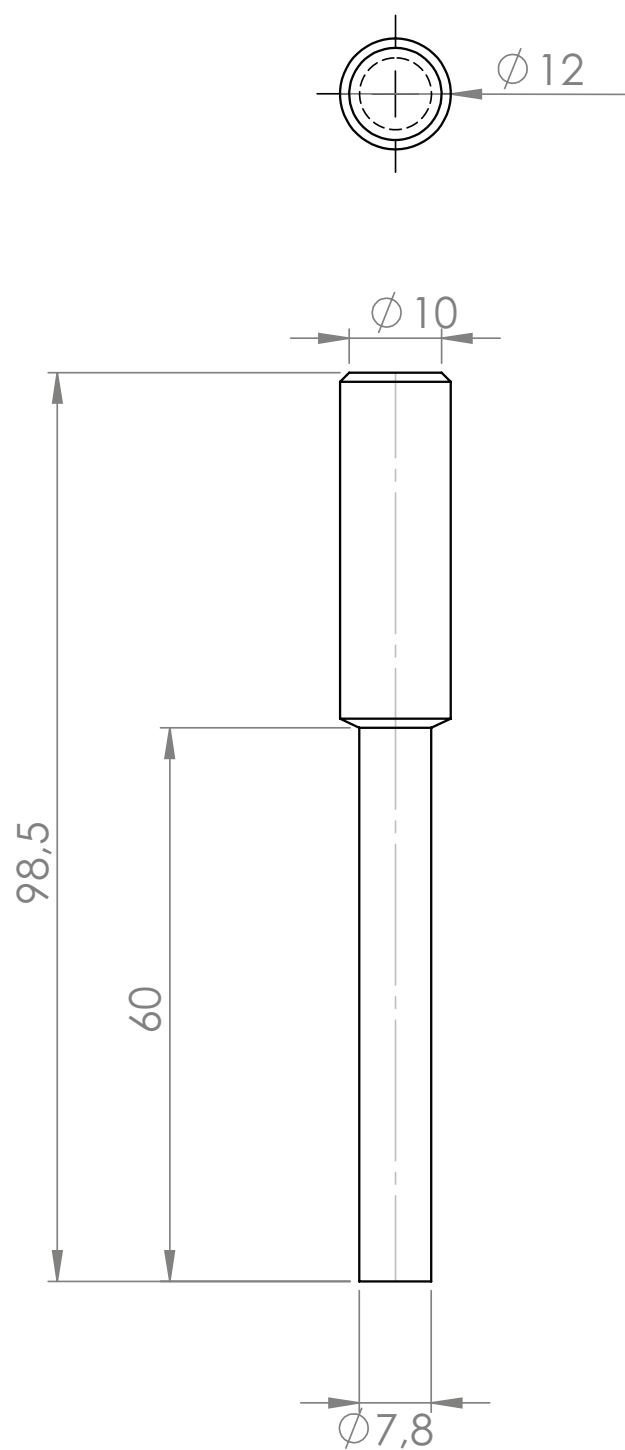
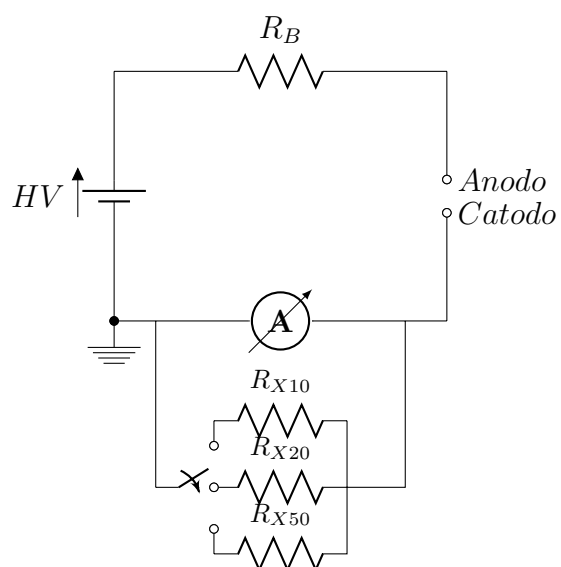


Figura C.3: Perno.



**Figura C.4:** Circuito di alimentazione dell'attuatore a corona.

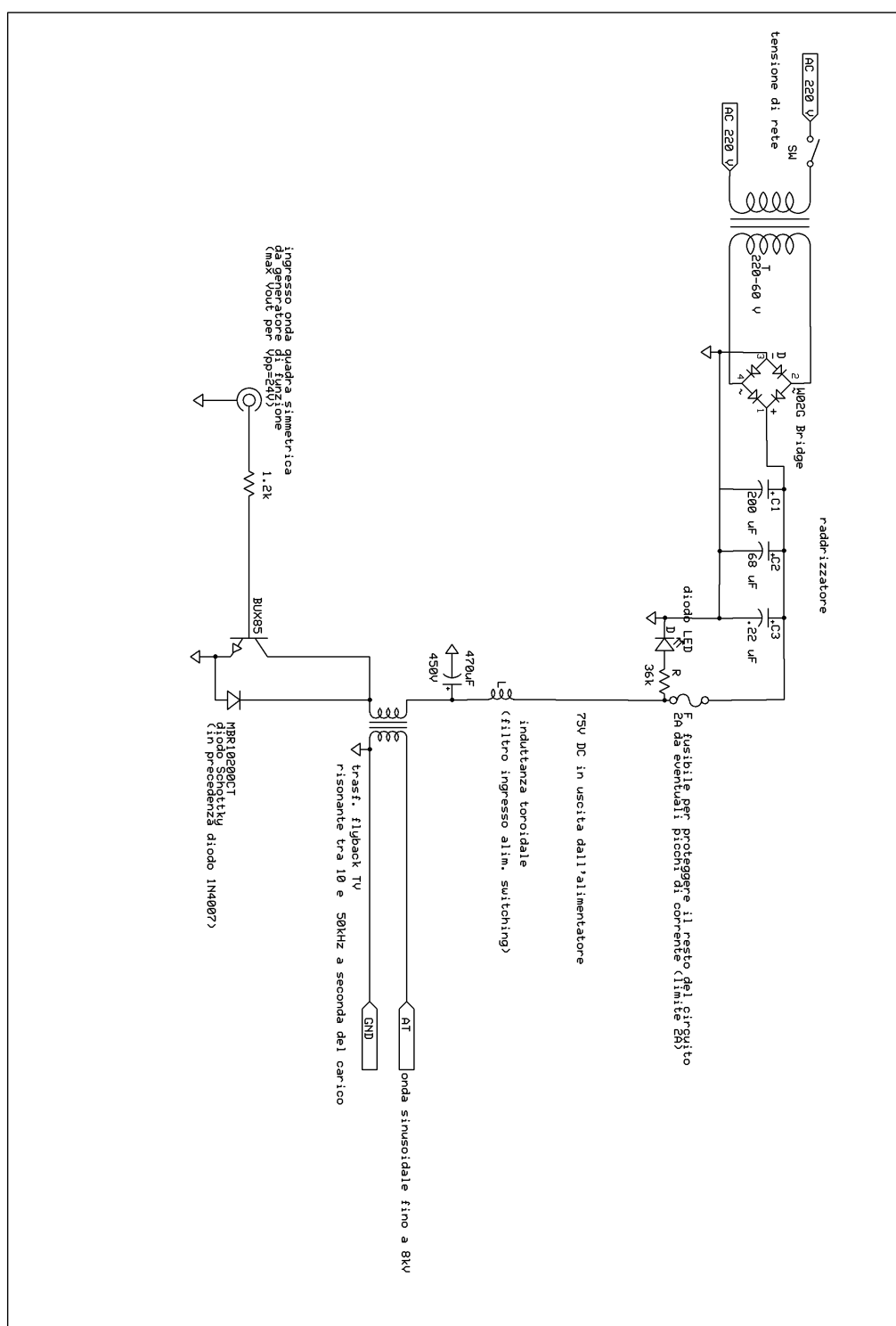
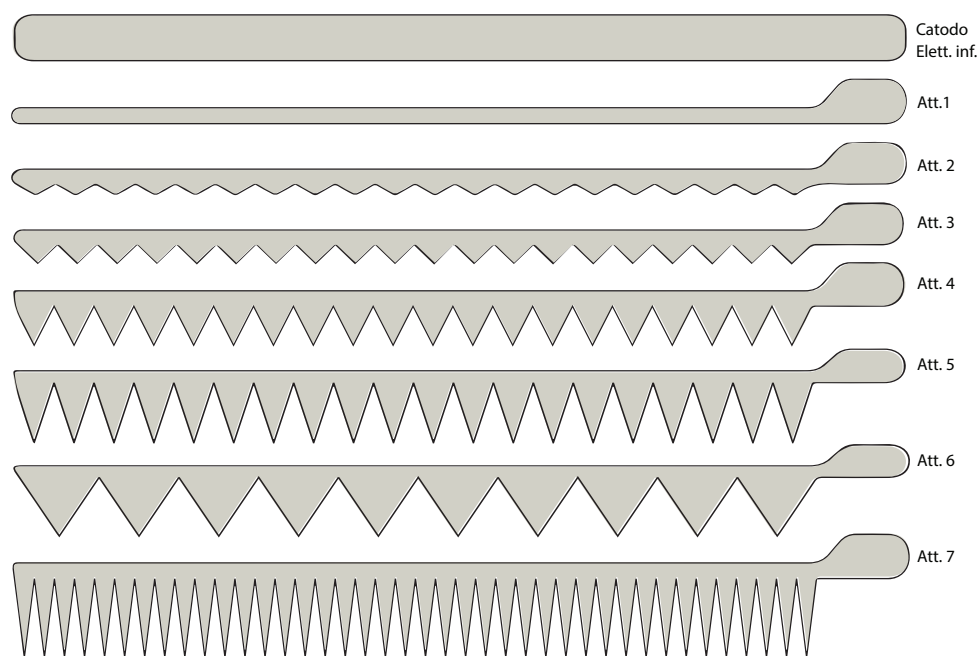


Figura C.5: Circuito di alimentazione e pilotaggio del DBD.



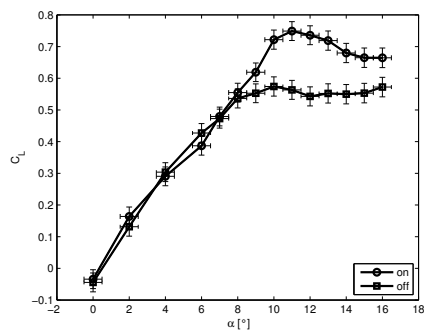
**Figura C.6:** Forma degli elettrodi per le prove di pesata.



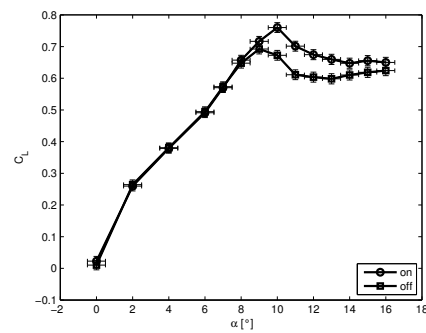
# Appendice D

## Curve di portanza

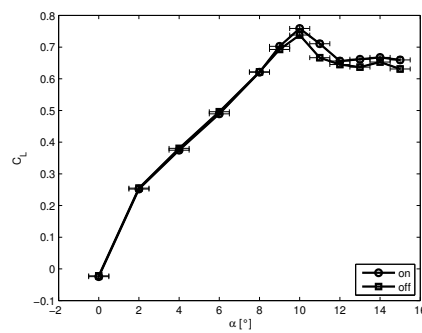
### D.1 Corona



(a)  $U = 5 \text{ m/s}$ .

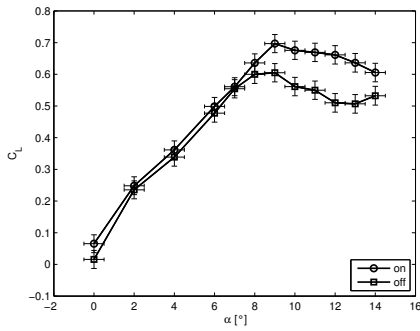
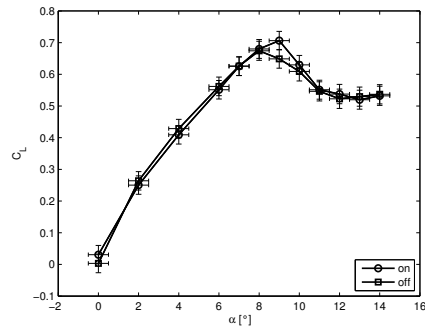
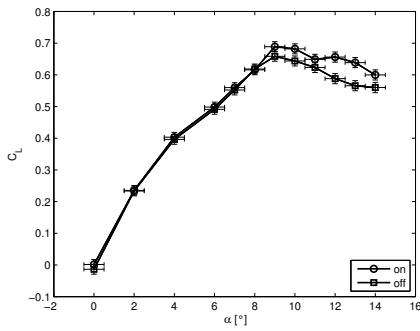
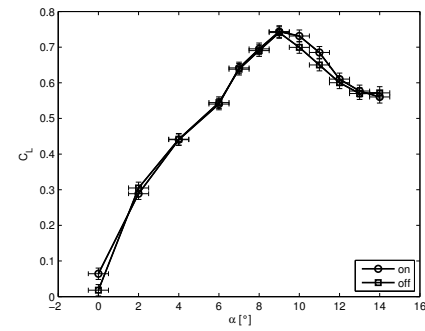
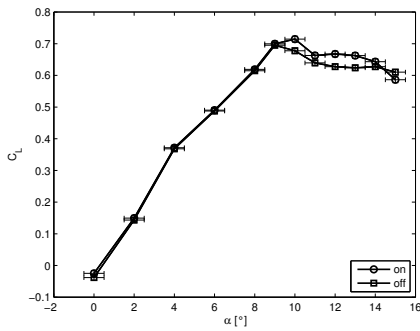
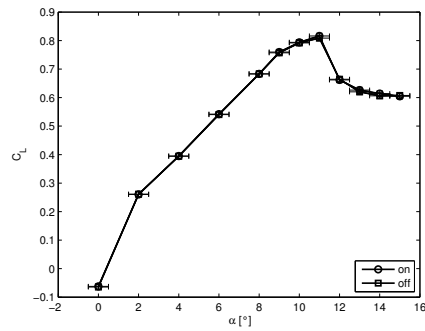


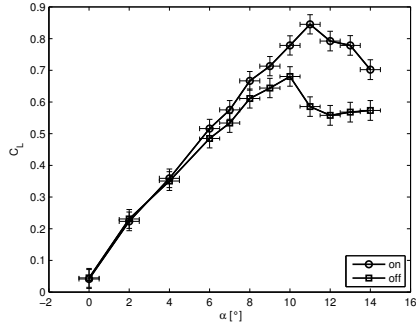
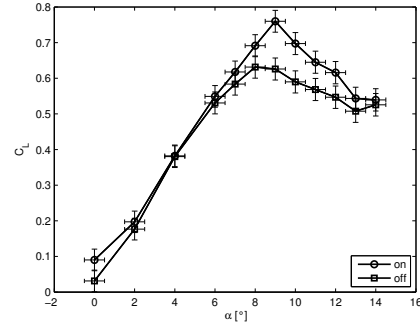
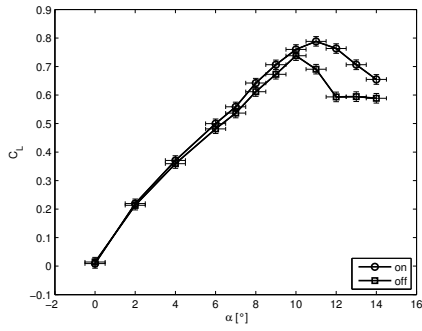
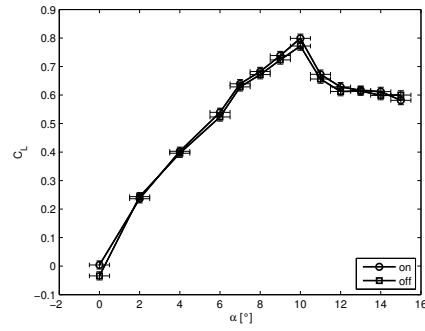
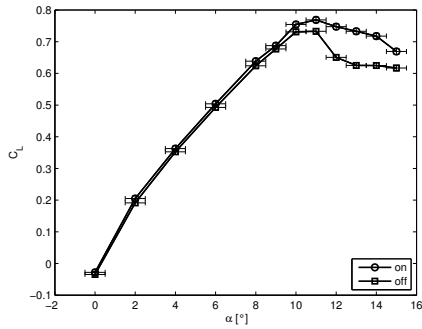
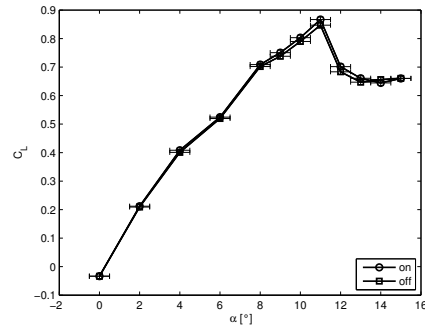
(b)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ .



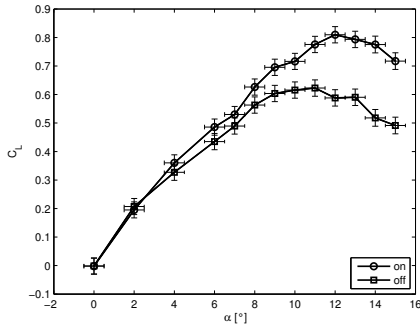
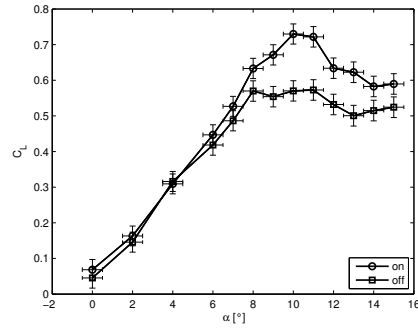
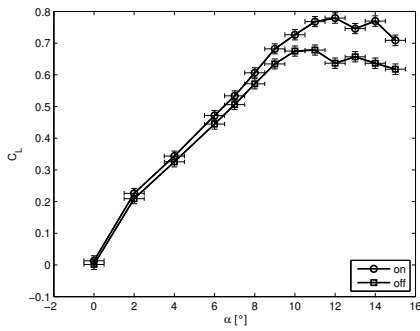
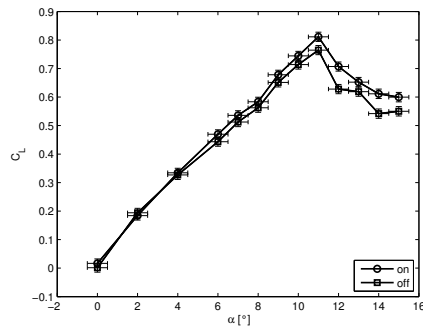
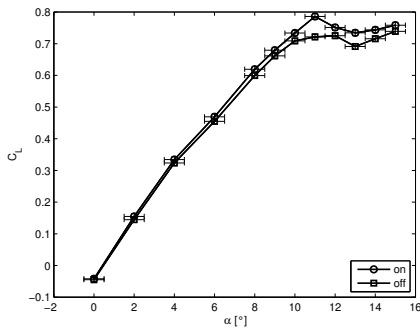
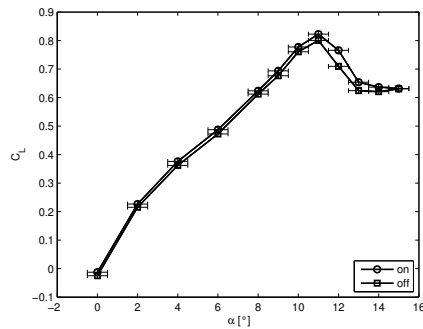
(c)  $U = 10 \text{ m/s}$ .

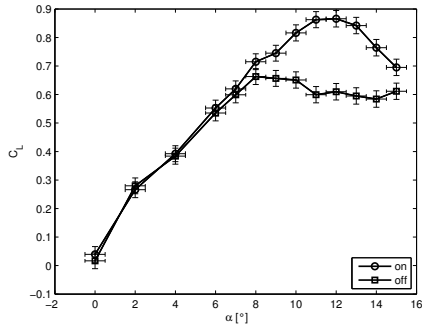
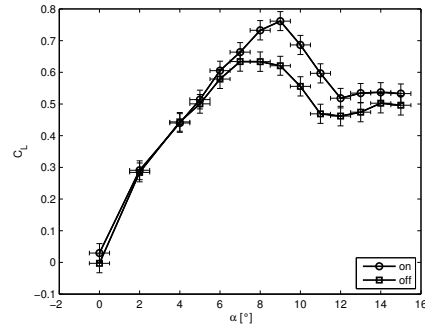
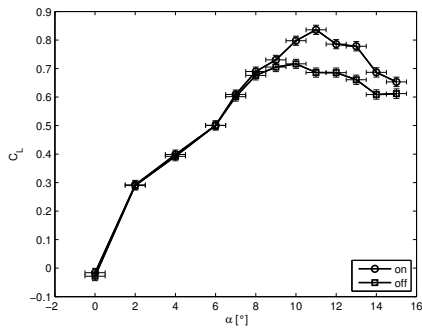
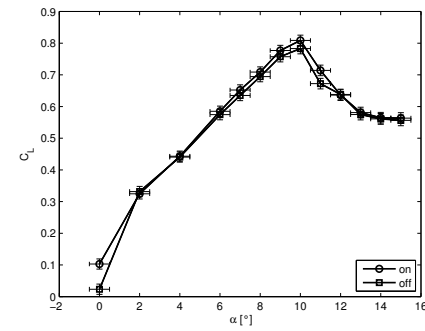
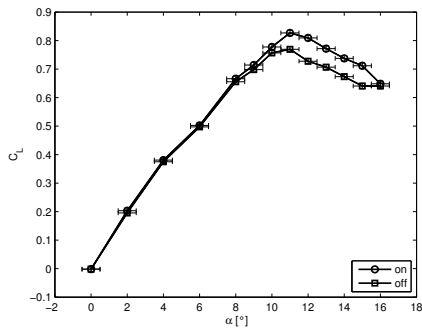
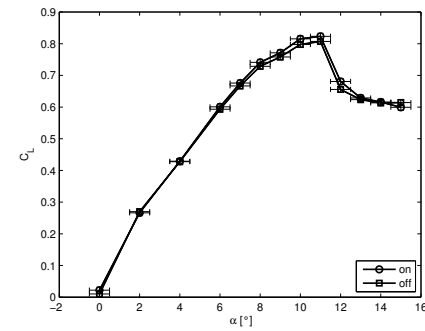
Figura D.1: Curve  $C_L - \alpha$  con attuatore C1 off e on,  $x/c = 10\%$ .

(a)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(b)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(c)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(d)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(e)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(f)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .Figura D.2: Curve  $C_L - \alpha$  con attuatore C2 off e on.

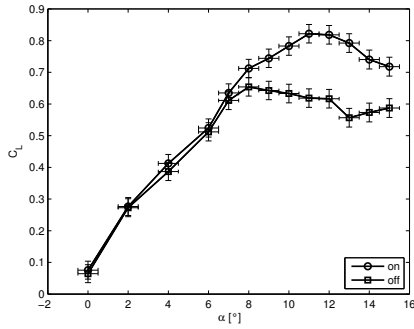
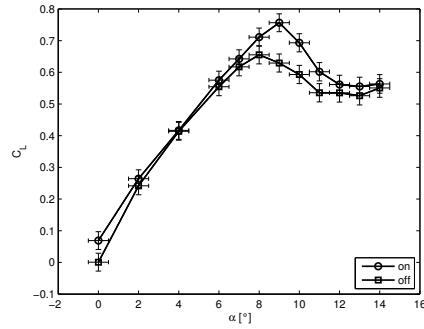
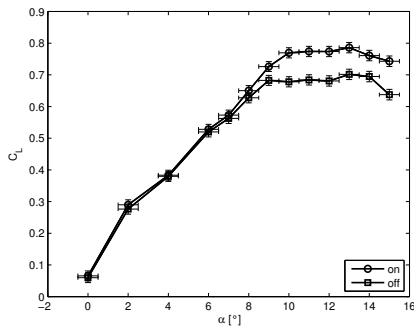
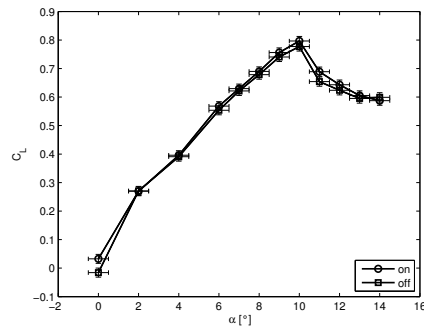
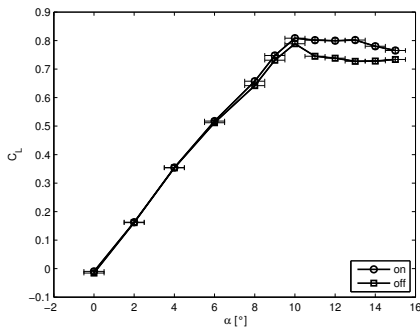
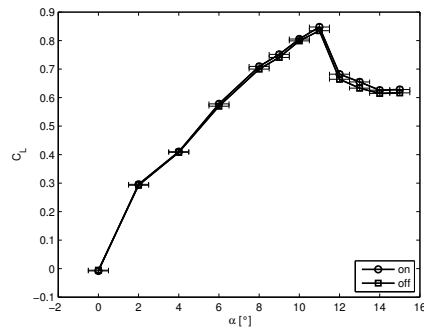
(a)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(b)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(c)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(d)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(e)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(f)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .

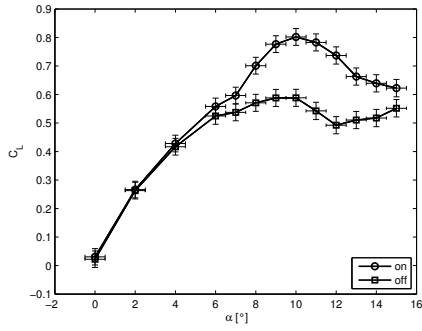
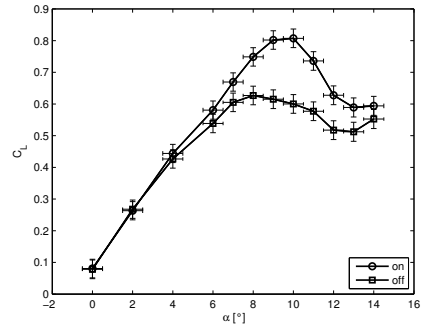
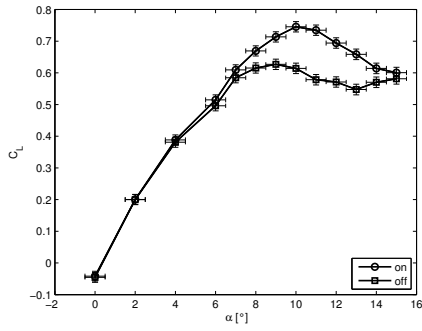
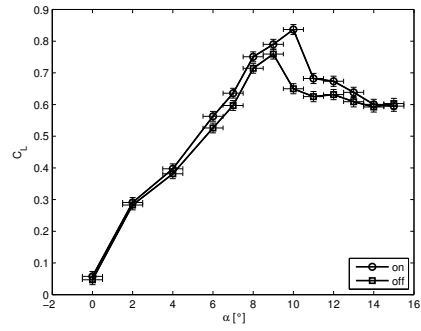
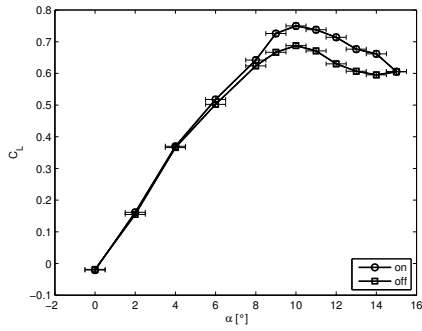
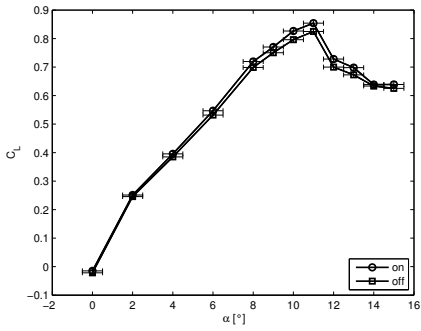
**Figura D.3:** Curve  $C_L - \alpha$  con attuatore C3 off e on.

(a)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(b)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(c)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(d)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(e)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(f)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .Figura D.4: Curve  $C_L - \alpha$  con attuatore C4 off e on.

(a)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(b)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(c)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(d)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(e)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(f)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .

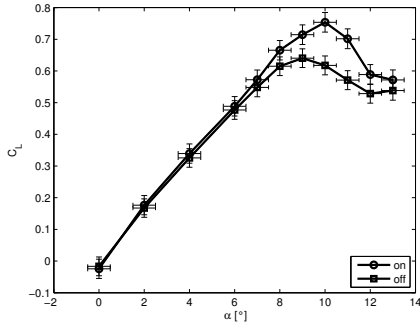
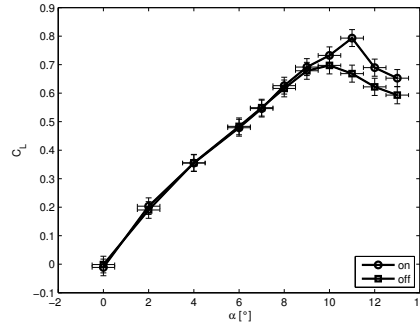
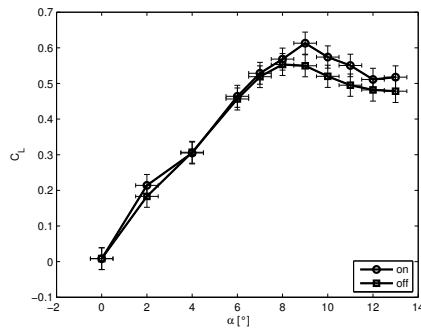
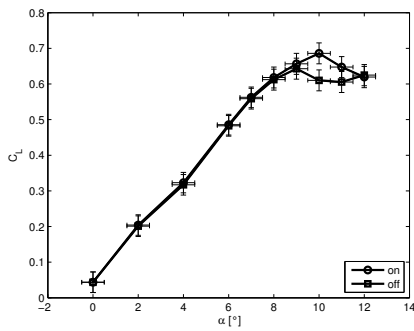
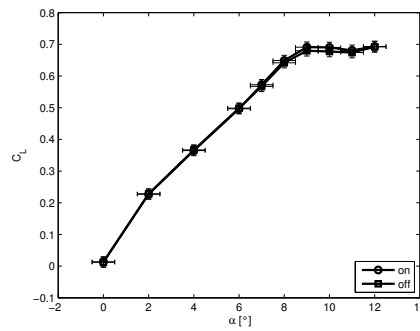
**Figura D.5:** Curve  $C_L - \alpha$  con attuatore C5 off e on.

(a)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(b)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(c)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(d)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(e)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(f)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .Figura D.6: Curve  $C_L - \alpha$  con attuatore C6 off e on.

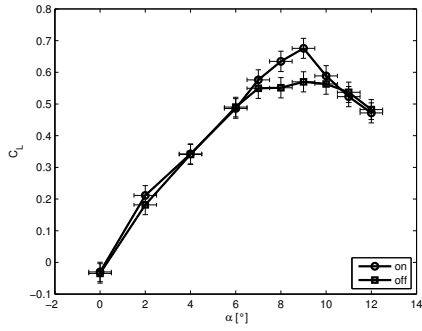
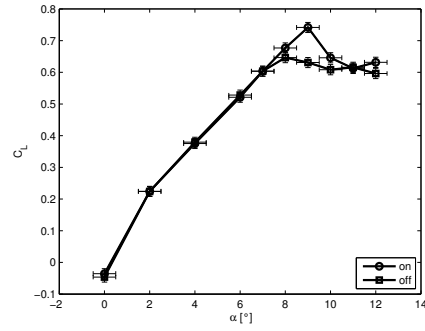
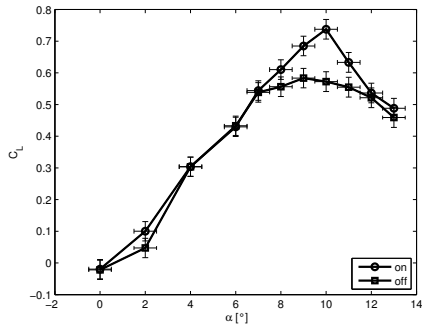
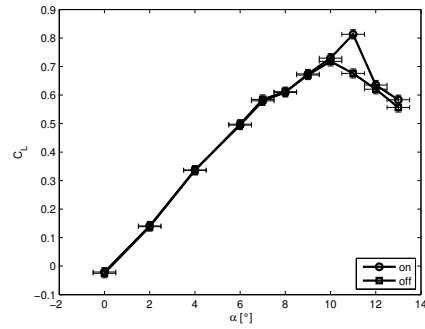
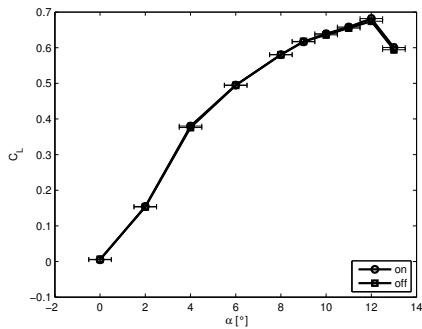
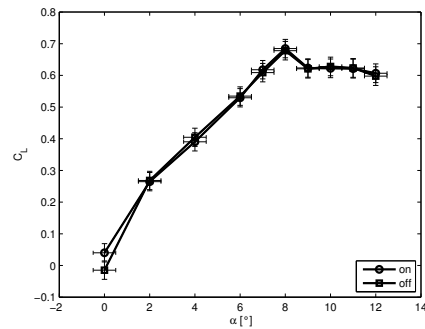
(a)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(b)  $U = 5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(c)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(d)  $U = 7.5 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .(e)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 10\%$ .(f)  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $x/c = 40\%$ .

**Figura D.7:** Curve  $C_L - \alpha$  con attuatore C7 off e on.

## D.2 DBD

(a) D1  $U = 5$  m/s.(b) D2  $U = 5$  m/s.(c) D3  $U = 5$  m/s.(d) D4  $U = 5$  m/s.(e) D4  $U = 7.5$  m/s.Figura D.8: Curve  $C_L - \alpha$  con attuatori DBD off e on al 10% della corda.



(a) D5  $U = 5$  m/s.(b) D5  $U = 7.5$  m/s.(c) D6  $U = 5$  m/s.(d) D6  $U = 7.5$  m/s.(e) D6  $U = 10$  m/s.(f) D7  $U = 5$  m/s.Figura D.9: Curve  $C_L - \alpha$  con attuatori DBD off e on al 10% della corda.