

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

CLASSE L-9

SEDE DI FORLÌ

ELABORATO FINALE DI LAUREA

IN AERODINAMICA

**MESSA A PUNTO DI UNA GALLERIA DEL VENTO PER
L'ANALISI DI FLUSSI INDUSTRIALI COMPLESSI**

CANDIDATO

Letizia Zama

RELATORE

Chiar.mo Prof.

Alessandro Talamelli

CORRELATORE

PhD.Ing.

Alessandro Rossetti

Anno Accademico 2011-2012

Sessione II

ABSTRACT

L'azienda *Global Garden Products*, leader europeo nella produzione ed esportazione di prodotti da giardinaggio, ha avviato in collaborazione con il Laboratorio di Aerodinamica sperimentale della Facoltà di Ingegneria di Bologna, un percorso di ricerca scientifica il cui obiettivo è la comprensione dei complessi fenomeni fluidodinamici di una macchina rasaerba.

Il percorso di ricerca si propone come obiettivo iniziale quello di comprendere qualitativamente le caratteristiche generali del flusso d'aria attorno alla lama, all'interno della voluta anulare e nel canale di scarico, al fine di comprendere quali grandezze fluidodinamiche sia possibile acquisire, e quali tra queste possa effettivamente essere un utile indicatore delle prestazioni dell'insieme lama da taglio - geometria dei condotti.

Dalle prime analisi si è potuto comprendere, come la grandezza che meglio esprime la prestazione della macchina sia la portata in massa dell'aria elaborata dalla macchina, che è quindi stata scelta come indicatore prestazionale per una buona raccolta dell'erba all'interno del sacco .

Nella fase preliminare del percorso si è ipotizzato che le particelle d'erba non influenzino il flusso d'aria, inoltre vista la complessità dell'interazione tra la lama rotante e le pareti della voluta e del condotto si è separato lo studio delle prestazioni delle lame da quello della voluta e dei condotti.

In tal modo, inizialmente, viene investigata la relazione tra la forma delle lame e le loro prestazioni in termini di portata elaborata e successivamente in che modo la forma della voluta e dei condotti, esaltino o riducano tale portata.

A tal fine nel lavoro in oggetto è stato progettato e realizzato un "test-rig lame" in grado di misurare la portata d'aria elaborata dal rasareba, verificata la coerenza e l'attendibilità delle informazioni di portata ottenute, analizzate una serie di lame parametrizzate, rispetto ad alcuni parametri fondamentali quali l'apertura, la corda e il calettamento dei profili del flap.

SOMMARIO

ABSTRACT.....	1
INDICE DELLE FIGURE.....	7
INDICE DELLE TABELLE.....	10
1. INTRODUZIONE.....	11
2. PROGETTAZIONE DEL TEST-RIG	16
2.1 SELEZIONE DELLA TIPOLOGIA DI GALLERIA DEL VENTO	16
2.2. SCELTA E DIMENSIONAMENTO DEGLI ELEMENTI CARATTERISTICI..	21
3. IL MISURATORE DI PORTATA	46
3.1 EQUAZIONI FONDAMENTALI DEL MOTO IN UN TUBO DI VENTURI.....	46
3.2 METODI DI CONVERSIONE DEI DATI DI PRESSIONE IN UN DATO DI PORTATA DI FLUIDO	49
4. CARATTERIZZAZIONE DEL TEST-RIG LAME	58
4.1 CARATTERISTICHE GENERALI	58
4.2.PARALLELO MODELLI ASSIALE – TANGENZIALE: GIUSTIFICAZIONE DELLA SCELTA	67
5. VERIFICA DELL'ACCURATEZZA DEI DATI ACQUISITI DAL TEST-RIG LAME ASSIALE	70
5.1 ANALISI LAME	71
5.2 ANEMOMETRO A FILO CALDO	75
6. STUDIO DELLA PRESTAZIONE DI LAME PARAMETRIZZATE.....	80
6.1 CLASSIFICAZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI	80
6.2 ACQUISIZIONE E ANALISI DATI	82
6.3 CONCLUSIONI	88
7. CONCLUSIONI	89
BIBLIOGRAFIA	93
RINGRAZIAMENTI.....	93
APPENDICE.....	95
CARATTERISTICHE STRUTTURALI DEL TEST-RIG	95

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1. Schematizzazione del test-rig</i>	17
<i>Figura 2. Schematizzazione del principio di reciprocità [8]</i>	18
<i>Figura 3. Schematizzazione della galleria del vento nei modelli a circuito aperto (a) e chiuso (b)</i>	19
<i>Figura 4. Schema della griglia di misura utilizzata per l'acquisizione della velocità attraverso l'anemometro a filo caldo (a sinistra) e relativa immagine dell'uscita del rasaerba (a destra)</i>	22
<i>Figura 5. Zoom del condotto convergente</i>	28
<i>Figura 6. Parametri strutturali della rete</i>	30
<i>Figura 7. Sviluppo del profilo di velocità nel passaggio attraverso una rete al variare della porosità e del coefficiente di perdita della stessa</i>	31
<i>Figura 8. Honeycomb, reti e Venturi in cui sono presenti le 16x4 prese d'aria</i>	37
<i>Figura 9. Profili di pressione al variare della fila di prese statiche lungo il condotto di misura, utilizzando la lama da malching assemblata al test-rig assiale ad altezza minima dal suolo</i>	37
<i>Figura 10. Proprietà dello strato limite lungo una superficie piana</i>	41
<i>Figura 11. Andamento dello strato limite lungo una superficie con gradiente di pressione sufficientemente avverso per la separazione dalla parete</i>	41
<i>Figura 12. Parametri caratteristici di un condotto divergente</i>	42
<i>Figura 13. Limiti di definizione dei regimi di flusso in diffusori subsonici: nel caso di ingresso con strato limite sottile e in condizioni di sviluppo naturale, i confini tra i regimi tendono a giacere nella zona superiore delle bande tratteggiate. In caso di ingresso con strato limite pienamente sviluppato, i confini ricadono nella parte inferiore di dette bande</i>	43
<i>Figura 14. Schematizzazione del flusso quasi-unidimensionale in un condotto</i>	46
<i>Figura 15. Flusso all'interno di un Venturi, caratteristica di pressione</i>	48
<i>Figura 16. Schematizzazione di un trasduttore di pressione piezoelettrico</i>	50
<i>Figura 17. Andamento della portata lungo il condotto convergente al variare dell'altezza dal suolo, utilizzando la lama da malching installata al test-rig tangenziale solo convergente</i>	53
<i>Figura 18. Andamento della pressione nominale e con introduzione di rumore lungo il condotto convergente</i>	55
<i>Figura 19. Errore percentuale acquisito con il metodo dei minimi quadrati</i>	56

<i>Figura 20. Confronto tra i valori portata risultanti applicando i diversi metodi di calcolo usati.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 21 .Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dal convergente stesso.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 22 .Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello dell'honeycomb</i>	<i>60</i>
<i>Figura 23. Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24 .Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento completo fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti e dell'honeycomb</i>	<i>62</i>
<i>Figura 25 .Deviazione standard dei dati di pressione, al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dal convergente stesso</i>	<i>63</i>
<i>Figura 26. Deviazione standard dei dati di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello dell'honeycomb</i>	<i>64</i>
<i>Figura 27. Deviazione standard dei dati di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti</i>	<i>65</i>
<i>Figura 28. Deviazione standard dei dati di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento completo fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti e dell'honeycomb</i>	<i>65</i>
<i>Figura 29 .Aspirazione del flusso in caso di test-rig lame completo, mostrato attraverso l'uso di tell-tale.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 30. Aspirazione del flusso in caso di test-rig lame completo, mostrato attraverso l'uso di tell-tale, ruotato rispetto ad un punto di riferimento.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 31. Andamento della portata elaborata dalle lame da malching e da taglio alle diverse altezze di lavoro del rasaerba dal suolo, utilizzando i test-rig assiale e tangenziale solo convergente.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 32. Installazione sul test-rig lame della lama da taglio (in alto a sinistra), da malching (in alto a destra), da taglio con forature (in basso a sinistra), da taglio con forature tappate (in basso a destra).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 33. Andamento del valore di area del condotto convergente per le sezioni di misura impostata, con annessa la legenda delle quattro lame di interesse.....</i>	<i>72</i>

<i>Figura 34. Curve di portata caratterizzanti ciascuna delle quattro lame di prova in funzione della posizione lungo il condotto convergente</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35. Valori di portata media lungo il condotto convergente, caratterizzanti le quattro lame in esame</i>	<i>74</i>
<i>Figura 36. Griglia dei punti (a destra) di misura della velocità del flusso applicati al bocchettone di uscita del rasaerba (a sinistra), per la sperimentazione con l'anemometro a filo caldo</i>	<i>77</i>
<i>Figura 37. Profilo di velocità della lama da taglio (in alto) e da malching (in basso) rappresentato in funzione dell'uscita del rasaerba</i>	<i>78</i>
<i>Figura 38. Parametri caratteristici di una lama da rasaerba.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 39. Parametri caratteristici del flap di una lama da rasaerba.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 40. Caratterizzazione delle lame parametrizzate e di quella di riferimento</i>	<i>82</i>
<i>Figura 41. Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare della corda della lama</i>	<i>83</i>
<i>Figura 42. Differenza percentuale sul valore di portata al variare della corda della lama ad altezza H1.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 43 .Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare dell'apertura del flap della lama stessa.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 44. Differenza percentuale sul valore di portata al variare dell'apertura del flap della lama ad altezza H1.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 45. Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare della corda del flap della lama stessa.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 46. Differenza percentuale sul valore di portata al variare della corda del flap della lama ad altezza H1.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 47. Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare del calettamento del flap della lama stessa.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 48. Differenza percentuale sul valore di portata al variare del calettamento del flap della lama ad altezza H1</i>	<i>87</i>
<i>Figura 49. Esploso degli elementi costitutivi del test-rig</i>	<i>95</i>
<i>Figura 50. Bordo inferiore del test-rig in 3D (a sinistra) e in vista frontale con quotatura (a destra).....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 51. Voluta anulare in 3D (a sinistra) e vista frontale con quote (a destra)</i>	<i>97</i>
<i>Figura 52. Coperchio del motore in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotature (a destra)</i>	<i>99</i>
<i>Figura 53. Honeycomb in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotatura (a destra)</i>	<i>100</i>
<i>Figura 54. Rete in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotatura (a destra)</i>	<i>101</i>

<i>Figura 55. Calma in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotatura (a destra).....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 56. Tubo di Venturi: Convergente in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotature (a destra)</i>	<i>103</i>
<i>Figura 57. Tubo di Venturi: Divergente in 3D (a sinistra) e in pianta con quotature (a destra)</i>	<i>104</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1. Valori della velocità del flusso in uscita dal rasaerba</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 2. Scelta del diametro della voluta anulare in base a quelli delle lame da studiare</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 3. Area di passaggio del fluido della voluta anulare.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabella 4. Dimensionamento e caratterizzazione degli elementi caratteristici del test-rig in base alla portata di fluido in uscita dal rasaerba</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 5. Caratteristiche di una rete generica installata in galleria del vent</i>	<i>30</i>
<i>Tabella 6 .Portata media lungo il convergente di misura per le quattro lame esaminate</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 7. Valore di portata e differenza percentuale tra i valori calcolati con i diversi test-rig e l'anemometro a filo caldo per le lame da taglio e da malching.....</i>	<i>78</i>

1. INTRODUZIONE

L'azienda *Global Garden Products (GGP)*, leader a livello europeo nell'ambito costruttivo di rasaerba, ha commissionato alla sezione aerodinamica della Facoltà di Ingegneria Aerospaziale lo studio delle prestazioni di una serie di lame di produzione propria, il quale ha luogo nel Laboratorio di Aerodinamica. La richiesta dell'azienda è valutare la lama, tra le lame parametrizzate realizzate dall'azienda stessa e inviate al Laboratorio, che ottimizzi le prestazioni dei tosaerba costruiti, quindi realizzare un prodotto finale caratterizzato da un buon rapporto qualità-prezzo, nonché in grado di inserirsi con successo nel mercato.

Il tosaerba è un macchinario ideato per la cura del giardino, cioè per il taglio del prato, che avviene attraverso la rotazione ad alte velocità di una lama. A seconda di quale sia il risultato che il consumatore desidera sono realizzate due tipologie di lama, infatti l'erba appena recisa può essere o trasportata in un sacco di raccolta all'uscita del rasaerba oppure ulteriormente sminuzzata per poi essere lasciata cadere sul suolo. La prima operazione è effettuata attraverso la lama detta da taglio, la quale deve imprimere all'erba appena tagliata una sufficiente forza, necessaria per il trasporto all'interno del sacco di raccolta, mentre la seconda è compiuta attraverso la lama chiamata da *malching*, che dovendo tritare iterativamente i filetti di erba non deve 'spazzarli' via una volta tagliati.

La valutazione della capacità della lama studiata, nonché della bontà della stessa a compiere la funzione per cui è stata realizzata, viene svolta attraverso lo studio del flusso di aria generato ed elaborato dalla lama stessa, il quale è caratterizzato da diverse grandezze fisiche, quali pressione, velocità, densità e temperatura, che si modificano nel tempo, quindi si tratta di analizzare un campo fortemente complesso. La generazione di un flusso necessita di una variazione importante del valore di pressione, che è proporzionalmente legato alla velocità, mentre temperatura e densità rimangono circa costanti all'interno del tosaerba, data la breve distanza da percorrere. L'identificazione delle caratteristiche della lama sembra quindi essere governata dal solo studio del campo di pressione, tuttavia l'analisi di

questa misura non risulta sufficiente per riconoscere quale lama sia in grado di tagliare una maggiore quantità di erba. Il parametro in grado di mostrare la funzionalità della lama è la portata di aria che viene elaborata dalla lama stessa, infatti descrive la capacità di ‘risucchio’ della lama, che è appunto legata alla portata di erba recisa.

Per poter individuare il valore di tale quantità si può optare di procedere attraverso tre diversi approcci al problema: a livello analitico, numerico o sperimentale. Il primo metodo presuppone la conoscenza di leggi matematiche che descrivano l’andamento delle grandezze all’interno del rasaerba mentre il secondo consiste nella simulazione di queste attraverso l’utilizzo di software, inoltre in entrambi i casi è richiesto un ampio margine di tempo dedito alla risoluzione del problema. In realtà non è determinabile in maniera sufficientemente precisa un sistema di equazioni caratteristico di quanto accade all’interno del tagliaerba, di conseguenza non è nemmeno possibile effettuare la relativa simulazione quindi i primi due metodi esposti non possono essere utilizzati.

In conclusione l’analisi del flusso avviene per via sperimentale, cioè effettuando un certo numero di test, eseguiti attraverso l’uso diretto del rasaerba oppure sfruttando una struttura di misurazione delle grandezze fisiche in gioco. L’azienda *GGP* si è occupata di quantificare l’entità di erba recisa dal tagliaerba in azione in una zona di prato preparata alla prova, tuttavia il risultato trovato ha validità solo qualitativa, a causa dell’ovvia assenza di uniformità di erba distesa nel prato.

La necessità di studiare il comportamento di diverse lame per migliorare la performance dei propri prodotti ha spinto l’azienda a contattare appunto la Seconda Facoltà di Ingegneria Aerospaziale per realizzare una struttura, test-rig, che permetta di effettuare uno studio preciso del flusso generato da una lama rotante. Questo macchinario quindi presenterà le caratteristiche di obiettività, in quanto la portata ricavata sarà effettivamente dipendente solo dalla lama analizzata e non dalla quantità di erba recisa dal rasaerba, e di ripetitività, cioè le prove effettuate utilizzando un’unica lama conducono a risultati affini grazie alla similitudine delle condizioni iniziali di lavoro.

Tale metodo consente di differenziare la prestazione di ogni lama, tuttavia se si fosse interessati a migliorare le performance del prodotto finale agendo anche sulla struttura del rasoerba allora sarebbe indicato effettuare i test direttamente su un rasoerba, nel quale vengono collocati opportunamente i dispositivi di misurazione del flusso allo scopo di descriverne il comportamento al suo interno. In realtà i risultati che si ottengono attraverso lo studio di lame dalle prestazioni note sono alquanto discrepanti con la vera performance, per cui è visibile quanto la geometria della voluta influisca sul rendimento della lama stessa. Al fine di svincolarsi da questa situazione risulta opportuno scindere lo studio della prestazione della lama dall'efficienza della struttura accogliente la lama stessa, cioè la voluta, per cui si realizza un test-rig lama assiale.

I dati di portata di questo modello sono direttamente interpretati per decretare la bontà della lama, infatti a maggior valori di portata equivalgono prestazioni migliori. In particolare tale test-rig, realizzato al fine della raccolta e dell'analisi del flusso di aria, è composto da due macroparti: la prima assegnata per il trattamento del flusso mentre la seconda per la misurazione del campo di pressione, da cui sarà possibile estrapolare il corrispondente valore di portata, attraverso le leggi fisico-matematiche che definiscono il fenomeno studiato. La validità dei dati raccolti è dimostrata valutando la portata di fluido elaborata da quattro differenti lame di rasoerba, di cui le prestazioni sono note all'utilizzatore, di conseguenza ogni lama parametrizzata realizzata può essere iterativamente assemblata al test-rig, con la certezza che la performance risultante sia affidabile.

Ognuna delle lame da analizzare si differenzia a livello costruttivo per le proprie caratteristiche geometriche, quali ad esempio la dimensione dei flap e il calettamento dei profili che la formano, che influiscono in maniera considerevole sul funzionamento della lama stessa, infatti la differenza di forma comporta un diverso approccio della lama stessa con l'aria da elaborare. Questo infatti lo si può vedere confrontando tra loro la lama da taglio e da malching, le quali, come detto in precedenza, hanno un diverso scopo, soddisfatto attraverso una determinata struttura. Ogni lama genera un particolare flusso, il quale è segno distintivo per quella determinata lama, di

conseguenza è valida l'assunzione della portata come parametro di studio di riferimento, allo scopo di realizzare un tosaerba competitivo sul mercato.

A livello aeronautico l'analisi del flusso elaborato da una lama rotante rimanda al funzionamento degli elicotteri, i quali sfruttano il palettamento rotorico per avere sufficiente forza di sustentazione e di avanzamento rispetto al suolo.

Gli elicotteri sono una classe di velivoli il cui principio di funzionamento si basa sull'aspirazione dell'aria sovrastante le pale, la quale sarà pompata verso il basso, con lo scopo di generare una spinta proporzionale al valore del peso stesso del velivolo, la cui intensità varia agendo sul comando del passo collettivo, mentre per il movimento di traslazione il flusso d'aria viene convogliato in una direzione diversa dalla verticale, manovrando il passo ciclico, cioè inclinando opportunamente il rotore di testa [1].

La potenza che il motore deve fornire per consentire il volo dell'elicottero è costituita da diversi contributi: la potenza indotta, legata alle variazioni di quantità di moto determinate dal rotore nel flusso d'aria accelerato dalle pale; la potenza di profilo, dovuta alla resistenza aerodinamica cui le pale sono sottoposte nel loro moto, la potenza parassita, data dalla resistenza che fusoliera, carrello e le altre parti dell'elicottero, distinte dal rotore, incontrano durante il volo traslato, la potenza necessaria alla movimentazione del rotore di coda, che richiede di solito circa il 15-20% della potenza totale e la potenza assorbita dai diversi impianti di volo e dispersa nei vari rotismi interposti tra unità motrice e rotore [2]. Analogamente anche il motore del rasaerba deve generare una certa quantità di potenza sulla lama affinché questa sia in grado di recidere in maniera netta i fili di erba con cui si trova a contatto.

I due mezzi considerati tuttavia non vengono paragonati tra di loro in quanto il tagliaerba non è realizzato con una struttura avente la caratteristica di assial-simmetria, propria dell'elicottero, inoltre tutte le condizioni di lavoro sono fortemente influenzate dalla presenza del suolo.

Risulta però interessante considerare la condizione di volo a punto fisso, detta hovering [3], la quale comporta lo stazionamento dell'elicottero, cioè la velocità di traslazione deve essere nulla rispetto al suolo cosicché il velivolo

permane ad altitudine costante, in effetto suolo o fuori effetto suolo. Ipotizzando che sia presente anche l'effetto suolo, cioè quando il rotore è movimentato a quote di valore inferiore della metà dell'apertura dello stesso [4], si può intravedere una certa somiglianza della condizione di lavoro dell'elicottero in paragone a quella del rasaerba. Ciononostante per quanto detto in precedenza permane una certa discrepanza tra il comportamento dei due macchinari in questione, di conseguenza anche le leggi fisico-matematiche attinenti differiscono tra di loro, quindi non è possibile attuare uno studio in parallelo delle intere strutture; tuttavia è ponderata l'analisi del palettamento appartenente al rotore di testa attraverso il test-rig realizzato per la caratterizzazione della lama del rasaerba.

2. PROGETTAZIONE DEL TEST-RIG

Il test-rig assiale viene realizzato allo scopo di valutare la prestazione di una lama di rasaerba in termine di portata di fluido, in particolare facendo operare la lama nelle proprie condizioni nominali, cioè in fase di rotazione attorno ad un perno. Questo movimento rotatorio è impostato in modo che equivalga a quello che si instaura quando la lama è installata sul tagliaerba, da cui si genera un flusso di aria contrassegnante quella data lama. Analogamente una galleria del vento è progettata al fine di generare un flusso, dalle caratteristiche note, al fine di studiarne l'interazione con un corpo di interesse. Di conseguenza il test-rig viene ipotizzato affine ad una galleria, per il quale l'oggetto di studio è la lama del rasaerba, la quale è anche l'elemento generante il flusso.

Successivamente al conseguimento di esiti negativi attraverso l'analisi delle lame utilizzando un test-rig le cui caratteristiche sono in similitudine a livello geometrico della voluta di un rasaerba, è stato necessario semplificare la natura del problema, da cui la scelta di progettare un modello assiale. Ne risulta un macchinario in grado di valutare la prestazione della lama prescindendo dalla struttura geometrica della voluta del tagliaerba.

2.1 SELEZIONE DELLA TIPOLOGIA DI GALLERIA DEL VENTO

A livello qualitativo il test-rig (**Figura 1**) viene progettato in analogia ad una tradizionale galleria del vento di tipo aperta subsonica, in particolare deve essere realizzato in coerenza al comportamento e alle caratteristiche del tosaerba fornito in dotazione dall'azienda. La prerogativa di questo macchinario è di generare una portata di fluido affine alla portata che viene stimata al bocchettone di uscita del rasaerba, da cui deriva la necessità di dimensionare opportunamente ogni singolo elemento componente il test-rig.

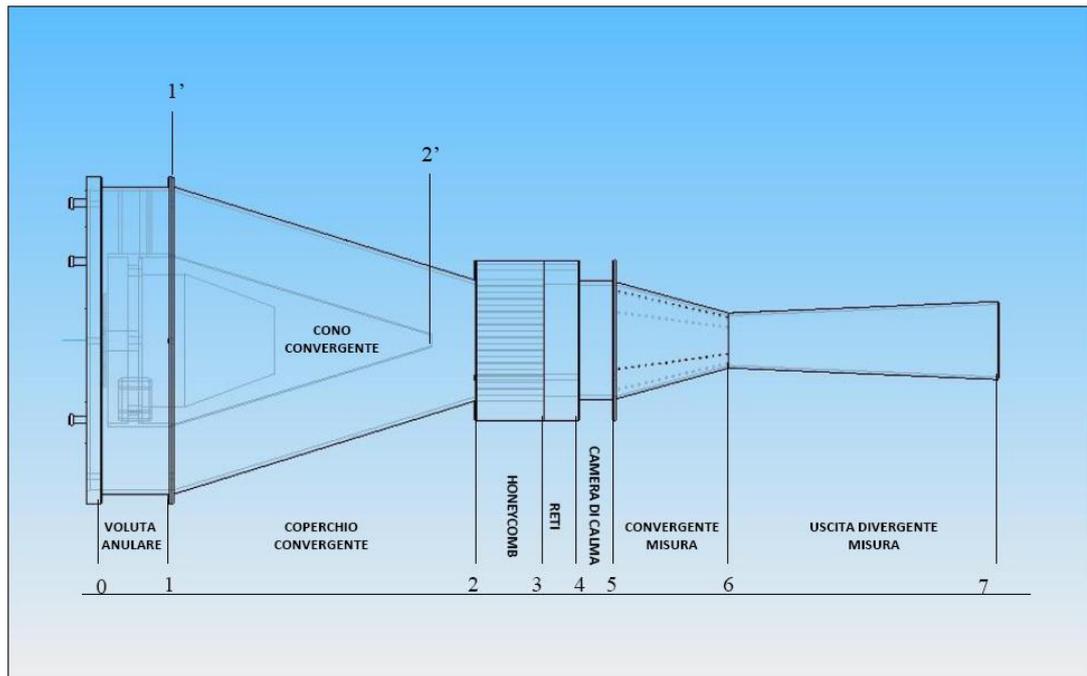


Figura 1. Schematizzazione del test-rig

Una galleria del vento standard possiede un fan che produce il flusso di aria che varia a seconda della velocità del fan stesso, di conseguenza il corpo posto in camera di prova sarà studiato in relazione a diversi tipi di flusso, al contrario il test-rig da realizzare deve fornire sempre la stessa situazione, quindi il motore installato permetterà la rotazione delle diverse lame assemblate sempre alla stessa velocità, tale da avere la portata di flusso uguale a quella in uscita dal rasaerba.

Il funzionamento delle tradizionali gallerie del vento si basa sul principio di reciprocità (**Figura 2**), il cui enunciato dichiara che le forze aerodinamiche agenti su un corpo posto in movimento sono equivalenti a quelle applicate al corpo stesso, se questo fosse lasciato fermo ed fosse impattato da un flusso avente le stesse caratteristiche di quello del caso precedente.

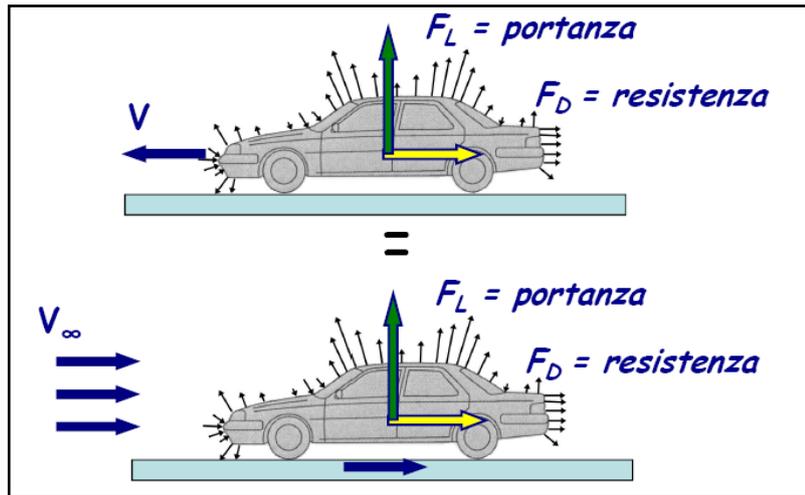


Figura 2. Schematizzazione del principio di reciprocità [8]

Tale condizione, necessariamente da soddisfare, comporta che debba essere riprodotto lo stesso andamento del flusso che lambirebbe le superfici del corpo soggetto allo studio se questo fosse in moto, quindi viene inserito un fan opportunamente movimentato, mentre il corpo viene lasciato fermo all'interno della camera di prova. Nel caso in cui l'oggetto di interesse sia di notevoli dimensioni non è possibile analizzare direttamente le grandezze fisiche in gioco, ma è necessario realizzare un modello in scala e successivamente riportare in maniera opportuna i dati trovati rispetto all'oggetto di dimensioni nominali. In questo caso l'attenzione è concentrata direttamente sulla lama, che è l'oggetto sia di studio che di generazione del flusso, in particolare la ridotta dimensione di essa consente di costruire una strumentazione conforme, evitando quindi l'introduzione di coefficienti di proporzione.

La necessità di studiare diversi tipi di flusso e la qualità con cui questa operazione deve essere eseguita ha indotto allo sviluppo di diverse tipologie di gallerie del vento, le quali possono essere classificate secondo una serie di parametri:

- funzionamento: continuo o ad intermittenza;
- numero di Mach del flusso (definito come il rapporto la velocità del flusso e la velocità del suono definita in una data condizione

ambiente): regime subsonico ($M < 0,3$ flusso incomprimibile, $0,3 < M < 0,8$ flusso comprimibile), transonico ($0,8 < M < 1,2$), supersonico ($1,2 < M < 4$) e ipersonico ($M > 4$);

- schema di circolazione dell'aria: circuito aperto (Eiffel) o chiuso (Göttingen).

In particolare il flusso in uscita dal rasoiera risulta dai dati sperimentali essere un flusso a bassa velocità (**Tabella 1**), la quale oscilla intorno ai 10 m/s, che è un valore decisamente inferiore a 100 m/s; a quest'ultimo corrisponde il numero di Mach all'incirca di modulo 0,3. Il test-rig dovrà quindi presentare le caratteristiche di una galleria del vento che opera in campo di moto di basso subsonico, in cui è appunto valida l'ipotesi di incomprimibilità del flusso.

Ora bisogna determinarne la geometria scegliendo tra le tipologie a circuito aperto o chiuso (**Figura 3**).

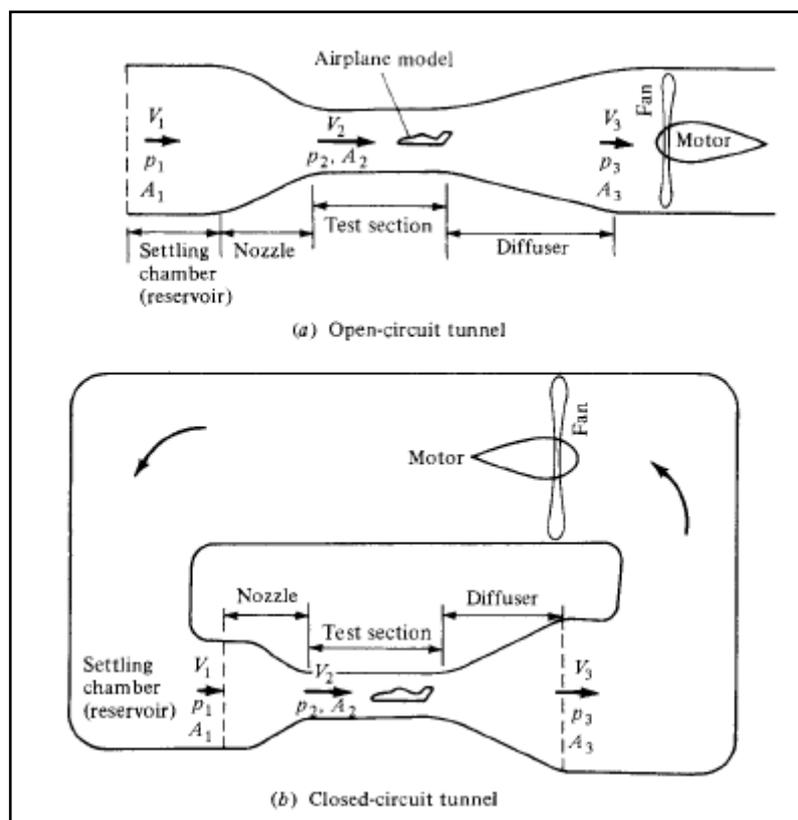


Figura 3. Schematizzazione della galleria del vento nei modelli a circuito aperto (a) e chiuso (b) (Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Graw-Hill, Terza Edizione, chapter 3.3)

La prima categoria non può prescindere dall'influenza delle condizioni dell'ambiente esterno, che oltre a modificare le caratteristiche del flusso elaborato dal fan, può causare l'introduzione di polveri o altri oggetti che potrebbero danneggiare il macchinario stesso. La presenza del condotto divergente direttamente collegato alla camera di prova comporta, per questa tipologia di galleria, che all'interno di essa si instauri un valore di pressione minore rispetto a quello all'esterno, per cui al fine di evitare la creazione di un flusso spontaneo di aria dall'esterno all'interno della *testing chamber* è necessario che quest'ultima sia chiusa ermeticamente, altrimenti verrebbe modificato il flusso di interesse generato dal fan. La potenza spesa dal motore dipende dalla velocità del flusso all'interno della galleria, attraverso una funzione di terzo grado, quindi maggiore è l'energia cinetica che devono presentare le particelle, la quale dipende dal tipo di studio richiesto, maggiore risulta la potenza da fornire al fan.

La seconda categoria presenta appunto un circuito chiuso che viene raccordato attraverso la disposizione di angoli, i quali deviano il flusso in maniera omogenea e sono opportunamente dimensionati affinché le perdite di carico siano limitate, grazie al recupero di una parte di energia cinetica del flusso stesso, di conseguenza è ridotta la potenza spesa dal motore rispetto al modello *open loop*. In realtà, quando il flusso raggiunge l'angolo, le particelle che si trovano a minore raggio di curvatura percorrono un tratto minore rispetto alle altre e mantenendo tutta la velocità costante si modifica l'inclinazione della linea di corrente che induce alla generazione di vorticità di tipo assiale. Tale situazione provoca dissipazione di energia da cui consegue un aumento della temperatura delle particelle del flusso, il quale non può essere accettato in quanto modifica le caratteristiche del flusso stesso, per cui è doveroso installare un sistema di raffreddamento, il cui funzionamento richiede una certa quantità di potenza. Ne consegue che il risparmio energetico non rappresenta un parametro di scelta di questa tipologia di galleria del vento a discapito del modello a circuito aperto. La preferenza del modello a circuito chiuso invece è determinata dalla qualità del flusso generato, infatti risulta migliore in termini di omogeneità (cioè la velocità di ogni particella deve discostarsi il minimo possibile da quella

media del flusso richiesto), angolatura (cioè le linee di corrente del flusso devono mantenersi parallele tra di loro), e livello di rumore intrinseco (il fan produce una quantità di rumore che nella realtà non è presente, per cui deve essere il più possibile limitato); la bontà di questi parametri comporta che il flusso generato sia conforme al principio di reciprocità, altrimenti condurre lo studio in galleria del vento può non essere ragionevole a causa dell'eccessiva discordanza con il caso reale.

Nel caso di analisi del flusso elaborato da una lama installata in un tosaerba ci si è indirizzati verso il tipo *open loop wind tunnel*, principalmente per gli aspetti di basso costo e semplicità di realizzazione rispetto al modello Göttingen, inoltre è il flusso stesso ad essere l'elemento principe di studio, nonché la lama che lo ha generato. Tale situazione rende irrilevante che la galleria sia percorsa da un flusso che rispetti al meglio il principio di reciprocità in quanto non è presente alcun oggetto di prova, mentre è importante che il flusso elaborato dalla lama sia conforme a quello che il rasaerba produce.

2.2. SCELTA E DIMENSIONAMENTO DEGLI ELEMENTI CARATTERISTICI

Il test-rig realizzato è suddivisibile in due zone secondo la propria funzione: una dedicata a simulare le stesse condizioni a cui è soggetto il flusso all'interno del rasaerba e la seconda interessata alla misurazione del campo di pressione. La parte costruita per il trattamento del flusso di aria elaborato dalla lama è costituita da una voluta anulare, dal motore, da un cono e dal coperchio convergente, infine dagli organi di condizionamento del flusso, cioè le reti e l'honeycomb.

Il primo step è il dimensionamento della voluta anulare, al cui interno sarà posta la lama, di conseguenza il flusso generato deve essere, come detto in precedenza, qualitativamente dello stesso ordine di grandezza della portata in uscita dal rasaerba. Questo comporta che sia necessaria una stima della portata in uscita dal tosaerba, che viene effettuata valutando il campo di velocità al bocchettone di uscita lungo una griglia di nove punti di misura, al

fine di ottenere una buona approssimazione della misura sia vicino alle quattro pareti che nella zona centrale. Tale operazione è eseguita utilizzando un anemometro a filo caldo ed eseguendo un certo numero di misurazioni si possono considerare le velocità minime e massime (**Tabella 1**), le quali sono appunto valutate in nove punti componenti la griglia opportunamente stabilita (**Figura 4**).

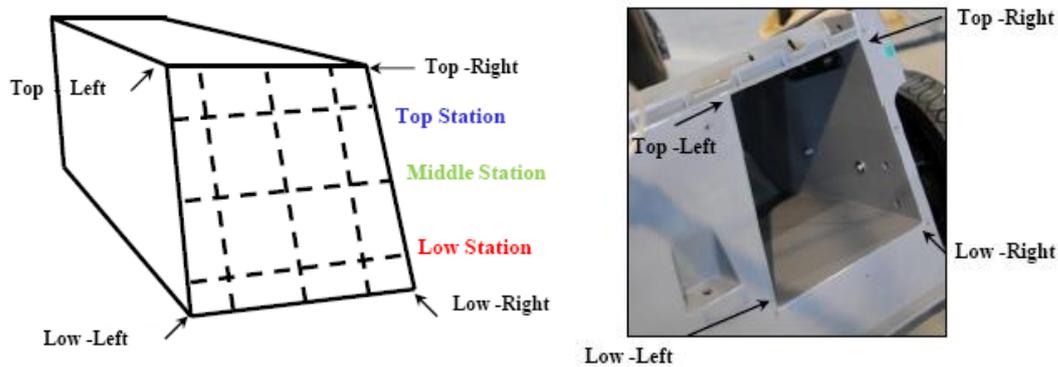


Figura 4. Schema della griglia di misura utilizzata per l'acquisizione della velocità attraverso l'anemometro a filo caldo (a sinistra) e relativa immagine dell'uscita del rasaerba (a destra)

La successione dei punti corrisponde ad uno spostamento della sonda scelta dal margine alto sinistro verso il bordo inferiore dell'uscita e una volta completata l'acquisizione delle tre velocità la sonda è spostata attraverso un braccio meccanico posto su rotaie per compiere la stessa operazione nella sezione centrale e al bordo destro dell'uscita.

	Velocità Massima [m/s]	Velocità Minima [m/s]
Punto 1	9,00	6,20
Punto 2	6,20	5,00
Punto 3	6,20	3,50
Punto 4	6,00	2,20
Punto 5	3,00	2,30
Punto 6	2,20	2,20
Punto 7	2,10	1,00
Punto 8	3,00	2,10
Punto 9	6,20	5,50
Valore Medio	4,3	3,9
Coefficiente di Sicurezza	1,14	0,87
Valore Medio Finale	4,9	3,4

Tabella 1. Valori della velocità del flusso in uscita dal rasaerba

Ora si calcola la media aritmetica di velocità sia di quella massima che di quella minima, le quali verranno opportunamente scalate attraverso un fattore di sicurezza, allo scopo di garantire la tenuta della struttura, ipotizzando di considerare anche le eventuali condizioni di funzionamento che non corrispondono a quella nominale. Il fattore di sicurezza deve avere modulo compreso nell'intervallo [0.8 – 1.2], in particolare si utilizza per la media delle velocità massime un coefficiente di sicurezza superiore ad 1, mentre per quella delle velocità minime uno inferiore ad 1 (**Tabella 1**), affinché il campo di velocità assumibile dal flusso generato attraverso la rotazione della lama sia ampliato rispetto a quello ipotizzato.

Note le velocità medie finali (**Tabella 1**) e la densità dell'aria si possono ricavare la portata minima e massima, sfruttandone la definizione, da cui è calcolabile la portata effettiva all'uscita dal rasaerba eseguendone la media.

La densità dell'aria viene calcolata, ipotizzando che quest'ultima si comporti come un gas ideale, attraverso la legge dei gas perfetti:

$$P \cdot v = R \cdot T$$

dove P è la pressione misurata, v è il volume specifico, nonché l'incognita, R è un parametro dipendente dal gas considerato, nel caso dell'aria vale $287.05 \text{ J}(kgK)^{-1}$, T è la temperatura rilevata (espressa nella scala Kelvin); infatti la densità è definita come la grandezza inversa del volume specifico.

Il valore finale calcolato corrisponde ad una portata di fluido di 0.184 kg/s , il quale rappresenta a livello qualitativo la quantità di aria che si trova all'uscita del tosaerba, da cui è permesso il dimensionamento degli elementi della galleria del vento, infatti ognuno di essi dovrà risultare avere il modulo della portata in ingresso e in uscita pari a quello appena calcolato, al fine di rispettare la legge di continuità lungo il test-rig:

$$Q = \rho \cdot V \cdot A = \text{costante}$$

dove Q è la portata, ρ è la densità, V è la velocità, A è la sezione di passaggio del flusso.

Questo valore di portata è l'input per il dimensionamento della voluta anulare, la quale dovrà presentare un diametro interno sufficiente ampio per ospitare le tipologie di lama da studiare (aziendali e concorrenziali) e per permetterne la rotazione (**Tabella 2**).

	Diametro [m]
Lame GGP	0,405
Lama concorrenziale	0,420
Voluta anulare	0,425

Tabella 2. Scelta del diametro della voluta anulare in base a quelli delle lame da studiare

La voluta anulare tuttavia non è un condotto cilindrico a base circolare libero al suo interno, in quanto è necessario disporre anche i sistemi di installazione della lama, inoltre per limitare l'ingombro viene inserita una parte del

motore del macchinario, di conseguenza saranno riservati determinati spazi per il contenimento di essi. Al fine di provvedere a tale situazione viene inserito un secondo cilindro a base circolare all'interno della voluta, che non consente il transito del fluido attraverso di essa, quindi l'area di passaggio effettiva risulta essere inferiore; in particolare è quantificata come la differenza tra l'area calcolata considerando il condotto privo di ostacoli al flusso e quella della sezione dell'elemento ostacolante, cioè della nicchia di accoglienza del motore (**Tabella 3**).

Caratteristiche Voluta Anulare	Valori
Diametro esterno [m]	0,425
Diametro interno [m]	0,260
Raggio esterno [m]	0,210
Raggio interno [m]	0,130
Area esterna [m ²]	0,140
Area interna [m ²]	0,050
Area totale [m ²]	0,090

Tabella 3. Area di passaggio del fluido della voluta anulare

In realtà tra la parte interna e quella esterna sono presenti dei 'braccetti' di forma ellittica di collegamento, nei quali vengono alloggiati i cavi di alimentazione del motore, quindi per le sezioni della voluta anulare coinvolte l'area nominale sarebbe ulteriormente inferiore rispetto a quella calcolata. Date, tuttavia, la natura qualitativa di questo calcolo e la possibilità di dimensionare con accuratezza i braccetti per limitarne l'impatto frontale, si può dichiarare che l'ipotesi di trascurare l'influenza di questi oggetti sul flusso prodotto dalla rotazione della lama non induce a considerevoli errori di calcolo.

Note l'area di passaggio del fluido, la densità e la portata di fluido si può determinare la velocità lungo la voluta anulare (**Tabella 4**), attraverso l'inversione della formula che definisce la portata massica, precedentemente introdotta.

SEZIONE	TRATTO	DIAMETRO [m]	AREA [m ²]	LUNGHEZZA [m]	VELOCITÀ [m/s]	CR
0	INGRESSO VOLUTA ANULARE	0,45-0,26	0,089		1,7	
1	USCITA VOLUTA ANULARE	0,45-0,26	0,089	0,100	1,7	
1	INGRESSO COPERCHIO CONVERGENTE	0,45-0,26	0,089		1,7	
2	USCITA COPERCHIO CONVERGENTE	0,168	0,022	0,450	6,8	4
1'	CONO CONVERGENTE	0,260		0,390	1,7	
2'	CONO CONVERGENTE	0,020	0,0003	0,390	6,8	
2	HONEYCOMB	0,168	0,022	0,100	6,8	
3	RETI	0,168	0,022	0,050	6,8	
4	CAMERA DI CALMA	0,168	0,022	0,050	6,8	
5	INGRESSO CONVERGENTE MISURA	0,168	0,022		6,8	
6	USCITA CONVERGENTE MISURA	0,075	0,004	0,168	33,87	5
6	INGRESSO DIVERGENTE MISURA	0,075	0,004			
7	USCITA DIVERGENTE MISURA	0,110	0,038	0,400	15,8	

Tabella 4. Dimensionamento e caratterizzazione degli elementi caratteristici del test-rig in base alla portata di fluido in uscita dal rasaerba

La velocità del flusso che ne risulta quindi permette di avere l'equivalente portata di aria che si genera all'interno del rasaerba, da cui dipende la velocità di rotazione della lama, nonché la potenza che il motore deve fornire alla lama stessa (che varia con una funzione cubica della velocità). Al fine di rispettare i parametri di semplicità costruttiva e affinità al tagliaerba il motore installato deve presentare le stesse caratteristiche di quello presente

all'interno del rasaerba di cui si è in precedenza stimata la portata in uscita, quindi il motore scelto è uguale a quello del macchinario da giardinaggio.

Il motore del test-rig viene allocato sia all'interno della voluta anulare che del successivo condotto convergente, dove è protetto dal flusso di aria generato dalla lama oltre che da una propria parete di rivestimento anche dalla presenza di un cono, i quali sono a sua volta inseriti all'interno di un coperchio di forma convergente, che definisce la geometria del test-rig. L'inserimento di tale cono ha solamente fine fluidodinamico, infatti non permette che il motore sia impattato e percorso da un buon flusso di aria, predisposto al raffreddamento di esso. Un eccessivo surriscaldamento di questa zona agisce alterando lo stato nominale del flusso, in particolare aumentandone la temperatura, che si riflette sui valori di densità e di pressione, quindi sulla velocità del flusso. Tali parametri sono direttamente collegati al valore della portata di fluido, sulla base del quale si dimensiona l'intera struttura, tuttavia il periodo temporale che si richiede per l'instaurarsi in maniera significativa di questo fenomeno è decisamente superiore al tempo di utilizzo del test-rig, che è di brevi istanti, di conseguenza non si necessita dell'installazione di sistemi di raffreddamento ausiliari.

I due coni convergenti sono posizionati tali da avere lo stesso asse di assial-simmetria, coincidente anche con quello dell'intero test-rig, e individuano un primo rapporto di contrazione, CR , definito come il rapporto tra l'area in ingresso e quella in uscita, che viene precedentemente fissato (**Tabella 4**). Il valore di questo parametro è dato come compromesso tra la lunghezza del condotto, per limitare l'ingombro totale del test-rig, ed una buona assializzazione del flusso, garantita appunto della presenza del cono interno, per cui il flusso tenderà a seguire le pareti dei due coni (**Figura 5**).

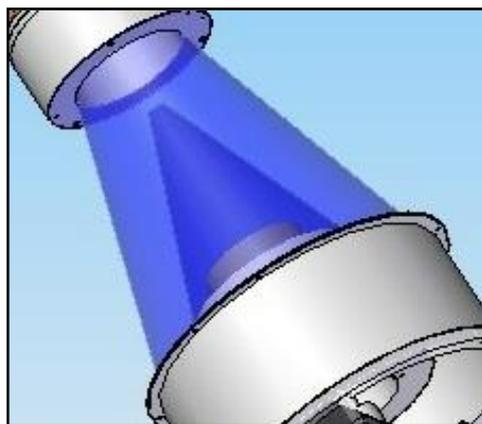


Figura 5. Zoom del condotto convergente

In particolare il flusso elaborato dalla lama viene aspirato dal suolo e convogliato verso l'alto; durante quest'operazione il fluido, che inizialmente è in quiete nella parte sottostante alla lama, inizia a muoversi a causa della depressione causata dalla rotazione della lama stessa. In uscita dalla lama si presenta un flusso complesso in quanto si tratta di un flusso turbolento, quindi le particelle di aria vengono 'scagliate' in diverse direzioni. Questo fenomeno sarebbe accentuato se fosse presente solo il coperchio convergente (**Figura 5**), che si comporterebbe come un ostacolo all'avanzamento del flusso, aumentandone i processi vorticosi, tuttavia lo stesso rasaerba possiede le pareti, necessarie sia per convogliare l'erba recisa verso il sacco di raccolta che per limitare la regione di taglio del prato. In realtà le pareti del rasaerba possono incarnare anche una funzione di *safety* nei confronti sia dell'individuo che sta utilizzando il tosaerba, come minima protezione dalla lama rotante, che della lama stessa, infatti realizzano una barriera all'ingresso di eventuali oggetti presenti all'esterno, i quali sono attirati dalla depressione interna e potrebbero seriamente danneggiare la lama.

Calcolata la sezione in uscita è possibile ricavare la velocità al termine del primo condotto convergente presente lungo il test-rig, utilizzando l'inversione della formula che definisce la portata. La complessità del flusso in uscita tuttavia è ancora notevole per cui ne è complicato il relativo studio, nonostante l'inserimento del cono interno, il quale non riesce a risaltare a sufficienza la forma del condotto, quindi anche se il flusso tende a seguire la

geometria del condotto creatosi, i processi vorticosi rimangono assai accentuati.

Tale situazione comporta la necessità di introdurre dei dispositivi atti al condizionamento del flusso, la cui combinazione è appropriata al fine di limitare le disomogeneità sia spaziali che temporali e l'angolarità acquisita dal flusso all'interno del test-rig. Il rasaerba, tuttavia non presenta alcun ostacolo posto direttamente sul percorso seguito dall'erba, quindi il flusso si trova completamente libero a muoversi, mentre lungo il macchinario si verificano delle perdite di carico causate dall'attraversamento della camera di ristagno. Questa è composta da honeycomb, reti e camera di calma, i quali sono tutti oggetti di forma cilindrica, per cui risulta che la velocità del fluido permane costante attraversandoli, infatti il flusso non risente di accelerazioni spontanee. Il valore della velocità in uscita dalla doppietta di coni convergente quindi corrisponde a quello all'ingresso del tubo di Venturi.

L'honeycomb, le reti e la camera di calma sono appunto elementi aventi lo stesso diametro, tuttavia a causa della propria funzione da svolgere variano in lunghezza, la quale è anch'essa fissata (**Tabella 4**), riferendosi alle norme progettuali vigenti per le tradizionali gallerie del vento.

Lungo il test-rig è pensabile il montaggio di reti, disposte in serie, allo scopo di rompere i vortici presenti per convertirli in strutture vorticose di minore dimensione e maggiore uniformità, cosicché il profilo di velocità in uscita è reso più omogeneo. In realtà il livello di turbolenza del flusso, una volta attraversata la rete, è superiore che in precedenza, tuttavia si tratta di un aumento locale ed è proprio questo il vantaggio di questo dispositivo, cioè la capacità della rete di trasferire gli accumuli di energia cinetica a sistemi vorticosi di minori scala.

La struttura della rete (**Figura 6**) determina l'impatto della stessa sui vortici insediati nel flusso, fissandone la dimensione, per cui è necessario che le tre reti installate differiscano tra di loro, in particolare giocando sui valori del diametro del filo e della larghezza della maglia (**Tabella 5**), in modo che siano distrutti progressivamente tutti i vortici di scala maggiore delle intercapedini create tra i fili dell'intreccio.

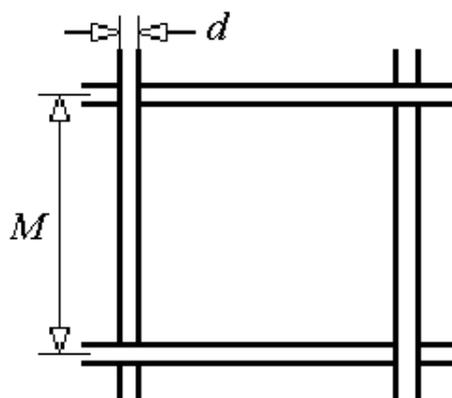


Figura 6. Parametri strutturali della rete (Lindgren, Johansson, *Relazione Tecnica, 'Design and Evaluation of a Low-Speed Wind Tunnel with Expanding Corners'*, dipartimento di meccanica, Stoccolma, 2002)

Al fine di rispettare la funzione prestabilita entrambi i parametri caratteristici sopraenunciati devono variare in maniera decrescente lungo il test-rig, da cui deriva anche la graduale riduzione della porosità (% di superficie aperta rispetto la superficie totale frontale).

Reti	1	2	3
Larghezza maglia M [mm]	3,2	2,4	0,7
Distanza minima dal successivo [mm]	10	10	10
Porosità β	0,605	0,588	0,595

Tabella 5. Caratteristiche di una rete generica installata in galleria del vento (Spalla, *Elaborato di tesi, 'Progetto aerodinamico di una galleria del vento subsonica'*)

Questa caratterizzazione è determinata dal fatto che i vortici uscenti dalla prima rete presentano una struttura di minore dimensione ed intensità, di conseguenza la seconda rete deve essere progettata per elaborare vortici di entità inferiore, quindi il filo deve avere minore diametro e la maglia deve essere di minore larghezza. In analogia a quanto detto viene progettata anche la terza rete.

Alla diminuzione di porosità della rete, tuttavia, corrisponde un aumento delle perdite di carico, causate dalla resistenza che il filo della maglia esercita al passaggio del flusso. Questo fenomeno lo possiamo analizzare in relazione ai profili di velocità del flusso prima e dopo l'attraversamento della rete (**Figura 7**).

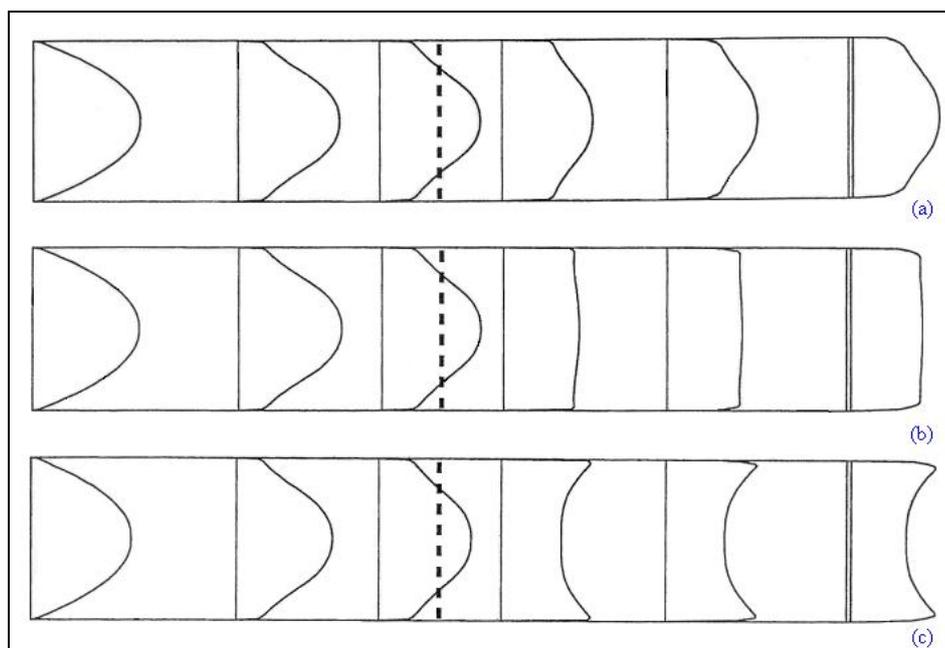


Figura 7. Sviluppo del profilo di velocità nel passaggio attraverso una rete al variare della porosità e del coefficiente di perdita della stessa. Nel caso a) abbiamo alta porosità $\beta = 0,75$ e basso coefficiente di perdita $K_l = 0,5$: questo tipo di rete è frequentemente impiegato in gallerie del vento, benché da solo non dia una riduzione sufficiente delle non-uniformità. Nel caso b) abbiamo invece $\beta = 0,53$ e $K_l = 2$: il profilo è quasi completamente omogeneo, ma le perdite sono alte e altrettanto le possibilità fenomeni di instabilità. Nel caso c) $\beta = 0,20$ e $K_l = 15$: le condizioni sono le peggiori con altissime perdite e la presenza di inversione del profilo di velocità (overshoot)

Si nota come per alte porosità, correlati a bassi coefficienti di perdita, nel profilo di velocità a valle della rete persiste ancora una spiccata forma a campana, tipica del moto all'interno di un condotto, cioè con velocità maggiori al centro e progressivamente decrescenti verso le pareti (a). In conseguenza ad una decisa diminuzione del modulo della porosità, con relativo aumento delle perdite (c), il flusso denota un comportamento molto

particolare, definito come *overshoot*. Quello che accade è che ad un aumento locale della velocità a monte, come nel centro della corrente fluida in arrivo, segue una riduzione della pressione statica localizzata in corrispondenza dietro la rete e quindi in quel punto si verifica una decelerazione del flusso; analogamente una minore velocità a monte produce un'accelerazione a valle. Il risultato è dunque un'inversione del profilo di velocità, in maniera tutt'altro che uniforme, i cui effetti, assolutamente indesiderabili, consistono nel conferimento di una maggior energia cinetica allo strato limite in parete (da cui deriva la denominazione *overshoot*), con il rischio di favorire i fenomeni di instabilità.

Da tali considerazioni deriva la definizione di una soglia critica al di sopra della quale mantenere la porosità: $\beta \geq 0,55$ [8], che viene ampiamente rispettata per le reti caratterizzanti il test-rig. Questo limite è soltanto una convenzione, non provenendo da calcoli su tensioni in strati limite, ma è stato rilevato sperimentalmente che per reti a maglia più fitta l'intensità della turbolenza intrinsecamente generata dalla rete è maggiore di quanta abbattuta e conseguentemente maggiore è la tendenza all'instabilità e alla separazione, con sviluppo di fenomeni di vorticità assiale. Allo scopo di conseguire livelli di turbolenza eccellenti in camera di prova, per le tradizionali del vento, mentre lungo il condotto convergente traforato dalle prese di misura, per il test-rig, si è quindi costretti ad utilizzare un insieme di reti collocate in serie, sul macchinario in questione si è deciso di installarne tre, come detto in precedenza. La necessità di introdurre una successione di reti però comporta il soddisfacimento di un ulteriore vincolo: un sufficiente distanziamento fra le varie reti impiegate. Tale condizione permette a ciascuna rete di operare in condizioni ideali, cioè senza risentire degli effetti di disturbo indotti da quella precedente (turbolenza intrinseca delle reti), quindi è data la possibilità al fluido, fra due griglie successive, di ristabilire un livello di pressione statica sufficientemente uniforme nella sezione trasversale, ossia con gradiente trasversale nullo. In condizioni normali, questa isotropia di turbolenza è recuperata dopo una distanza di circa 30 volte il diametro di maglia (M) o di 500 diametri di filo (d), ovviamente riferendoci alle grandezze della rete a monte (principio valido anche per

determinare la spaziatura presente tra l'honeycomb e la prima rete). Questo criterio di massima garantisce buoni risultati indipendentemente dalla forma della sezione del filo e dal tipo di intreccio (complanare, sovrapposto o attorcigliato). Nell'esempio riportato in precedenza (**Tabella 5**), tuttavia, la distanza fra gli elementi viene mantenuta costante al variare delle caratteristiche delle reti installate sulla galleria del vento, In particolare è stato scelto un passo di soli 10 *mm*, valore decisamente inferiore a quello nominale calcolato con il metodo esposto riferendosi al diametro della maglia (da cui risultano i seguenti valori: 96 *mm* per la prima, 72 *mm* per la seconda e 21 *mm* per la terza).

Inizialmente si scelse di installare sul test-rig due reti disposte in serie, tuttavia ne risultava un peggior condizionamento del flusso in uscita rispetto al caso di montaggio di un'unica rete, dovuto sicuramente alla vincoli di progettazione sopraesposti. La caratterizzazione della rete rimane generica in quanto, essendo il flusso in analisi altamente turbolento, l'aspetto principale è la riduzione del valore di turbolenza totale.

In precedenza alle reti è installato un unico honeycomb, cioè un oggetto che elimina le componenti di velocità del flusso normali alle pareti, si tratta quindi di un raddrizzatore del flusso lungo la direzione dell'asse del condotto, mentre non agisce in maniera efficace per l'abbattimento delle non-uniformità, a causa dell'alto valore della porosità. Allo svolgimento della propria funzione si potrebbe ipotizzare che una maggiore lunghezza ne migliori le proprietà, in realtà si tende a limitare lo sviluppo longitudinale di questo elemento privilegiando piuttosto il montaggio di un'ulteriore rete, da cui ne consegue un risparmio in termini di costi, spazio occupato e perdite di carico. La scelta di installare l'honeycomb in precedenza alla reti e di limitarne l'estensione longitudinale è dovuta alla generazione di una componente vorticoso dello stesso ordine di grandezza delle celle che lo formano, il cui decadimento è meno rapido rispetto a quanto accade lungo le reti. Tale effetto è proprio causato dalla lunghezza dei condotti, che genera un'azione stabilizzante, la cui intensità è maggiore all'aumentare della lunghezza stessa, di conseguenza per smorzare questo comportamento, quindi limitare la percentuale di turbolenza immessa all'interno del flusso, è

opportuno installare l'unica rete prevista lungo il test-rig, oppure nel caso di una tradizionale galleria del vento si tratta di una serie di reti, posteriormente all'honeycomb.

Tale dispositivo, in dettaglio, è composto da una serie di tubicini dal diametro di pochi millimetri e di lunghezza, in dettaglio del test-rig, di circa una decina di centimetri che ricoprono l'intera area delle sezioni dove sono posti, nonché le sezioni di passaggio del flusso. I canali dell'honeycomb sono disposti coassialmente al condotto principale (in genere dove le velocità sono le più basse possibili allo scopo di minimizzare le perdite di carico); il modo in cui sono ordinati da origine al nome, infatti vengono incollati l'uno all'altro per comporre piccole strutture di forma esagonale o quadrata, che rimandano propriamente al nido d'ape. Nel test-rig realizzato è stato installato, come detto in precedenza, un solo honeycomb, tuttavia se ne può prevedere anche un numero superiore, il quale è posizionato anteriormente all'imbocco della struttura adibita al rilevamento della pressione dell'aria.

Il dimensionamento di entrambi gli organi di condizionamento è effettuato trascurando la presenza della struttura reticolare (per la rete) e tubolare (per l'honeycomb), quindi non sono considerate né perdite di portata né variazioni di velocità lungo l'attraversamento di essi.

Un problema relativo ad entrambe le strutture sopracitate è la propensione al bloccaggio al loro interno di polveri o di altre impurità contenute nel flusso di aria, per cui dopo l'uso prolungato del macchinario questi necessitano di un processo di manutenzione e pulitura.

Questi dispositivi, reti e honeycomb, sono di norma installati singolarmente in una standard '*wind tunnel*' in cornici (*frames*) per aumentare la facilità di estrazione, che avviene mediante lo scorrimento di esse lungo appositi binari, al fine di ridurre il rischio di danneggiamento e agevolare le manovre di pulizia e di riparazione effettuate all'esterno; inoltre vengono montati anteriormente al condotto convergente, il quale convoglia il flusso direttamente in camera di prova. In transizione tra le strutture di trattamento del flusso e la parte dedicata al rilevamento del campo delle pressioni viene installata la camera di calma (in inglese *settling chamber*); in particolare si tratta di un oggetto cilindrico a sezione costante, privo di qualunque

impedimento che si ripercuota sul transito del flusso, all'interno della quale non avviene alcuna modifica né del campo delle velocità né di quello delle pressioni. L'obiettivo è quello proseguire l'operazione di omogeneizzazione del flusso prima dell'ingresso nel tubo di Venturi, mentre per una galleria del vento tradizionale consente al flusso il raggiungimento delle condizioni ottimali prima dell'ingresso all'interno della camera di prova. Il dimensionamento di tale dispositivo si concentra solo sulla lunghezza (**Tabella 4**), in quanto il diametro è già noto, la quale in genere è pari a circa 0,2 – 0,3 diametri del condotto (eventualmente si tratta di diametri equivalenti nel caso di sezioni non circolari). Nel caso in cui si optasse di realizzare un intervallo di stabilizzazione del flusso inferiore si rischierebbe di introdurre in camera di prova un flusso ancora significativamente irregolare, mentre se questo tratto dovesse essere sensibilmente più lungo, allora il problema sarebbe rappresentato da un eccessivo spessore dello strato limite alla parete. La camera di calma del test-rig è progettata in relazione alla norma sopraccitata ad un valore di circa le 0.3 volte il diametro del condotto, da cui risulta un'ampiezza di 0,05 m, che permette oltre ad una semplice realizzazione del pezzo di sfruttare al massimo la funzionalità di questo elemento che limita notevolmente l'ingombro, rispetto all'utilizzo di un sistema di honeycomb e reti.

Successivamente è presente il Venturi di misura, il cui dimensionamento è caratterizzato da maggiore criticità rispetto agli altri elementi costruttivi, in quanto la parte di convergente presenterà le prese d'aria per la misurazione del campo di pressione, invece la parte di divergente deve essere opportunamente messa a punto affinché non si manifesti il fenomeno di distacco dello strato limite dalla parete. L'eventuale separazione causerebbe una variazione di pressione indesiderata per cui a valle del punto di distacco non risulta più valida l'ipotesi di campo di moto potenziale, inoltre anche a monte, lungo il condotto convergente, sarebbe sentito il fenomeno, che modifica il flusso di aria al suo interno.

Il condotto convergente è dimensionato con una lunghezza tale da permettere l'inserimento delle prese necessarie per la misurazione della pressione locale, inoltre si sceglie un buon rapporto di contrazione CR (**Tabella 4**),

quindi il flusso in uscita è altamente accelerato, allo scopo di avere all'ingresso della parte divergente un flusso caratterizzato da un alto valore di quantità di moto, che è in grado di contrastare in maniera più decisa i gradienti di pressione avversi. In particolare l'aumento di velocità del flusso che si verifica comporta lo 'schiacciamento' dello strato limite sulle pareti, garantito dalla presenza di un gradiente negativo, nonché favorevole, dovuto al valore di pressione maggiore all'imbocco rispetto all'uscita del convergente, che non consente il distacco dello strato limite, quindi il flusso studiato non subisce alterazioni riguardanti il valore di pressione misurato, per cui anche il valore di portata calcolato sarà affetto dai soli errori dovuti alla non idealità del problema. Tale situazione motiva la scelta progettuale di installare le prese di misura lungo la regione convergente del condotto.

Per valutare la curva che caratterizza la variazione di pressione sono stati applicati 16 fori, a sezione circolare dal diametro di 2 *mm*, lungo il convergente, quindi ogni andamento è il risultato dell'interpolazione di 16 dati di pressione. Il passo tra le prese di misura vale 5 *mm*, il quale determina l'accuratezza del dato di portata valutato per una certa distanza della lama dal suolo, infatti ipotizzando il caso estremo di poter conoscere la pressione in tutte le sezioni del condotto sarebbe analogamente noto un valore maggiormente preciso di portata. In particolare per ognuna delle sezioni in cui sono presenti i fori di rilevamento, il valore di pressione è ricostruito grazie alla misura fornita da quattro prese d'aria equispaziate tra di loro, cioè disposti a 90° l'una dall'altra (**Figura 8**).

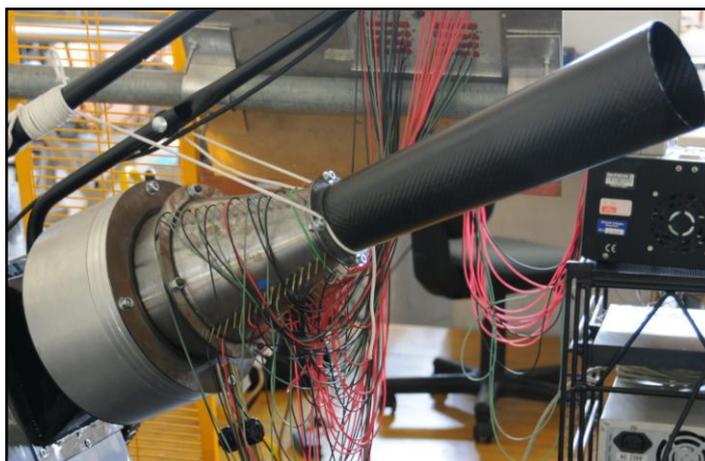


Figura 8. Honeycomb, reti e Venturi in cui sono presenti le 16x4 prese d'aria

La ridondanza imposta sul numero di punti di valutazione della grandezza di interesse ha lo scopo di mostrare che i profili di pressione riportati in funzione della lunghezza del condotto (**Figura 9**) presentano una certa uniformità tra di loro.

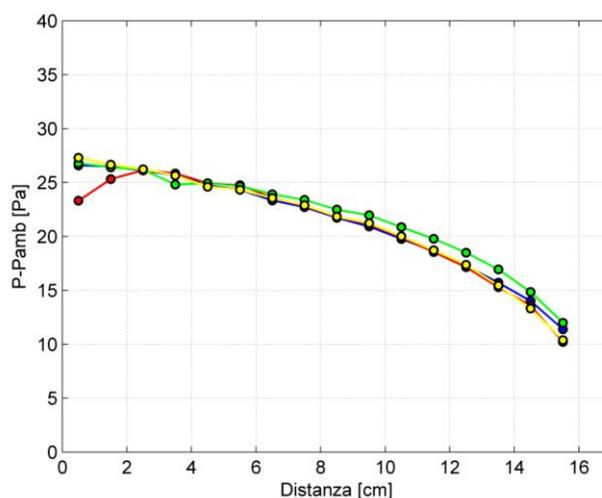


Figura 9. Profili di pressione al variare della fila di prese statiche lungo il condotto di misura, utilizzando la lama da malching assemblata al test-rig assiale ad altezza minima dal suolo

La pressione all'interno del condotto infatti deve seguire idealmente un certo andamento, dato dalla natura fisica del problema, cioè dall'attraversamento di un condotto di forma convergente-divergente da parte di un fluido. Questo

aspetto, ben visibile nell'immagine sovrastante dove le misure tendono a coincidere, è il risultato di una buona progettazione della parte convergente del tubo di Venturi, da cui consegue che non sono presenti punti del condotto in cui il flusso si comporta in modo contrastante rispetto al fenomeno in analisi. La bontà dell'andamento di pressione si rispecchia positivamente sul calcolo della portata, la quale si può effettuare andando a rilevare la grandezza di interesse solamente in due prese d'aria. A livello teorico le quattro curve ricavate, ognuna caratterizzante una linea di 16 prese, dovrebbero perfettamente sovrapporsi tra loro, tuttavia svolgendo uno studio di tipo sperimentale, benché i dati siano rilevati a brevi distanze temporali, sono sempre coinvolti dei disturbi esterni che alterano la misura e non permettono di ottenere una serie di andamenti coincidenti tra di loro. In conclusione è sempre presente una discrepanza tra la situazione ideale e quella sperimentale, ma in caso di malfunzionamento di una presa il risultato trovato rimane valido grazie ridondanza del sistema realizzato.

Nelle gallerie del vento tradizionali la presenza di un ugello convergente immediatamente a monte della camera di prova è necessario al fine di poter avere velocità alte nella *test section* ma basse in camera di ristagno. L'accelerazione conferita al flusso serve a diversi scopi: la riduzione delle non-uniformità (per produrre un profilo di velocità piatto all'ingresso della camera di prova), l'indebolimento dei relativi livelli di turbolenza e infine la diminuzione dei carichi dinamici e delle perdite lungo le reti e l'honeycomb (grazie all'abbassamento della pressione dinamica in camera di ristagno). Il principale parametro che permette di valutare l'entità di questi effetti è il rapporto di contrazione (CR), da cui dipendono direttamente le riduzioni della quantità di turbolenza fra ingresso (1) e uscita (2):

$$\frac{u'_2}{U_2} = \frac{u'_1}{CR^2 U_1} \quad \text{e} \quad \frac{v'_2}{U_2} = \frac{v'_1}{\sqrt{CR} U_1}$$

dove U è la velocità media assiale, u' , v' sono le componenti di fluttuazione di velocità attorno al valor medio, rispettivamente nella direzione assiale e in quella trasversale.

Una volta fissato il CR , due altri fattori assumono rilevanza: la forma e la lunghezza dell'ugello, da cui dipendono l'uniformità del profilo di velocità in uscita e lo sviluppo dello strato limite. I criteri su cui si basa la progettazione di un convergente sono quindi legati alla ricerca del massimo CR , compatibile con la corretta evoluzione dello strato limite evitando il rischio della separazione e i possibili eccessi di rumorosità, e alla determinazione della minima lunghezza possibile per limitarne i costi di costruzione ed evitare un eccessivo ispessimento dello strato limite in uscita. L'influenza della contrazione in realtà si spinge oltre al convergente, prolungandone quindi gli effetti nei tratti di test-rig adiacenti allo stesso. Il risultato è l'induzione di curvatura alle linee di corrente, da cui consegue che anche il profilo di velocità subisca una deviazione nei tratti limitrofi. Tale situazione suggerisce la definizione di una lunghezza totale fluidodinamica (L_t) entro la quale le distorsioni del profilo di velocità sono ancora rilevanti, tale che:

$$L_t = L + a_1 D_1 + a_2 D_2$$

dove D_1 e D_2 sono i diametri di ingresso e uscita e a_1 e a_2 coefficienti legati all'andamento della pressione nel tratto e mediamente valutabili nell'intorno di 0,2 - 0,3.

Stabilito il valore del rapporto di contrazione, si ipotizzi di apportare una riduzione della lunghezza L del convergente, da cui, applicando la formula sovrastante, inevitabilmente sono aumentati gli altri due termini definenti L_t . Ciò comporta che il risparmio apparente su quest'elemento sia in realtà tradotto nello spreco della funzionalità di buona parte della camere di prova e di quella di ristagno, quindi questa operazione risulta in definitiva assai controproducente. Un altro aspetto, legato alla riduzione della lunghezza del condotto, è l'incremento considerevole del rischio di separazione dello strato limite dalla parete.

In genere per gallerie di dimensioni non eccessive si ottengono buoni risultati dimensionando il convergente con coefficienti di contrazione

compresi fra 6 e 9 e con lunghezze all'incirca dello stesso ordine del diametro di ingresso.

Per la progettazione di questo elemento da installare lungo il test-rig si è scelta la lunghezza L pari al valore del diametro caratterizzante la sezione di ingresso del condotto stesso, mentre il rapporto di contrazione CR è stato fissato al valore 5. Questa decisione non conforme alle normative progettuali è legata alla risoluzione dello scanner di pressione utilizzato, infatti la generazione di un eccessivo gradiente di pressione non sarebbe letto dallo strumento posseduto dal Laboratorio di Aerodinamica, di conseguenza è stato necessario preferire un valore del rapporto di contrazione inferiore al minimo suggerito da normativa.

Il tubo di Venturi inoltre deve essere ben strutturato affinché nelle sezioni definenti la regione di incontro tra il condotto convergente e quello divergente siano minimizzati i punti di discontinuità, infatti la presenza di spigoli comporterebbe il repentino distacco dello strato limite dalla superficie.

Dimensionate la parte convergente e la gola del Venturi rimane da occuparsi del formato della parte divergente, in quanto all'interno di esso si genera un gradiente di pressione avverso, cioè di segno positivo, il quale è condizione necessaria affinché avvenga la separazione dello strato limite, di conseguenza non può essere 'costellato' dalle prese di misura, ma convoglia il flusso di aria direttamente nell'ambiente esterno.

Lo strato limite si può definire [5] come una regione di flusso di sottile spessore adiacente alla superficie entro la quale il flusso è rallentato a causa dell'influenza della forza di attrito tra la parete solida e il fluido stesso. Ipotizzando di considerare un fluido viscoso, gli effetti legati alla viscosità si manifestano appunto solo in questa area circoscritta in prossimità della parete; in particolare sulla superficie la velocità è nulla e la temperatura del fluido è pari a quella della parete stessa (*no-slip condition*). Lungo la superficie (direzione x) la velocità aumenta in modulo (direzione y), fino ad assumere il valore della velocità del flusso indisturbato (**Figura 10**).

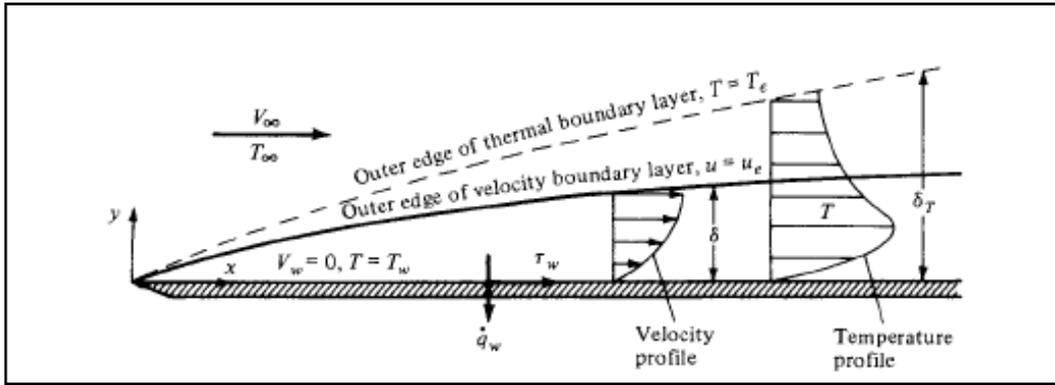


Figura 10. Proprietà dello strato limite lungo una superficie piatta (Anderson, *Fundamental of Aerodynamics*)

In particolare il fenomeno di decelerazione del flusso, caratteristico per condotti aventi questa forma, comporta un graduale ispessimento dello strato limite rispetto alle pareti e la vorticità viene trasportata verso l'esterno. Nel caso in cui il gradiente di pressione è sufficientemente intenso è presente il rischio di giungere al punto di separazione, per il quale la tangente al profilo di velocità è normale alla perpendicolare locale (**Figura 11**).

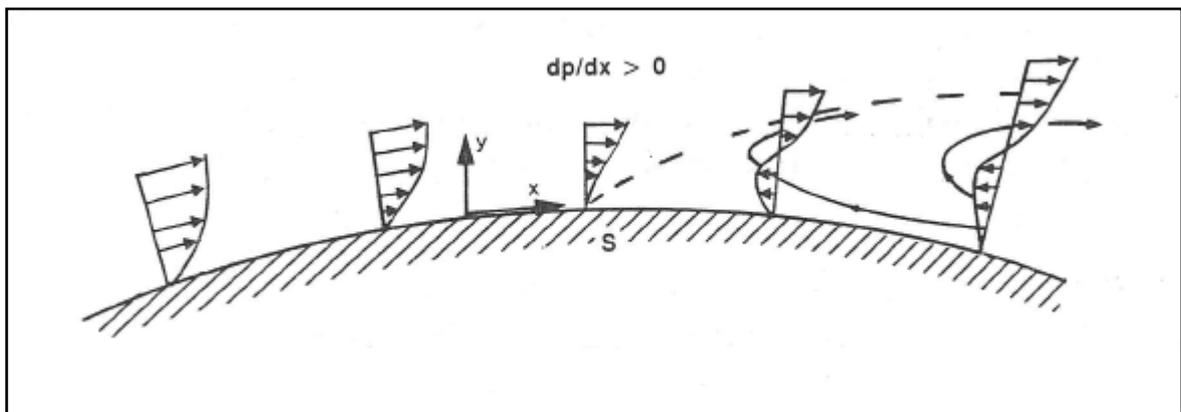


Figura 11. Andamento dello strato limite lungo una superficie con gradiente di pressione sufficientemente avverso per la separazione dalla parete [6]

Una volta avvenuto il distacco, si nota che i profili di velocità sono notevolmente modificati, per cui viene indotta una degenerazione

significativa del campo di moto studiato rispetto a quello nominale, cioè con strato limite attaccato alla parete.

In consapevolezza al fatto che lungo il divergente sussiste un gradiente di pressione che agevola il fenomeno della separazione, al fine di smorzarne gli effetti si può agire sulla tipologia di flusso e/o sulle caratteristiche geometriche del condotto.

Si valuti l'influenza del secondo parametro, consapevolmente al fatto che l'avversità del gradiente di pressione è dipendente sia dalla lunghezza (L) che dall'angolo di apertura (Φ) del condotto, quindi dei relativi diametri di ingresso ($D1$) e di uscita ($D2$) (**Figura 12**); in particolare all'aumentare del modulo di entrambi i parametri citati l'avversità del gradiente si intensifica. Il corretto dimensionamento del divergente è possibile grazie alla presenza di una relazione che individua lo specifico comportamento dello strato limite (**Figura 13**) al variare dei parametri caratteristici del condotto: le sezioni di ingresso $A1$ e di uscita $A2$, la lunghezza L e l'angolo di semiapertura Φ (espresso in gradi).

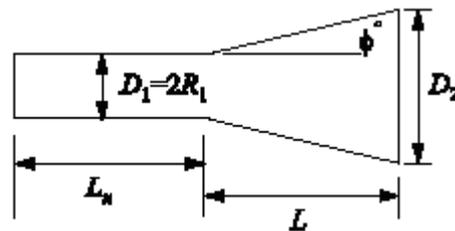


Figura 12. Parametri caratteristici di un condotto divergente

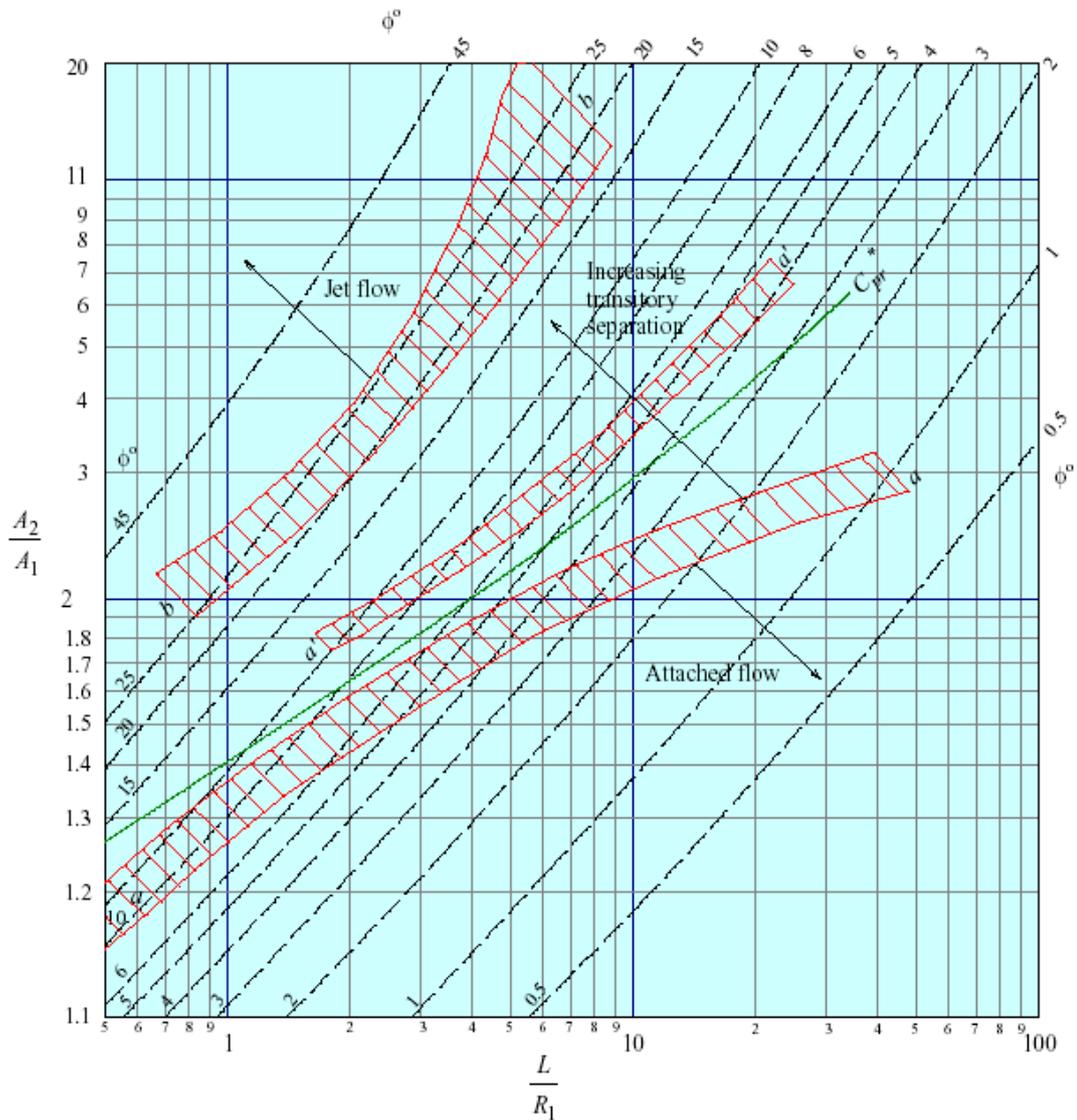


Figura 13. Limiti di definizione dei regimi di flusso in diffusori subsonici: nel caso di ingresso con strato limite sottile e in condizioni di sviluppo naturale, i confini tra i regimi tendono a giacere nella zona superiore delle bande tratteggiate. In caso di ingresso con strato limite pienamente sviluppato, i confini ricadono nella parte inferiore di dette bande (Spalla, Elaborato di tesi, 'Progetto aerodinamico di una galleria del vento subsonica', capitolo 5)

Il valore della sezione di ingresso del divergente è noto in quanto corrisponde a quello di uscita del convergente, mentre si impostano il modulo della sezione di uscita, per cui il rapporto A_2/A_1 è pari a 2.14, e la lunghezza del condotto, al fine di ottenere in uscita un flusso a bassa velocità per ragioni di *safety* degli utilizzatori del macchinario. In fase di progettazione si ricerca sempre la soluzione che prevede il minore ingombro

possibile, per cui, la lunghezza del condotto è ragionevolmente impostata a 40 cm (**Tabella 4**), da cui risulta il valore di $L/R1$ di 10.64. Ora attraverso il grafico sovrastante è possibile identificare il punto che dimensiona l'angolo di semiapertura, che si ricava intersecando le rette immaginarie che corrispondono ai valori dei parametri $L/R1$ e $A2/A1$ caratteristici del test-rig. Il risultato propone un angolo di semiapertura ($\Phi = 2.49^\circ$) che si trova nella regione di grafico a cui corrisponde la determinazione di flusso attaccato alla parete, quindi tale progettazione non dà origine al fenomeno di separazione lungo il condotto.

Il fenomeno di distacco dello strato limite quindi implica ad una limitazione sia sul valore dell'angolo di divergenza del condotto, che in generale è di circa 2° o 3° , intervallo in cui cade il valore di riferimento conseguito, sia sulla lunghezza dello stesso.

Per quanto riguarda il primo parametro precedentemente introdotto, cioè quello che individua il tipo di flusso, quest'ultimo è suddivisibile in due tipologie: laminare, cioè le particelle del fluido si spostano lungo linee di corrente parallele tra loro lungo la direzione principale del moto, e turbolento, cioè sono presenti delle fluttuazioni aleatorie agenti in tutte le direzioni sul vettore velocità, quindi il flusso è di tipo tridimensionale e non stazionario.

La caratterizzazione del flusso è descritta dal numero di Reynolds (Re), definito [7] come:

$$Re = U \cdot D / \nu$$

dove U è la velocità media del fluido, D è il diametro del condotto e ν è il coefficiente di viscosità cinematica (per l'aria vale $1,4607 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

In particolare a strato limite turbolento è associata una maggiore resistenza alla separazione rispetto al modello laminare, in quanto le particelle che lo compongono possiedono una maggiore quantità di moto in vicinanza della parete. La diretta conseguenza è un maggior rimescolamento delle particelle, le quali hanno la capacità di estrarre energia dal flusso esterno in maniera più

efficiente, rispetto al caso laminare, per portarla all'interno dello strato limite.

Si calcola il valore del numero di Reynolds caratteristico per le sezioni di ingresso e di uscita del divergente installato sul test-rig, il quale risulta dell'ordine di 10^5 per entrambi i casi, quindi tale approssimazione rispecchia anche l'andamento lungo tutto il condotto; in particolare tale valore appartiene sempre all'intorno che definisce la transizione da laminare a turbolento ($Re \sim 10^5, 10^6$) [6].

La progettazione del tubo di Venturi svolta garantisce la non separazione del flusso dalla superficie del condotto, pure grazie al fatto di operare con flussi turbolenti, che aumenta la resistenza dello strato limite.

In galleria del vento per svincolarsi dal rischio di separazione vengono spesso installati dispositivi atti a mantenere lo strato limite turbolento e le particelle che lo compongono ben accelerate, sia di tipo passivo, i turbolatori (i quali generano vorticità assiale), che attivo, attraverso metodi di succhiaggio o di soffiaggio (i quali rivitalizzano lo strato limite); tuttavia il test-rig non ne necessita l'installazione grazie al buon livello di progettazione della struttura.

Il test-rig completo si sviluppa interamente lungo un'unica direzione, in verticale, che corrisponde all'asse di simmetria, occupando 132 cm, limitando invece l'ingombro di spazio in direzione orizzontale, solo circa 50 cm. Tale dimensionamento non rende necessario l'inserimento di angoli, i quali curverebbero il percorso del flusso lungo dispositivo, per ragioni di sicurezza al fine di evitare l'impatto del flusso in uscita direttamente sugli utilizzatori del test-rig. Il macchinario in questione, infine oltre alla capacità di simulare la stessa portata di aria elaborata dal tagliaerba, è in grado di assumerne le stesse cinque configurazioni di lavoro, grazie al sistema di montaggio di viti, le quali presentano diversa lunghezza, dado e controdado, avvitate opportunamente lungo il bordo inferiore

3. IL MISURATORE DI PORTATA

La grandezza di interesse è la portata di fluido che viene generata dalla depressione generata dalla rotazione della lama della rasaerba, la quale viene misurata indirettamente a partire dai valori di pressione rilevati dalle prese statiche applicate sul convergente. Al fine di ottenere il valore di portata di interesse è necessario studiare il flusso elaborato dalla lama e ipotizzare delle semplificazioni sulla tipologia di flusso, per cui è necessario analizzare il moto all'interno del tubo di Venturi. Successivamente si possono avere diversi approcci al problema, risolvendolo utilizzando il formulario conforme alle ipotesi stabilite oppure impostare un algoritmo ai minimi quadrati.

3.1 EQUAZIONI FONDAMENTALI DEL MOTO IN UN TUBO DI VENTURI

Il tubo di Venturi (**Figura 14**) consiste in un condotto in cui si susseguono un convergente e un divergente, in particolare si valuti la variazione delle grandezze caratteristiche di un flusso al suo interno.

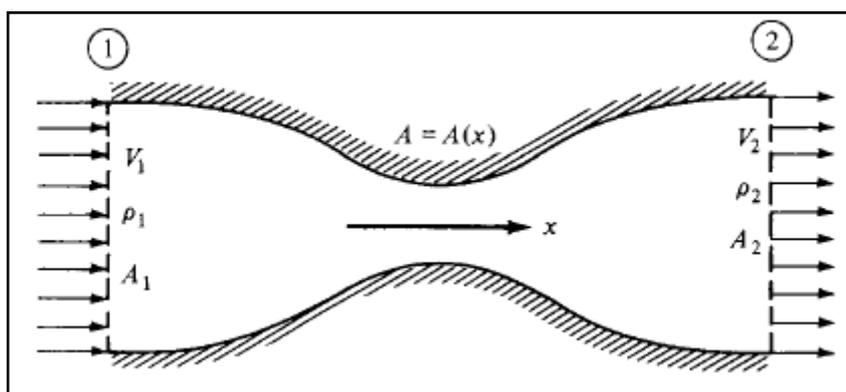


Figura 14. Schematizzazione del flusso quasi-unidimensionale in un condotto (Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Graw-Hill, Terza Edizione, chapter 3.3)

Il condotto in questione si modifica tridimensionalmente, tuttavia, date le caratteristiche geometriche si può assumere che la variazione della sezione lungo la direzione dell'asse dello stesso è contenuta, di conseguenza le proprietà del campo di moto rimangono uniformi lungo ogni sezione, mentre si alterano rispetto alla lunghezza. Ne risulta che lungo il condotto (direzione x , come è visibile dalla figura sovrastante) le variabili specifiche del campo di moto siano funzione della sola x , cioè $A=A(x)$, $V=V(x)$, $p=p(x)$, etc. Tale tipologia di flusso è chiamato *quasi-one-dimensional flow* ed oltre ad essere una buona approssimazione del flusso tridimensionale è applicabile come ipotesi dei calcoli da svolgere nell'applicazione aerodinamica relativa al tubo di Venturi installato al test-rig.

Si consideri il condotto e attraverso la risoluzione dell'equazione di continuità, in ipotesi di stazionarietà, scritta nella forma integrale [5] si ricava la legge di continuità nel caso quasi-unidimensionale:

$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2$$

date due sezione arbitrarie (1,2) caratterizzate da un valore di area A , velocità V e densità ρ del flusso. In realtà supponendo che il regime del moto sia di basso subsonico ($M < 0.3$) se ne può utilizzare una versione semplificata che prescinde dal valore della densità dell'aria lungo il test-rig. nel quale è appunto valida l'ipotesi di incomprimibilità del fluido, quindi non c'è variazione della grandezza densità, che risulta costante lungo l'intero test-rig ($\rho_1 = \rho_2$). Tali considerazioni conducono alla scrittura della relazione che descrive l'invarianza della portata volumetrica, la quale semplifica notevolmente i calcoli che dovranno essere svolti:

$$V \cdot A = \text{costante},$$

da cui si nota che alla riduzione dell'area di passaggio del flusso corrisponde un aumento di velocità e viceversa.

Nell' ipotesi di campo di moto potenziale si può applicare la legge di Bernoulli, semplificata [5]:

$$P_1 + 0.5 \cdot \rho_1 \cdot V_1^2 = P_2 + 0.5 \cdot \rho_2 \cdot V_2^2$$

dove date due generiche sezioni (1,2), P_1 , P_2 rappresentano le relative pressioni statiche.

Attraverso le due relazioni sopra richiamate si può definire il comportamento del fluido all'interno del tubo di Venturi (**Figura 15**); per cui in un condotto convergente la velocità aumenta mentre la pressione decresce, fino al valore minimo (*throat*), invece in un condotto divergente la pressione aumenta a discapito di una progressiva riduzione di velocità.

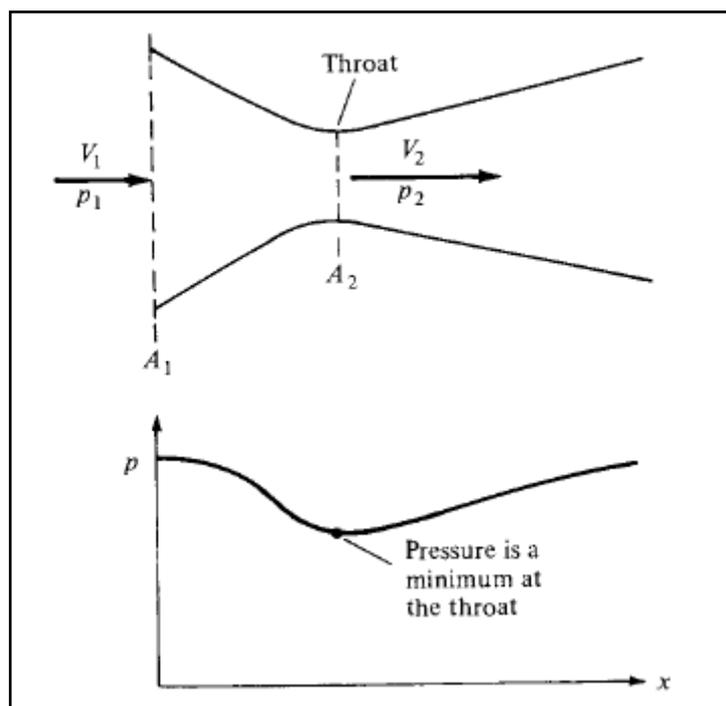


Figura 15. Flusso all'interno di un Venturi, caratteristica di pressione (Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Graw-Hill, Terza Edizione, chapter 3.3)

Il metodo di calcolo della velocità del flusso si basa sulla rilevazione di due misure di pressione in due sezioni differenti del condotto, di cui una è scelta come sezione di riferimento mentre l'altra è quella di interesse, alle quali si

applicano opportunamente le equazioni di continuità e di Bernoulli, sopra citate, in quanto tutti i parametri in gioco sono noti:

$$V_1 = \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho [(A_1/A_2)^2 - 1]}$$

3.2 METODI DI CONVERSIONE DEI DATI DI PRESSIONE IN UN DATO DI PORTATA DI FLUIDO

In fase di progettazione del test-rig i risultati sperimentali ottenuti al bocchettone di uscita del flusso in un rasoerba, espliciti al capitolo 2.2, mostrano che le condizioni di lavoro in cui può trovarsi il macchinario sono tutte ampiamente all'interno del regime di moto di basso subsonico. In particolare sono valide le ipotesi poste per lo studio del moto in un tubo di Venturi, capitolo 3.1, quindi per l'analisi del flusso elaborato da una lama di tosaerba si possono applicare le equazioni precedentemente ottenute.

Lo scopo è tracciare un andamento del campo della velocità del flusso lungo il condotto, da cui è possibile calcolare la portata in termini di massa di fluido, utilizzandone la definizione della stessa:

$$Q = \rho \cdot V \cdot A$$

Il valore di portata finale, tuttavia, per quanto detto, è implicitamente legato ad un valore di pressione del flusso, che viene rilevato attraverso una presa d'aria, la quale consiste banalmente in un foro (*pressure tap*). In particolare la regione di interesse del tubo di Venturi è quella convergente, sulle cui pareti è appunto realizzato un sistema di fori: sono identificate 16 sezioni di misura della pressione equidistanti tra di loro lungo il condotto, per ognuna delle quali sono applicati 4 fori disposti a 90° gradi l'uno dall'altro.

Il valore di pressione statica rilevato viene confrontato con quello di una presa di riferimento, collegata all'esterno, che valuta la pressione ambiente; per cui quando la lama non è in rotazione la differenza tra le pressioni

misurate deve coincidere al valore nullo. In realtà il gap presente tende semplicemente a zero a causa degli errori strumentali, altrimenti se questo non si verificasse sarebbe presente un malfunzionamento della presa, in quanto non è generato alcuno spostamento di aria che giustifichi un dislivello di pressione non nullo.

La lettura della pressione avviene collegando le prese d'aria ad uno scanner di pressione differenziale piezoelettrico multi-ingresso, il quale misura il valore di pressione come differenza rispetto ad un valore di riferimento, scelto come la pressione ambiente.

Questo strumento basa il proprio funzionamento sulle proprietà possedute da un cristallo piezoelettrico (**Figura 16**), il quale, quando gli si applica una pressione esterna (o eventualmente una decompressione), sulle facce opposte si posizionano cariche elettriche di segno opposto. Il cristallo, quindi, si comporta come se fosse un condensatore, al quale è stata applicata una differenza di potenziale e se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno, allora viene generata corrente elettrica, detta corrente piezoelettrica [9].

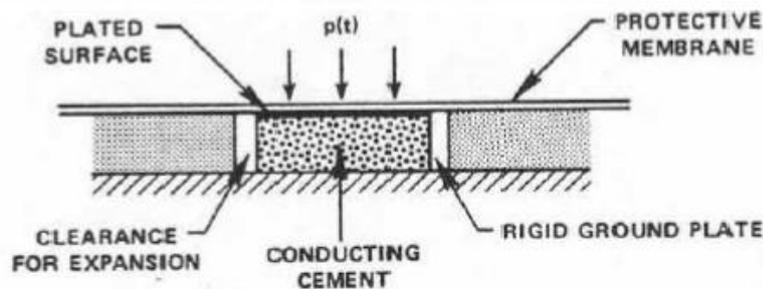


Figura 16. Schematizzazione di un trasduttore di pressione piezoelettrico [10]

In particolare lo scanner di pressione utilizzato è prodotto da Scanivalve© e si tratta del modello DSA 3017, il quale presenta 16 porte di input di pressione, mentre il trasduttore piezoelettrico installato internamente ha una risoluzione di $1 Pa$, il fondo scala pari a $2500 Pa$ e la frequenza massima di acquisizione pari a $500 Hz$.

In maniera automatica i dati di pressione determinati durante il periodo di campionamento, comprese le relative medie e i dati ambientali, cioè pressione, temperatura e densità dell'aria, rilevati per ogni lama da studiare e per ogni altezza della lama dal suolo disponibile, saranno annotati in diversi *data-sheet* (richiamati poi nei fogli di calcolo *Matlab* nei quali è riportato il procedimento per ricavare il valore della portata).

Il valore medio di pressione di una presa d'aria è calcolato come la media di tutte le pressioni valutate dalla presa stessa nei diversi istanti di campionamento, in quanto la variazione di pressione è dipendente dalla posizione rispetto al condotto e non dal tempo in cui si valuta. La struttura dell'apparato di misurazione del campo di pressione comporta che il *data-sheet* finale sarà composto da 4 colonne, che indicano le 4 prese d'aria caratterizzanti ogni sezione di misura e da 16 righe, che individuano le medie di pressione per ognuna delle 16 sezioni in cui è stato in precedenza tagliato idealmente il condotto, calcolate rispetto agli 800 valori relativi ai medesimi istanti di campionamento.

Il prossimo step è quello di ricondursi ad una curva, relativa ad ogni altezza di lavoro della lama dal suolo, che individui l'andamento della pressione nel condotto convergente; tale profilo dovrà essere affine a quello visualizzato in **Figura 9** per quanto illustrato precedentemente dalla teoria che è alla base del processo analizzato.

La misura di pressione da considerare per ogni sezione del condotto è la media tra le quattro misure medie valutate dalle quattro prese in quella data sezione; la ridondanza di misura è necessaria affinché gli eventuali errori sia di tipo strumentale che di non idealità del fluido siano ridotti.

Questo procedimento, essendo svolto per tutte le cinque distanze dal terreno in cui il rasaerba si posiziona, comporta l'ottenimento di 16 punti caratteristici di pressione per ogni altezza, tuttavia rimane il quesito di quale sia la maniera più adeguata per collegare questi dati tra di loro. Avvalendosi del fatto che la pressione lungo un condotto di forma convergente segua una precisa trasformazione fisica, si può definire quale sia a livello matematico l'andamento della pressione stessa; in particolare si sceglie una curva di *best-fit* dei punti rappresentata da un polinomio di 5° grado. Il calcolo dei

coefficienti dello stesso è eseguito da un calcolatore, inviando come input appunto il grado del polinomio, i punti di misura (cioè la coordinata della presa rispetto la lunghezza del condotto) ed i valori della pressione media calcolati. Questo procedimento, effettuato in maniera automatica minimizzando l'errore tra il valore di pressione calcolato e quello di output che appartiene al polinomio scelto, definisce una curva continua nello spazio che rappresenta le variazioni di pressione lungo la parte convergente del Venturi.

Noto il campo di pressione si può calcolare il campo di velocità, utilizzando la formula ricavata nel capitolo 3.1, funzione della differenza di pressione e del rapporto delle aree di due sezioni del condotto.. In realtà lo scopo delle prove sperimentali consiste nell'identificazione della portata elaborata dalla lama, la quale deve rimanere costante per tutta la lunghezza del convergente per rispettare l'equazione di continuità. Tale situazione può essere interessante analizzarla calcolando il valore della velocità alla sezione di gola, in funzione dei dati di pressione relativi ad ogni presa e al rapporto di sezioni tra quella di gola e quella generica:

$$V_g = \sqrt{2(P_1 - P_g) / \rho [1 - (A_g/A_1)^2]}$$

Si ricavano di conseguenza 15 valori della velocità in gola, da cui per ognuno di essi, si può ricavare la portata di fluido passante per ogni sezione, attraverso la seguente relazione, che corrisponde alla definizione della portata alla gola del tubo di Venturi:

$$Q = \rho \cdot V_g \cdot A_g$$

A livello teorico, ovviamente tutti i valori di velocità alla gola calcolati devono coincidere, di conseguenza anche la portata risultante deve rimanere costante lungo il condotto perché le due grandezze sono proporzionali tra di loro, quindi le interazioni presenti tra i valori della velocità coincidono a quelle agenti sulla portata. Ciononostante, a causa della non idealità del

fenomeno studiato, la legge di continuità non viene rispettata, infatti nella parte terminale del condotto si verifica un apparente incremento di portata (**Figura 17**).

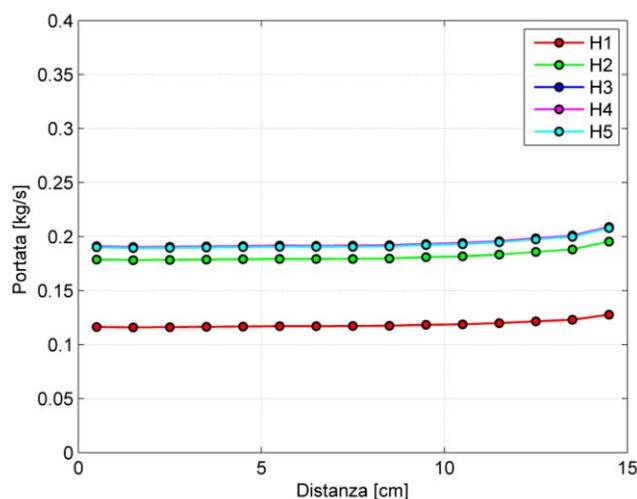


Figura 17. Andamento della portata lungo il condotto convergente al variare dell'altezza dal suolo, utilizzando la lama da malching installata al test-rig tangenziale solo convergente. Le curve riferite alle altezze H3 e H4 non sono ben visibili nell'immagine, in quanto tendono a sovrapporsi alla curva relativa ad H5

In particolare dal grafico sovrastante si nota che la portata è approssimabile ad un andamento strettamente costante alle sezioni di ingresso del condotto, in particolare si può ipotizzare la stabilità di questo fenomeno fino alla presa statica numero 7, da cui si determina il valore di questa grandezza maggiormente conforme a quello reale.

Al fine di ricondursi al valore di portata che rispecchia la fisica del fenomeno analizzato, senza ricorrere ad approssimazioni, si può anche agire sui valori di pressione sperimentali, consapevolmente al fatto che ciò che viene rilevato sono 16 valori di pressione, i quali, se si fosse in caso ideale, sarebbero interpolati perfettamente da un'unica curva. Nella realtà i dati di pressione si discostano dalla curva ideale (**Figura 9**), per cui si desidera trovare la funzione che meglio la approssimi, quindi si vuole ridurre l'errore causato dai disturbi di misura agenti sul campo di pressione, attraverso la

minimizzazione dello scostamento tra il valore di pressione ricavato sperimentalmente e quello ideale.

Tale meccanismo è oggetto del metodo dei minimi quadrati, il quale dato in input un vettore di misure, a cui è associato un certo disturbo, calcola una stima dell'incognita la più conforme possibile al proprio valore nominale.

Il problema espresso in maniera generica è dato da:

$$y = A x + v$$

dove y è il vettore colonna delle misure di dimensione $[m \times 1]$, A è la matrice che relaziona la misura alle incognite $[m \times n]$, x è il vettore colonna delle incognite $[n \times 1]$, v è il vettore colonna dei disturbi che influiscono su y $[m \times 1]$.

In relazione allo studio effettuato attraverso il test-rig il vettore dei termini noti $[15 \times 1]$ corrisponde alle differenze dei valori di pressione tra una sezione generica ed una di riferimento, la matrice $[15 \times 1]$ contiene la relazione tra pressione e velocità (derivante dall'equazione di Bernoulli) nelle diverse sezioni, mentre l'incognita $[1 \times 1]$ è il singoletto che rappresenta il valore della velocità del flusso alla sezione di riferimento.

Il calcolo della velocità stimata, x' , avviene attraverso il calcolo della matrice pseudo-inversa di A , definita come $(A^T \cdot A)^{-1}$, attraverso la seguente relazione:

$$x' = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot y .$$

La stima del valore della velocità sarà utilizzata per ricavare la portata nominale nella sezione di riferimento scelta; moltiplicandolo per l'area della sezione corrispondente e la densità del fluido. Ora nota la portata in una sezione generica, attraverso la legge di continuità, si conosce la portata lungo tutto il condotto.

Per testare la validità del metodo appena esposto, qui applicato per il calcolo della portata elaborata da una lama di un rasaerba, si consideri una condizione iniziale di idealità, cioè le grandezze fisiche lungo il condotto

rispettano perfettamente le leggi di Bernoulli e di continuità, a cui viene volutamente inserito un errore relativo ai dati di pressione (**Figura 18**).

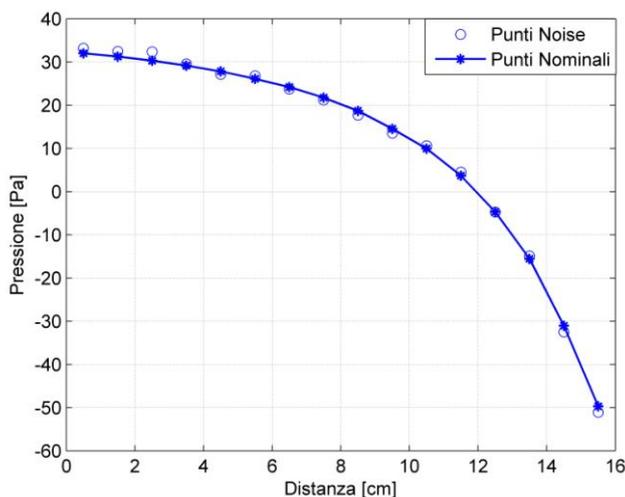


Figura 18. Andamento della pressione nominale e con introduzione di rumore lungo il condotto convergente

Il rumore introdotto è il risultato di una funzione casuale (*random*), affinché ad ogni valore di pressione siano associati errori distinti, sia in modulo che in segno, allo scopo di simulare, in modo più verosimile possibile, l'andamento delle pressioni ottenuto sperimentalmente. A questo punto si applica il metodo dei minimi quadrati allo scopo di verificare che la variazione del valore di portata da quello nominale sia di pochi punti percentuali.

L'errore percentuale di portata è definito come:

$$errore \% = (|Q_n - Q| / Q) \cdot 100$$

dove le barrette verticali indicano il calcolo il valore assoluto della differenza di portata, Q_n è la portata affetta da 'rumore' mentre Q è la portata nominale.

L'errore percentualmente misurato (**Figura 19**), effettuando diverse prove, oscilla tra valori che rimangono ampiamente inferiori all'1%, per cui questo risultato, rispettando le ipotesi sul *range* di errore, conferma la robustezza e

la validità del metodo esposto per il calcolo della portata di un flusso all'interno di un condotto di forma convergente.

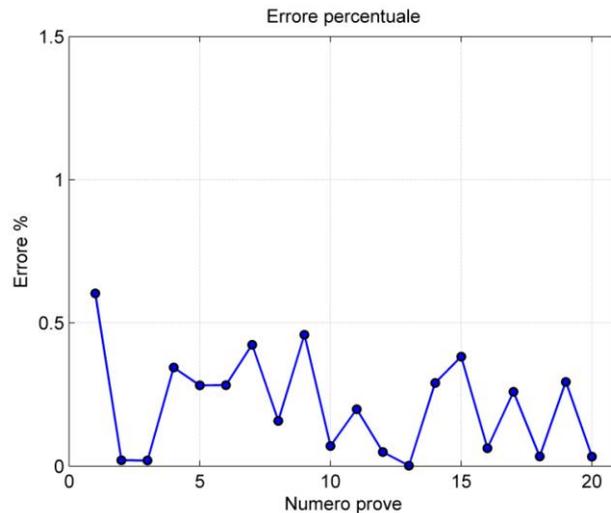


Figura 19. Errore percentuale acquisito con il metodo dei minimi quadrati

Un altro metodo studiato sarebbe quello di ricavare la portata dopo avere introdotto da tastiera una certa tipologia di funzione, i cui coefficienti vengono opportunamente quantificati dal calcolatore al fine di minimizzare il gap incidente sui dati sperimentali. Noto il nuovo profilo di pressione si calcola la portata in funzione della sezione di gola, utilizzando il procedimento esposto precedentemente, il quale coinvolge la determinazione della velocità del flusso gola del Venturi.

Visualizzando i risultati derivanti dall'applicazione dei tre metodi di calcolo esposti (**Figura 20**), si ottiene un grafico avente sull'asse delle ascisse le coordinate del condotto convergente in unità di misura dei *cm*, mentre sull'asse delle ordinate la portata di flusso in *kg/s*.

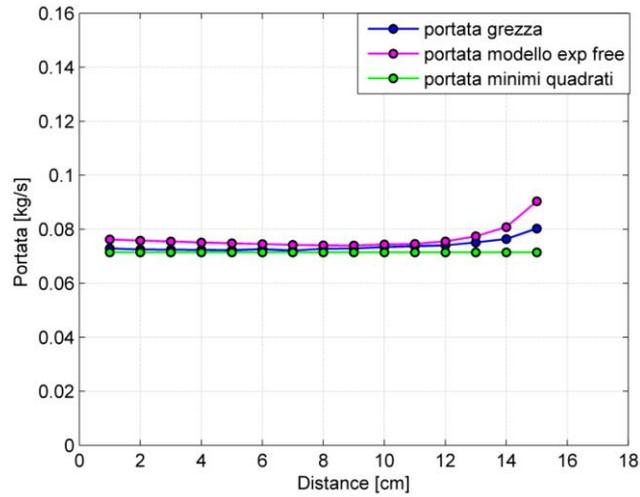


Figura 20. Confronto tra i valori portata risultanti applicando i diversi metodi di calcolo usati

Si nota che solo utilizzando direttamente il metodo dei minimi quadrati, proprio per come è impostato il procedimento, non risulta alcun aumento di portata nella parte terminale del condotto.

4. CARATTERIZZAZIONE DEL TEST-RIG LAME

La caratterizzazione del test-rig lame consiste in un procedimento di valutazione dei risultati ottenuti studiando una generica lama, da cui l'utilizzatore è in grado di scegliere quale sia il condizionamento del flusso da compiere affinché lo strumento sia adeguato a campionare la performance di una serie di lame parametrizzate.

4.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Le prove sperimentali effettuate si concentrano sull'analisi dell'andamento del campo di pressione e sul calcolo della deviazione standard, ipotizzando di operare ad una condizione di lavoro univoca per tutti i quattro modelli di test-rig lame. Questi si differenziano in base al condizionamento che agisce sul flusso, a seconda del montaggio o meno di reti e di honeycomb, per cui si considerano i casi con installazione del solo convergente di misura, di reti e convergente, di honeycomb e convergente e infine di tutti e tre gli elementi (completo).

Il primo step consiste nell'analizzare i profili di pressione, rilevati per ognuno dei quattro modelli dalla strumentazione dichiarata al capitolo 3, in funzione della sezione di misura del convergente. In particolare i grafici sono costruiti tali da riportare lungo l'asse delle ascisse i 16 punti di misura del convergente, mentre sull'asse delle ordinate la differenza di pressione tra quella rilevata dalla statica di misura e quella ambiente, espressa nell'unità di misura dei Pascal. Ad ogni condizionamento del flusso è associato un certo diagramma di pressione, il quale raffigura le curve caratteristiche della grandezza al variare della linea di statiche di misurazione. Lungo il convergente, in particolare, sono disposte quattro linee di pressione equispaziate di 90° l'una dall'altra, come detto in precedenza (capitolo 2.2)

L'esperienza presenta due obiettivi principi, di cui il primo consiste nel ricavare che l'andamento della pressione sia decrescente lungo il condotto, esattamente come ci aspetta dalla fisica del fenomeno che dipende

propriamente dalla forma convergente del tubo di Venturi (capitolo 3.1), mentre il secondo consta nella verifica della simmetria delle curve al variare della linea di statiche di misura.

In seguito sono analizzati i profili di pressione dei quattro modelli di test-rig lame, in particolare si esamina per primo il condizionamento dato dal solo convergente di misura (**Figura 21**).

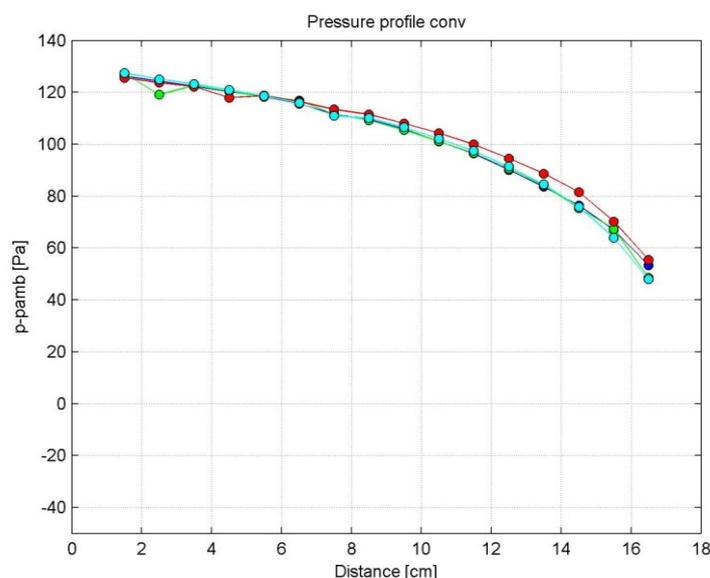


Figura 21 .Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dal convergente stesso

I profili rispecchiano la natura fisica del fenomeno, cioè il decadimento del valore di pressione a favore di un incremento del modulo della velocità del flusso; inoltre le quattro curve presentano una buona sovrapposizione nei punti di misura che si trovano in prossimità dell'imbocco del convergente, mentre nelle sezioni di mezzieria e in quelle terminali si nota un lieve discostamento.

Tali caratteristiche denotano che il flusso è rimasto attaccato alla parete del condotto per tutta la lunghezza di esso. La pressione massima è misurata alla sezione di ingresso ($P_1 = 127.5 \text{ Pa}$), mentre quella minima alla sezione di uscita ($P_2 = 53.0 \text{ Pa}$), da cui deriva una differenza di pressione (ΔP) pari a 74.5 Pascal .

In seconda analisi si consideri il condizionamento dato dalla successione di honeycomb e convergente di misura (**Figura 22**), di cui si nota immediatamente, rispetto al caso precedente, la traslazione della curva verso valori di pressione inferiori, a causa della presenza dell'honeycomb che instaura una certa perdita di carico.

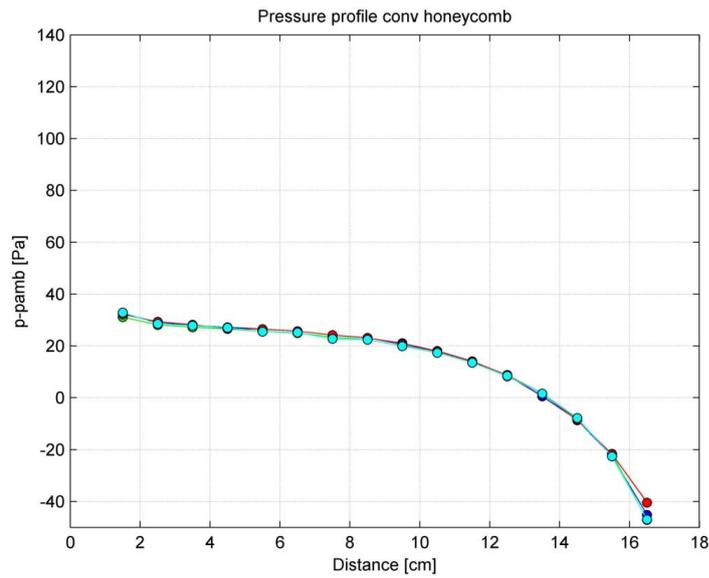


Figura 22 .Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello dell'honeycomb

I profili di pressione si presentano, rispetto al caso precedente, con una forma maggiormente affine a quella teorica tipica del moto in un condotto dalla geometria in esame, inoltre la presenza dell'honeycomb consente di ampliare la proprietà di simmetria delle linee di statiche per tutti i punti di misura. Il flusso in analisi quindi non denota discontinuità e permane attaccato alla superficie del condotto. La pressione massima è misurata alla sezione di ingresso ($P_1 = 33.9 Pa$), mentre quella minima alla sezione di uscita ($P_2 = -46.9 Pa$), da cui deriva una differenza di pressione (ΔP) pari a $79 Pascal$. Di conseguenza l'influenza dell'honeycomb ha sia aumentato il gradiente di pressione sentito dal flusso lungo il condotto che la riduzione di pressione di circa le tre volte rispetto al caso precedentemente osservato.

Si prenda ora in considerazione il condizionamento dato dalla successione di reti e convergente di misura (**Figura 23**), da cui è visibile l'estrema somiglianza al caso con montaggio del solo convergente rispetto a quello con l'honeycomb, da cui si può dedurre che le perdite di carico all'attraversamento di essi da parte del flusso sono di diverso ordine di grandezza.

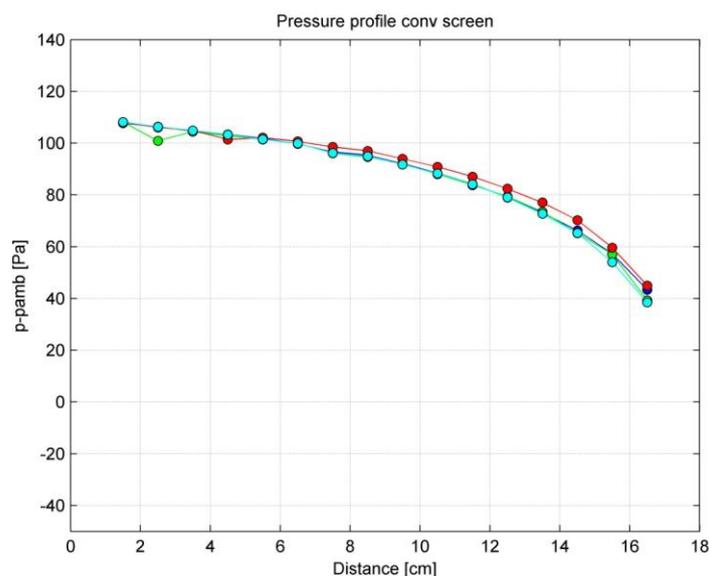


Figura 23. Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti

Tale aspetto rende valide le considerazioni espresse per il caso di condizionamento dato dal solo convergente del Venturi, per cui rispetto al caso precedente la forma dei profili è peggiorata e la proprietà di simmetria non è rispettata per tutta la lunghezza del condotto, ma solo per le prime sezioni. In particolare la pressione massima è misurata alla sezione di ingresso ($P_1 = 108.1 Pa$), mentre quella minima alla sezione di uscita ($P_2 = 44.9 Pa$), da cui deriva una differenza di pressione tra le sezioni terminali (ΔP) pari a $63.0 Pascal$. Questi valori di pressione, decisamente superiori al caso di condizionamento con honeycomb, dimostrano che l'intensità delle perdite di portata è molto inferiore; tale è spiegabile dalla differenza di porosità dei due elementi (capitolo 2.2).

L'ultima tipologia di condizionamento del flusso è data dall'interazione tra honeycomb e reti e successivamente il transito all'interno del convergente (**Figura 24**).

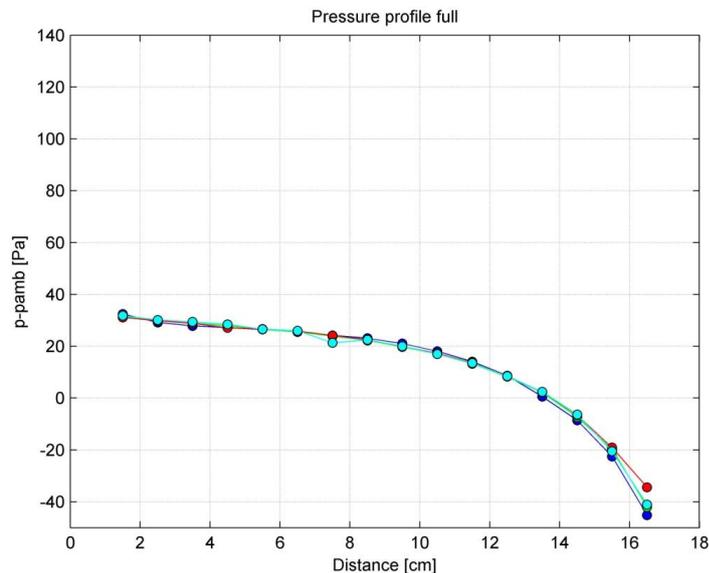


Figura 24 .Profili di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento completo fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti e dell'honeycomb

Le caratteristiche dei profili di pressione ricavati sono assimilabili a quelle presenti nel caso di utilizzo del test-rig con solo honeycomb e convergente; ciò è spiegato dal lieve contributo dato dalle reti alle perdite di portata, mostrato precedentemente. In dettaglio la massima pressione è rilevata all'ingresso ($P_1 = 31.2 Pa$), mentre quella minima all'uscita ($P_2 = -41.2 Pa$), da cui deriva una differenza di pressione (ΔP) dal valore di $72.0 Pascal$.

Attraverso l'analisi dei profili di pressione il miglior condizionamento sembra essere quello completo, in quanto gode della proprietà di simmetria lungo tutto il condotto e si rispecchia in maniera più fedele l'andamento teorico mostrato all'interno di un condotto di forma convergente.

Il prossimo step consiste nell'investigazione della rumorosità presente al variare del condizionamento del flusso; tale analisi è compiuta calcolando la deviazione standard, la quale stabilisce l'ampiezza dello scostamento dei dati di pressione rilevati rispetto al valor medio.

Questa grandezza statistica viene rilevata per le misure di ogni linea di statiche, da cui si ricava un grafico caratteristico per ogni tipologia di condizionamento, che presenta sull'asse delle ascisse i 16 punti di misura scelti sul convergente, mentre sull'asse delle ordinate è rappresentata la deviazione standard. In particolare tale grandezza definisce la bontà del macchinario, la quale è superiore quando i dati misurati sono concentrati in vicinanza della media, di conseguenza il modulo della deviazione standard è opportuno che tenda a zero.

L'analisi di questo parametro viene compiuta in successione dei casi di condizionamento, quindi si consideri per prima la deviazione standard per il modello che presenta l'installazione del solo convergente (**Figura 25**).

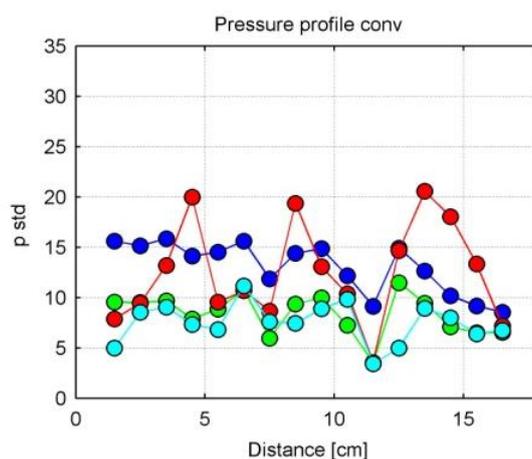


Figura 25 .Deviazione standard dei dati di pressione, al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dal convergente stesso

Si osserva come i valori di deviazione standard differiscano tra di loro al variare della linea di statiche, tuttavia per stimare l'entità della rumorosità dei dati è necessario effettuare un paragone con i risultati derivanti dall'utilizzo di un altro metodo di condizionamento, quindi si introduce quello che presenta anche l'honeycomb (**Figura 26**).

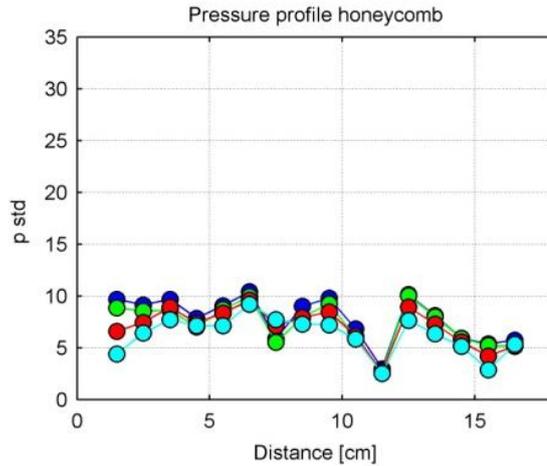


Figura 26. Deviazione standard dei dati di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello dell'honeycomb

Si nota come le linee di rumorosità tendano a sovrapporsi, quindi è presente maggiore uniformità dei dati, spiegata appunto dalla funzione di omogeneizzazione dei vettori di velocità eseguita dall'honeycomb. Dall'osservazione dei grafici sovrastanti si deduce che l'intensità della rumorosità media viene circa dimezzata attraverso la sola introduzione dell'honeycomb.

Nel caso di condizionamento dato dalla successione di reti e convergente (**Figura 27**) la fluttuazione dei dati rimane ampia, di conseguenza, in analogia a quanto ottenuto nell'analisi dei profili di pressione, il risultato conseguito è affine a quello con solo convergente. Si evidenzia comunque una lieve diminuzione di rumorosità per tutte le linee di misura.

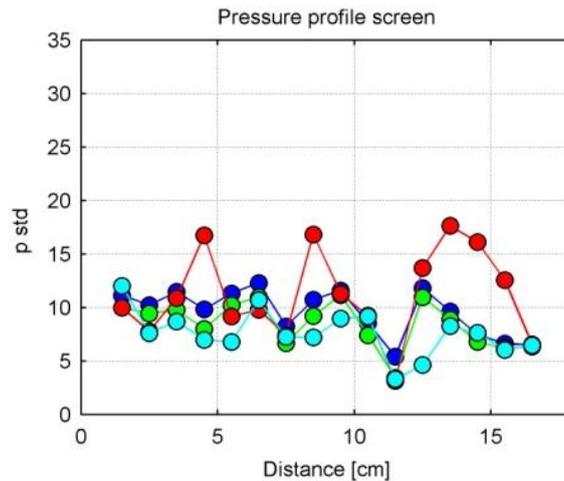


Figura 27. Deviazione standard dei dati di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento parziale fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti

Infine si analizza il caso completo (**Figura 28**), il quale presenta il minimo livello di rumorosità e le curve si trovano quasi a coincidere, grazie all'ulteriore effetto delle reti sulla già buona qualità del dato fornita dalla presenza dell'honeycomb.

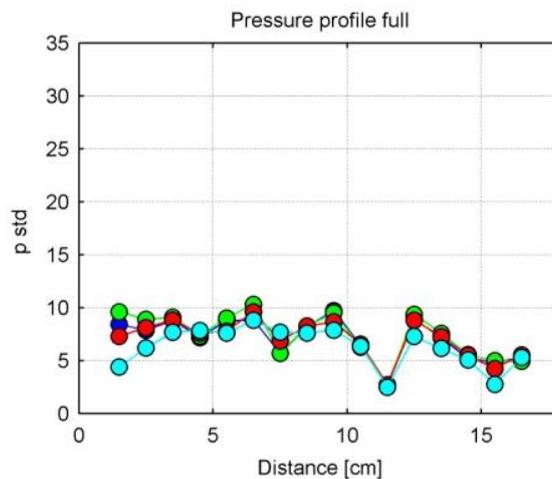


Figura 28. Deviazione standard dei dati di pressione al variare della linea di prese statiche lungo il condotto convergente in caso di condizionamento completo fornito dall'effetto del convergente combinato a quello delle reti e dell'honeycomb

In ognuno dei quattro grafici raffiguranti la deviazione standard si nota, ed è meglio valutabile nei due casi caratterizzati da bassa rumorosità, che il

valore di deviazione standard calcolato alla presa d'aria numero 11 non si allinea agli altri; in particolare non si tratta di un processo fisico intrinseco alla forma del convergente ma di un malfunzionamento della presa stessa, per cui il dato associato è trascurabile rispetto agli altri.

L'analisi di questa grandezza statistica conduce allo stesso risultato trovato in precedenza, per cui il condizionamento completo risulta essere il migliore, sia per la bontà dei profili di pressione ricavati che per la minimizzazione dei processi di fluttuazione dei dati attorno al loro valore medio.

In realtà la scelta del test-rig lame è giunta al modello di condizionamento con l'installazione del solo convergente, il quale per l'analisi compiuta presenta i peggiori risultati per entrambi i parametri caratterizzanti. La motivazione risiede nella capacità di aspirazione del test-rig, la quale si modifica al variare della tipologia di condizionamento che il flusso subisce.

In particolare si nota come il caso completo presenti due zone contraddistinte: una di aspirazione e una di espulsione (**Figura 29**). La zona di aspirazione è caratterizzata dall'avvolgimento dei tell-tales su se stessi, mentre quella di espulsione presenta i filetti diretti verso l'esterno del test-rig.

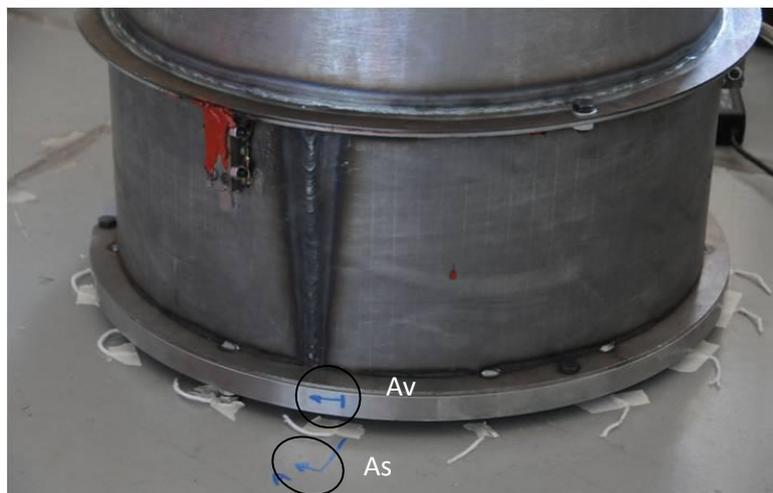


Figura 29 .Aspirazione del flusso in caso di test-rig lame completo, mostrato attraverso l'uso di tell-tale

Questa situazione potrebbe essere dipendente dalla disuniformità del suolo sottostante, di conseguenza si ruota il test-rig rispetto ad un punto di riferimento per determinare quale sia l'effetto del terreno (**Figura 30**).

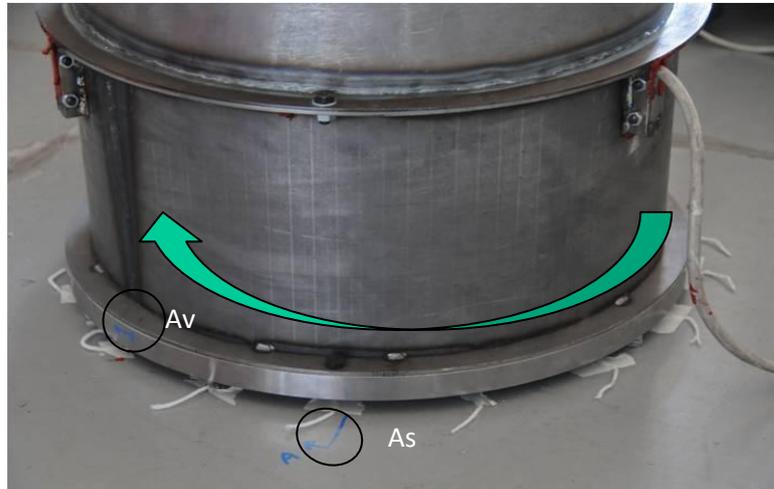


Figura 30. Aspirazione del flusso in caso di test-rig lame completo, mostrato attraverso l'uso di tell-tale, ruotato rispetto ad un punto di riferimento

Si nota come la rotazione del test-rig non abbia eliminato la presenza di una zona di espulsione di fluido, per cui il suolo sottostante risulta essere un'invariante del problema.

Tal situazione non si verifica in caso di test-rig parzialmente condizionato con solo il convergente, il quale lavora in tutte le regioni ad aspirazione e tale caratteristica sommata alla bontà dei profili di pressione lo rende preferibile rispetto al modello completo, benché sia aumentato il livello di rumorosità dei dati, per lo studio di una serie di lame parametrizzate.

4.2.PARALLELO MODELLI ASSIALE – TANGENZIALE: GIUSTIFICAZIONE DELLA SCELTA

La caratterizzazione è stata compiuta in dettaglio solo per il test-rig di tipo assiale in quanto il tipo tangenziale è stato ritenuto inadeguato, successivamente ad un'accurata analisi che mostra la differenza dei risultati di prestazione di due lame di cui è nota la performance.

Le due lame sono costruite dall'azienda *GGP* e si tratta di una lama da malching e una da taglio, in particolare l'azienda stessa ha fornito al Laboratorio di Aerodinamica l'informazione che la prima lama presenta una minore prestazione rispetto alla seconda.

Ora si confronti il risultato utilizzando i due modelli di test-rig (**Figura 31**), in particolare nella figura sottostante la lama da malching è rappresentata dalle curve di colore verde, mentre quella da taglio dalle curve di colore rosso.

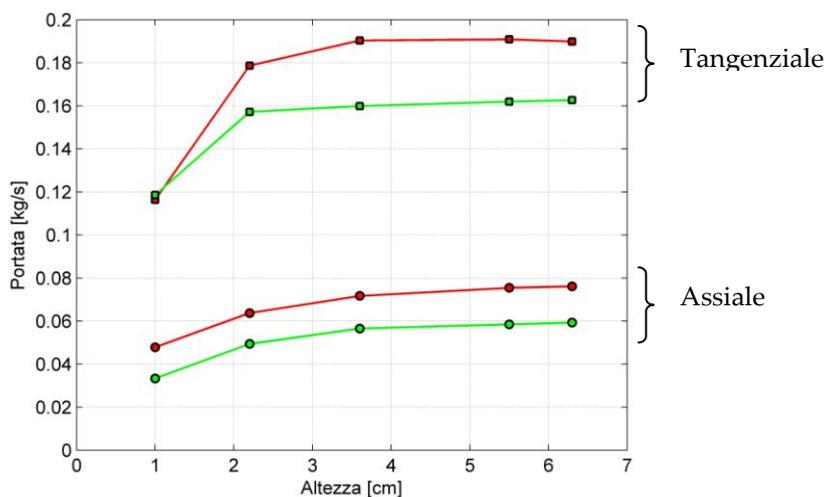


Figura 31. Andamento della portata elaborata dalle lame da malching e da taglio alle diverse altezze di lavoro del rasoerba dal suolo, utilizzando i test-rig assiale e tangenziale solo convergente

Dall'osservazione della figura sovrastante emerge come i due test-rig interpretino diversamente l'ordine di grandezza della portata, a causa della geometria dei condotti, inoltre si nota come il test-rig assiale esquadranzi le curve di portata in maniera circa costante al variare dell'altezza della lama dal suolo, di conseguenza la lama maggiormente prestante, cioè quella da taglio, rispecchia la propria caratteristica di performance. Al contrario le due curve ricavate dalla prova con test-rig tangenziale risultano ben equispaziate per le altezze *H2*, *H3*, *H4*, *H5*, anche se è modificata l'ampiezza, mentre ad altezza *H1* i due valori di portata tendono a coincidere ed in particolare non riflettono la reale distinzione di prestazione presente tra le due lame.

Il fatto che la prestazione della lama da taglio sia non sufficientemente valorizzata dal test-rig tangenziale dipende dal condizionamento che il flusso riceve all'interno della voluta del rasaerba, per cui per svincolarsi dalla geometria della struttura del tagliaerba risulta opportuno semplificare il problema. Si decide di proseguire nello studio delle prestazioni utilizzando una struttura (test-rig assiale lame) i cui dati sperimentali fissino l'esatta performance della lama. Il primo step quindi consiste nell'ottimizzazione della geometria della lama al fine di ottenere la migliore prestazione e successivamente, al secondo step, si può agire sulla struttura della voluta del rasaerba, ricercando la soluzione che perfezioni la prestazione dell'intero macchinario, in modo da costruire un prodotto finale decisamente competitivo sul mercato e preferibile dal consumatore rispetto alla concorrenza per le proprie qualità.

5. VERIFICA DELL'ACCURATEZZA DEI DATI ACQUISITI DAL TEST-RIG LAME ASSIALE

Prima di confrontare tra loro la serie di lame parametrizzate, di cui quella dalla migliore performance si manifesta di reale interesse economico per l'azienda, risulta necessario estendere la verifica della bontà dei risultati ottenuti con la tipologia di test-rig lama effettuando l'analisi del flusso generato da quattro lame di tagliaerba, di cui si conoscono le relative prestazioni. Di conseguenza di esse si conosce qualitativamente l'andamento di portata al variare dell'altezza della lama dal suolo, grazie a prove sperimentali effettuate dall'azienda produttrice, che consistono nella valutazione pratica della quantità di erba tagliata.

Si riporti la classificazione delle quattro lame (**Figura 32**), che per semplicità in seguito vengono richiamate in ordine numerico per valore di prestazione decrescente:

- lama 1: lama da taglio (caratterizzata dal massimo valore di portata rispetto alle altre);
- lama 2: lama da malching ;
- lama 3: lama da taglio caratterizzata da un angolo di calettamento inferiore rispetto alla lama 1, inoltre presenta una serie di fori, i quali sono stati opportunamente tappati durante la prova all'interno del test-rig ;
- lama 4: lama da taglio caratterizzata da un angolo di calettamento pari a quello della lama 3, i cui fori sono lasciati aperti durante l'acquisizione dei dati dal test-rig (caratterizzata appunto dal minimo valore di portata).

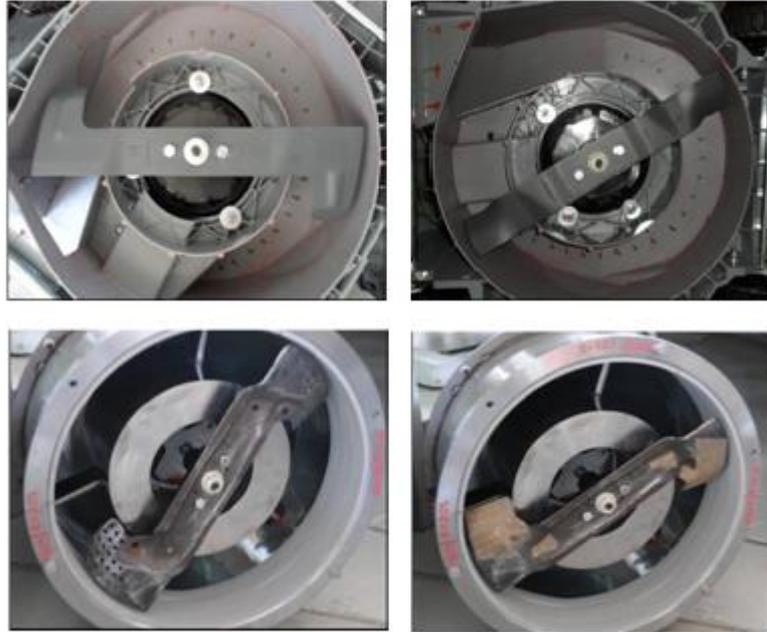


Figura 32. *Installazione sul test-rig lame della lama da taglio (in alto a sinistra), da malching (in alto a destra), da taglio con forature (in basso a sinistra), da taglio con forature tappate (in basso a destra)*

5.1 ANALISI LAME

L'analisi della prestazione delle quattro lame coinvolte per la verifica della bontà dei risultati ottenuti con il test-rig lame assiale si svolge attraverso una successione di step. Il primo di essi consiste nell'acquisizione dei dati sperimentali da cui, attraverso il metodo descritto al capitolo 3, si grafica la portata lungo il condotto convergente per tutte le lame in questione ad una certa altezza della lama stessa dal suolo. Successivamente la verifica comporta l'uguaglianza o meno delle prestazioni ottenute con il test-rig lame assiale con quelle valutate direttamente sul campo dall'azienda *Global Garden Products*.

5.1.1 ACQUISIZIONE DATI

L'acquisizione dei dati avviene per tutte le lame attraverso il test-rig lame, precedentemente scelto (capitolo 4), a parità di altezza dal suolo, infatti la

variazione di questo parametro modifica sensibilmente il valore della portata caratterizzante una certa lama, per cui il confronto non sarebbe più paritario. Una volta scelta la condizione di lavoro i dati vengono acquisiti lungo il condotto convergente dalle 16 prese di misura, ad ognuna delle quali è associato un certo valore di sezione del convergente (**Figura 33**).

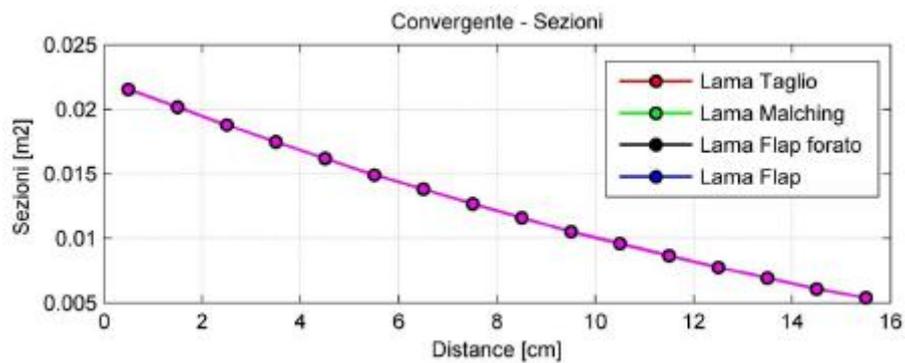


Figura 33. Andamento del valore di area del condotto convergente per le sezioni di misura impostata, con annessa la legenda delle quattro lame di interesse

In seguito al completamento della fase sperimentale, ognuna delle quattro lame esaminate è caratterizzata da un noto campo di pressione, da cui si possono ricavare l'andamento, attraverso il metodo esplicito al capitolo 3, sia della velocità che della portata, le quali sono proporzionali tra di loro lungo il condotto di misura, per cui si deduce di mostrare solo le curve rappresentative della grandezza di portata (**Figura 34**).

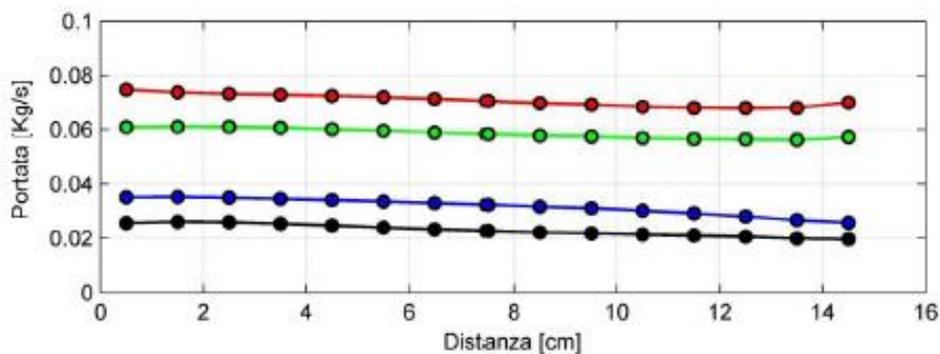


Figura 34. Curve di portata caratterizzanti ciascuna delle quattro lame di prova in funzione della posizione lungo il condotto convergente

Il grafico sovrastante è costruito tale che l'asse delle ascisse visualizzi le 16 prese statiche di misura, mentre l'asse delle ordinate esprima il valore di portata di fluido, misurata in kg/s . I punti ricavati dai test con le quattro lame sono successivamente congiunti per mostrare l'andamento della portata, il quale ci si aspetta rimanga costante lungo il condotto (la teoria del fenomeno esposta al capitolo 3).

Dall'immediata osservazione delle quattro curve rappresentate nel grafico (**Figura 34**) si notano principalmente due caratteristiche. La prima è che le curve sono bene distinte tra di loro, in particolare si distribuiscono in due coppie, dove le lame classificate come 1 e 2 sono a valori di portata di circa il doppio delle lame numero 3 e 4. La seconda è che la portata presenta valori variabili lungo il condotto, in dettaglio, è valutabile circa costante per le statiche fino alla settima, mentre oltre subisce un lieve degrado per le lame numero 3 e 4, o un piccolo accrescimento per le lame numero 1 e 2, per cui al fine di identificare ogni lama si può calcolare la portata media lungo il condotto (**Tabella 6**).

Numero di lama	Tipologia di lama	Portata Media [kg/s]
1	Taglio	0.0713
2	Malching	0.0589
3	Taglio con forature tappate	0.0329
4	Taglio con forature	0.0232

Tabella 6. Portata media lungo il convergente di misura per le quattro lame esaminate

Per semplificare la visualizzazione dei dati di portata media si può disegnare un grafico avente lungo l'asse delle ascisse i quattro modelli di lama, mentre sull'asse delle ordinate sono rappresentati i rispettivi valori di portata media (**Figura 35**).

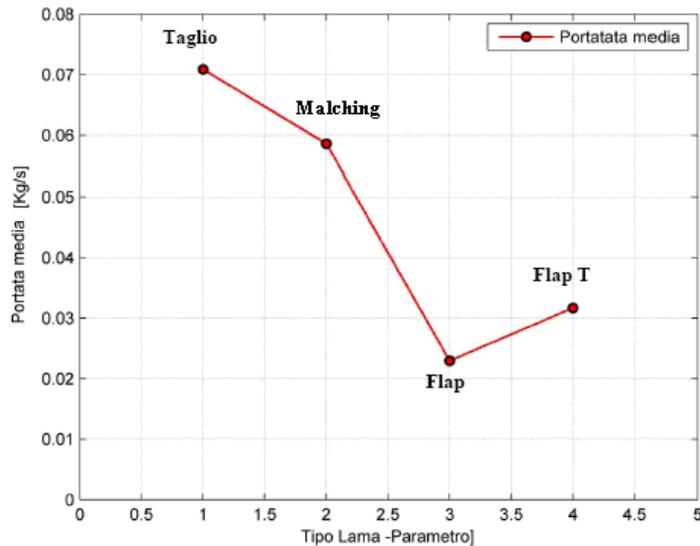


Figura 35. Valori di portata media lungo il condotto convergente, caratterizzanti le quattro lame in esame

5.1.2 ANALISI DEI DATI

Il fatto che le curve di prestazione delle quattro lame si dispongano in maniera circa uniforme nel grafico è giustificato dalla differenza a livello costruttivo che queste presentano, infatti al variare della struttura geometrica della lama si modifica il modo in cui essa interagisce con il fluido, per cui il flusso che si genera potrà essere più o meno conveniente per la determinazione di una buona performance.

Il parametro di calettamento del flap modifica decisamente la prestazione, infatti le lame aventi l'angolo di calettamento piccolo (lame numero 3 e 4) producono un flusso caratterizzato da una portata dal modulo circa dimezzato rispetto alle altre due lame. Questo parametro influisce in realtà anche sull'andamento della grandezza in esame lungo il condotto, infatti per le lame 3 e 4 ne comporta una progressiva riduzione nella parte terminale del condotto rispetto all'imbocco, mentre per le lame 1 e 2 si verifica nella stessa regione un lieve incremento.

La presenza di fori passanti sulla superficie della lama 4 non consente di generare una depressione di forte intensità, per cui anche la portata di flusso elaborata è decisamente inferiore rispetto alle altre lame. Si può notare come

l'occlusione dei fori della stessa (lama 3) comporti un immediato aumento del valore di portata, il quale si mantiene costante lungo tutto il condotto.

5.1.3 CONCLUSIONI

La prova sperimentale è stata eseguita al fine di verificare se i risultati ottenuti utilizzando il test-rig lame realizzato siano affini alla prestazione reale della lama esaminata.

Le quattro lame impiegate sono state studiate a livello qualitativo dall'azienda *Global Garden Products*, la quale ha fornito le informazioni sottoforma di una classificazione in termine di prestazione.

Attraverso l'analisi dei dati ottenuti dai test effettuati si evince che effettivamente la lama da taglio possiede migliore prestazione di quella da malching, le quali sono ulteriormente più performanti rispetto alle lame con angolo di calettamento dei flap inferiore. Inoltre è dimostrato che la foratura della lama comporta un aggiuntivo calo di performance. Questi risultati sono immediati osservando la **Figura 35**.

In conclusione la classifica che ordina le lame per ottimizzazione della performance della lama stessa risulta essere equivalente a quella ottenuta attraverso le prove compiute dall'azienda *GGP*, per cui il test-rig lama è uno strumento adeguato allo studio di lame che presentano piccole differenze geometriche, in quanto è in grado di esaltarne la differenza di prestazione.

5.2 ANEMOMETRO A FILO CALDO

La presenza di affinità tra i valori di portata calcolati sia dall'azienda *GGP* che attraverso il test-rig lame comunque non accerta che effettivamente una lama da taglio (lama 1) installata su un rasaerba produca un flusso caratterizzato da un valore di portata superiore rispetto ad una lama da malching (lama 2).

In risoluzione al problema di rispettare la realtà fisica del fenomeno studiato si necessita di trovare un metodo per calcolare l'effettivo modulo della

portata di fluido elaborato da entrambe le lame aziendali al bocchettone di uscita del rasaerba e successivamente confrontarli con le misure ricavate attraverso il test-rig lame. Tale operazione di valutazione della portata deve essere effettuata attraverso uno strumento in grado di operare correttamente all'interno di un flusso che presenta una certa quantità di turbolenza, in quanto questa è la caratterizzazione del flusso in questione. Questa situazione rende inadeguato l'utilizzo di un tubo di Pitot, la cui misurazione sarebbe inevitabilmente affetta da errori, anche se di piccola entità grazie al fatto che si conosce qualitativamente la direzione di provenienza del flusso, quindi sarebbe possibile posizionare la sonda semi-allineata ad essa. Lo strumento preferibile quindi è l'anemometro a filo caldo, infatti presenta anche minore intrusività rispetto al Pitot, utilizzato in modalità di funzionamento a corrente costante (*CTA*), quindi il valore della velocità del flusso è ricavato in funzione di una variazione di tensione ai capi del filo. La migliore affidabilità di questo dispositivo, per il caso in analisi, è spiegato da una risposta a maggiore frequenza rispetto al tubo di Pitot, dovuta al minore valore di inerzia elettrica rispetto al tempo necessario al raggiungimento di equilibrio tra le pressioni. In particolare l'anemometro a filo caldo è installato ad un braccio meccanico, movimento lungo rotaie, che percorre l'intera uscita del rasaerba, sia in direzione orizzontale che verticale e la velocità del flusso viene rilevata in punti appartenenti ad una griglia immaginaria prestabilita (**Figura 36**), al fine di avere a disposizione una quantità di dati sufficiente da descrivere l'intero campo di moto.

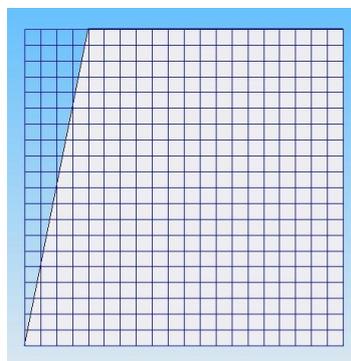
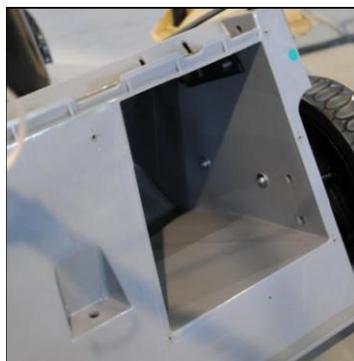


Figura 36. Griglia dei punti (a destra) di misura della velocità del flusso applicati al bocchettone di uscita del rasaerba (a sinistra), per la sperimentazione con l'anemometro a filo caldo

Una volta acquisiti i valori del vettore velocità per entrambe le lame, questi si possono rappresentare lungo l'uscita del rasaerba, da cui si ricava un grafico tridimensionale nel quale è visibile l'intensità del campo di moto. I grafici sottostanti (**Figura 37**) contengono nel piano orizzontale le coordinate della griglia di misura prestabilita, la quale si sovrappone al bocchettone di uscita del rasaerba, mentre lungo la verticale sono mostrati i valori di velocità del flusso, in unità di misura del m/s .

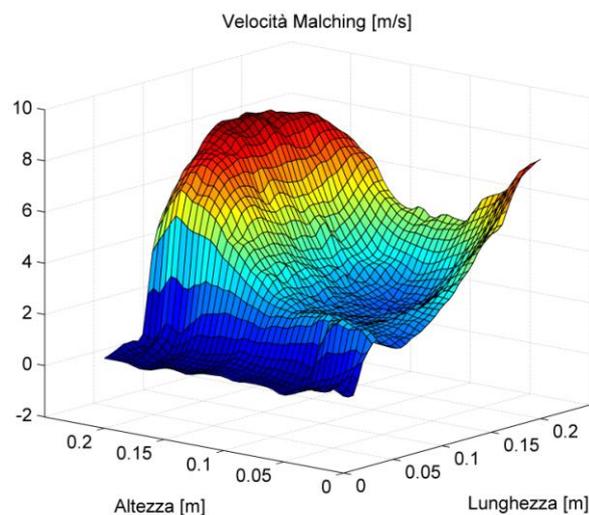
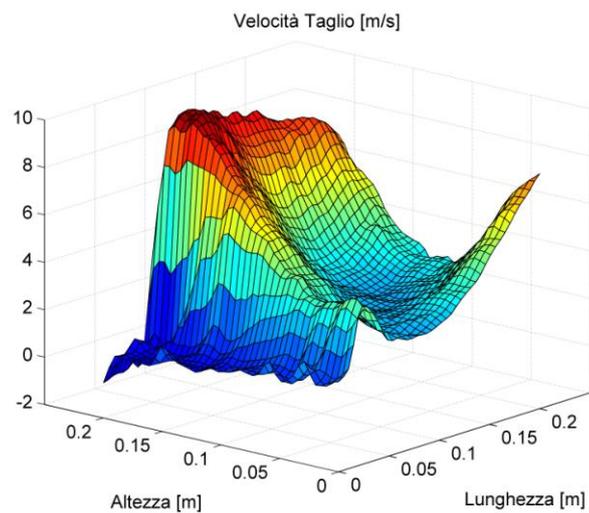


Figura 37. Profilo di velocità della lama da taglio (in alto) e da malching (in basso) rappresentato in funzione dell'uscita del rasaerba

La grandezza di interesse, cioè la portata, corrisponde all'area sottesa dalla superficie composta dai vettori velocità, tuttavia osservando semplicemente le due immagini sovrastanti non è comprensibile quale tra le due lame aziendali ne presenti il valore maggiore. Di conseguenza si effettua il calcolo della portata attraverso l'integrazione del campo delle velocità lungo l'uscita del rasaerba:

$$Q = \rho \iint_{x,y} V(x,y) \, dx dy$$

dove Q è la portata effettiva, ρ è la densità e $V(x,y)$ è il campo delle velocità lungo l'uscita.

I valori che si ricavano si possono confrontare a quelli precedentemente conseguiti utilizzando il test-rig lame (**Tabella 7**).

	<i>Hot Wire Anemometer</i>	Test-rig lame assiale
Portata Taglio [kg/s]	0,2292	0,0713
Portata Malching [kg/s]	0,2127	0,0589
Differenza %	7,20%	17,40%

Tabella 7. Valore di portata e differenza percentuale tra i valori calcolati con i diversi test-rig e l'anemometro a filo caldo per le lame da taglio e da malching

Analizzando i dati acquisiti riportati nella tabella sovrastante si nota come le portate di flusso valutate attraverso il test-rig lame abbiano modulo inferiore di oltre le tre volte rispetto a quelle ricavate con l'utilizzo dell'anemometro a filo caldo. Questo comportamento è giustificato dal condizionamento che il flusso subisce lungo il test-rig, di conseguenza le perdite di portata sono accentuate rispetto al caso di misurazione diretta della velocità delle particelle di fluido in uscita dal rasaerba, lungo il quale il fluido è lasciato libero di muoversi in ogni direzione senza elementi ostacolanti.

La verifica tuttavia consiste nell'accertarsi che la lama da taglio presenti un valore di portata superiore a quello della lama da malching; tale condizione effettivamente è assodata attraverso la prova con l'anemometro a filo caldo, quindi è dimostrato che il test-rig lame mostra la realtà fisica del fenomeno studiato. In particolare questo macchinario ha la capacità di risaltare la diversità di comportamento tra la lama da taglio e da malching, infatti è amplificata la differenza percentuale che tra le due lame dal valore effettivo in uscita dal rasaerba del 7.2% al 17.4%, per cui l'impiego del test-rig lame è ottimale quando le lame da studiare sono geometricamente molto simili.

6. STUDIO DELLA PRESTAZIONE DI LAME PARAMETRIZZATE

L'azienda *Global Garden Products* al fine di ottimizzare le performance dei propri prodotti ha richiesto uno studio sulla prestazione delle lame dei rasaerba, in particolare questa valutazione si svolge analizzando la portata di flusso elaborata dalla lama. La variazione di portata è strettamente legata alla forma geometrica della lama, di conseguenza modificando i parametri caratteristici si ha un riscontro sulla prestazione di essa. Lo scopo quindi è quello di valutare, per entrambe le tipologie di lama (da malching e da taglio), quale sia il parametro geometrico che influisce maggiormente, tale da ottimizzare le performance.

6.1 CLASSIFICAZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI

La serie di lame parametrizzate consiste in un totale di 16 lame, di cui 8 adibite al taglio o 8 da malching, che si differenziano dalle rispettive lame di riferimento, per un solo parametro geometrico (**Figure 38, 39**).

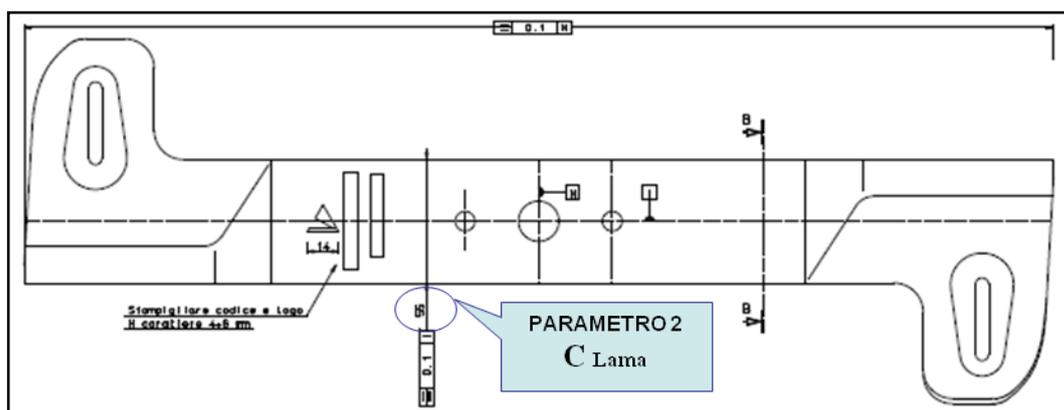


Figura 38. Parametri caratteristici di una lama da rasaerba

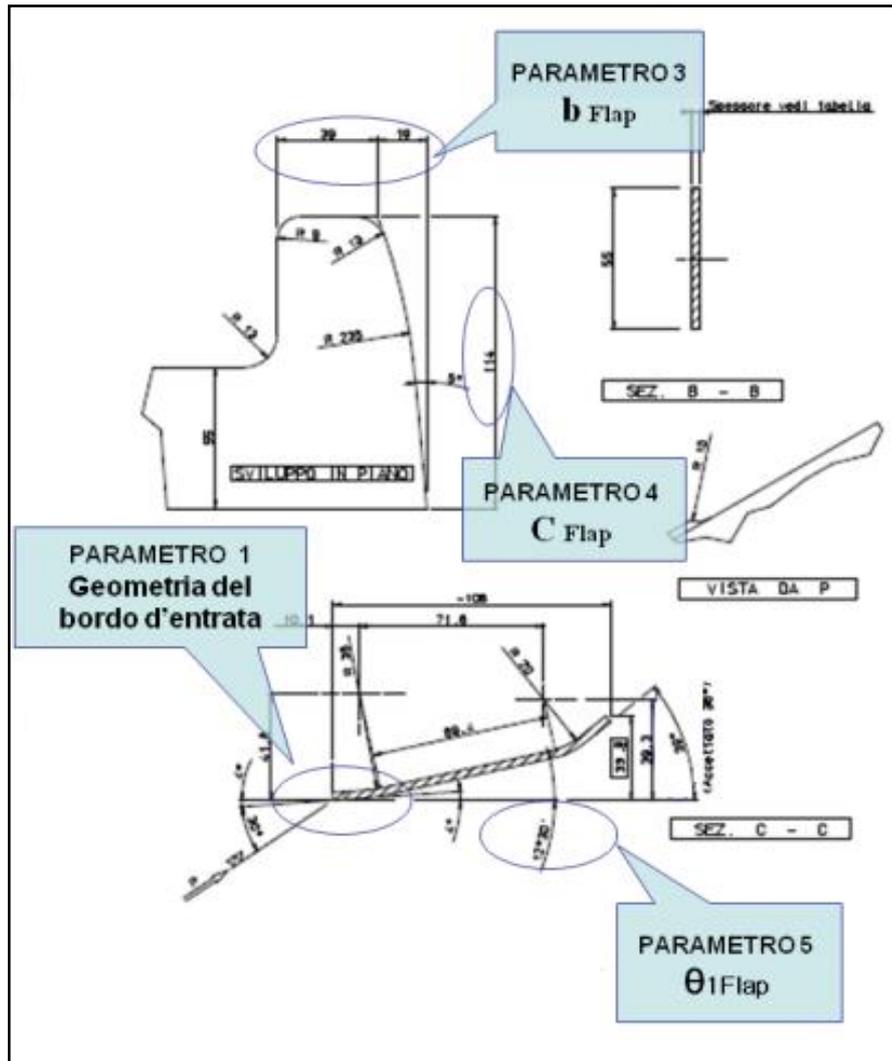


Figura 39. Parametri caratteristici del flap di una lama da rasaerba

Le caratteristiche di differenziazione dalla lama di riferimento sono la corda della lama, l'apertura del flap, la corda del flap e il calettamento del flap (**Figura 40**), per entrambe le tipologie di lama.

LAMA DI RIFERIMENTO			
Parametro 2 : Corda della lama	Lama N°1 45 mm	Valore di Riferimento 55 mm	Lama N°2 60,5 mm
Parametro 3 : Apertura del Flap	Lama N°3 30 mm	Valore di Riferimento 58mm	Lama N°4 69,6mm
Parametro 4 : Corda del Flap	Lama N°5 91,2 mm	Valore di Riferimento 114 mm	Lama N°6 136,8 mm
Parametro 5 : Calettamento del Flap	Lama N°7 2°- 6° -20°	Valore di Riferimento 4°- 12°- 40°	Lama N°8 6°-18 -60°

Figura 40. Caratterizzazione delle lame parametrizzate e di quella di riferimento

Si nota che le lame n°1 e n°2 sono parametrizzate rispetto alla corda della lama; le lame n°3 e n°4 rispetto all'apertura del flap, le lame n°5 e n°6 rispetto alla corda del flap, mentre le lame n°7 e n°8 rispetto al calettamento del flap.

6.2 ACQUISIZIONE E ANALISI DATI

Le lame parametrizzate analizzate sono tutte lame da taglio, le quali, in analogia a quanto fatto al capitolo 4, si studiano in riferimento alla portata contrassegnante la lama di riferimento alle altezze di lavoro del rasaerba, da cui la necessità di rappresentare sull'asse delle ascisse il parametro studiato e sull'asse delle ordinate la portata espressa in *kg/s*. L'entità di portata elaborata da una lama ne determina la prestazione dato che le prove sperimentali sono compiute attraverso il test-rig lame assiale.

Si osservi l'influenza della corda della lama sulla prestazione (**Figura 41**) e in termini percentuali rispetto alla lama di riferimento (**Figura 42**) ad altezza *H1*.

La lama analizzata, lama 1, presenta un calo di portata rispetto al valore di riferimento, quantificato del circa il 10%.

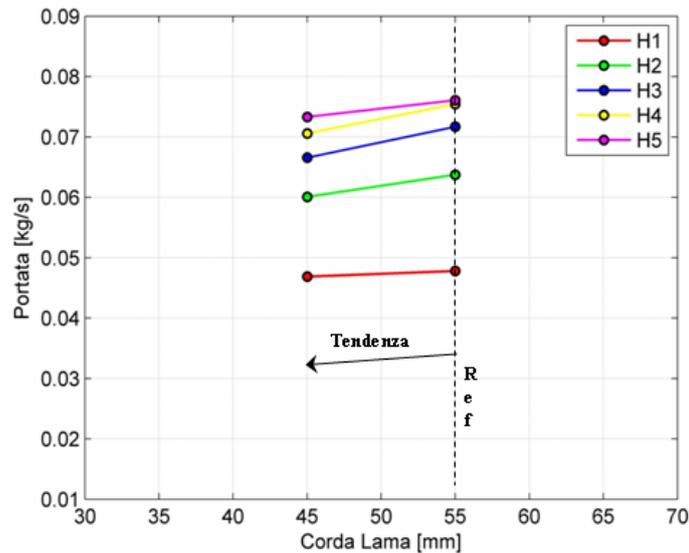


Figura 41. Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare della corda della lama

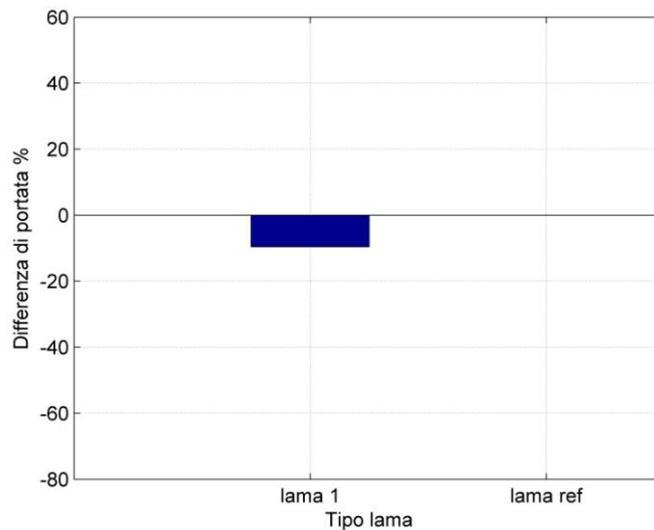


Figura 42. Differenza percentuale sul valore di portata al variare della corda della lama ad altezza H1

La corda della lama sembra essere un parametro il cui aumento causa un miglioramento di prestazione della stessa, grazie al fatto che cresce la quantità di aria che impatta la lama stessa ed aumenta il numero di Reynolds caratteristico; tuttavia l'andamento trovato è basato su un solo dato sperimentale oltre al valore nominale.

Osservando la variazione di rendimento della lama rispetto al parametro 3 (**Figura 43**), si nota che le linee congiungenti in maniera diretta i dati

sperimentali trovati mostrano un punto di massimo all'apertura del flap della lama di riferimento per tutte le altezze di lavoro.

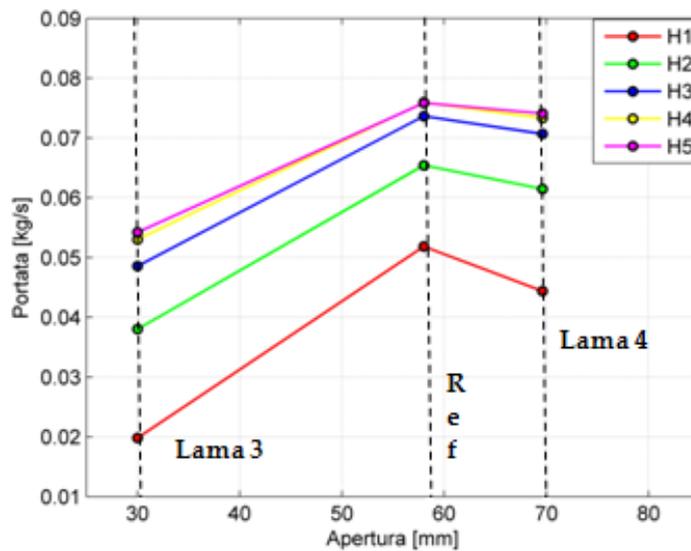


Figura 43 .Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare dell'apertura del flap della lama stessa

In particolare valutando la differenza percentuale delle due lame da quella di base (**Figura 44**) si nota un calo di portata di oltre il 60% per la lama 3, mentre un lieve riduzione stimata al 10% circa per la lama 4.

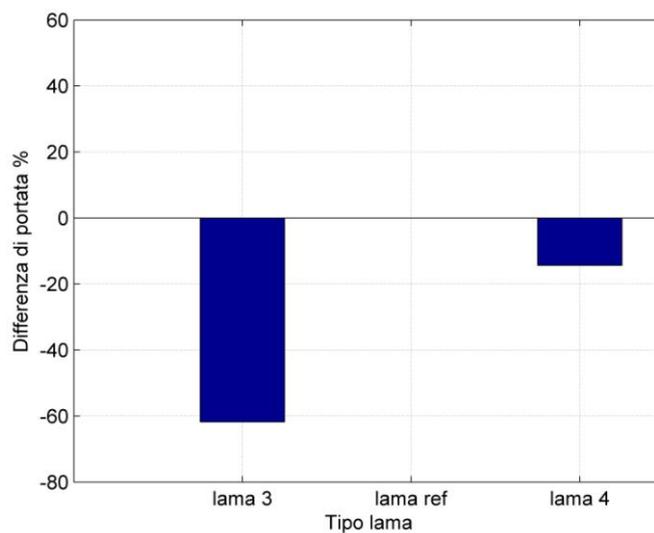


Figura 44. Differenza percentuale sul valore di portata al variare dell'apertura del flap della lama ad altezza H1

Si studi la variazione di performance in funzione del parametro 4 (**Figura 45**), da cui si nota che la portata cresce all'aumentare sia della distanza della lama stessa dal suolo che del valore della corda del flap.

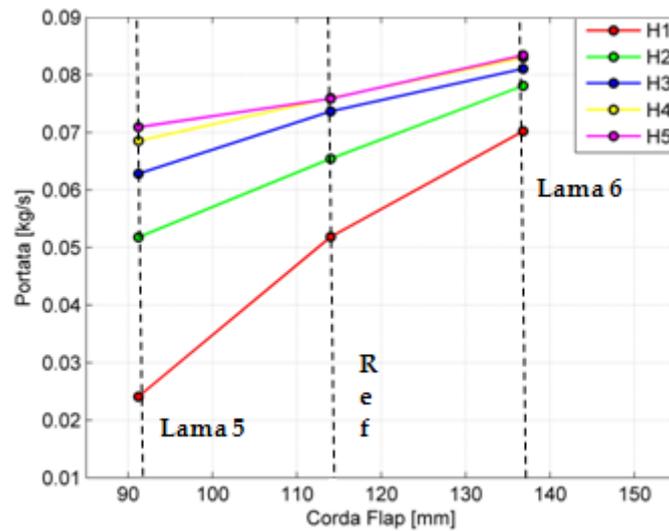


Figura 45. Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare della corda del flap della lama stessa

L'andamento di portata si nota essere descritto da spezzate mentre tende a seguire un andamento lineare per le altezze $H2$ e $H4$. Le inclinazioni delle semirette è circa la stessa per tutte le altezze, esclusa $H1$, per la quale si ha una maggiore pendenza e di cui si considera anche la discrepanza in termini percentuali (**Figura 46**).

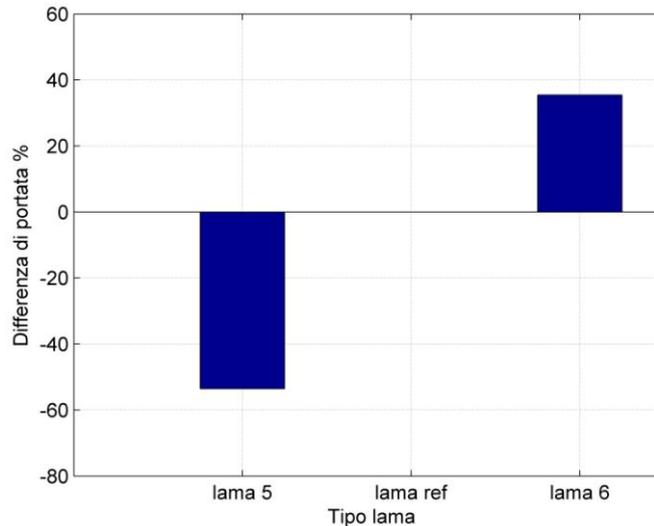


Figura 46. Differenza percentuale sul valore di portata al variare della corda del flap della lama ad altezza $H1$

Si nota che la lama 5 ha una riduzione di portata del 55% circa, mentre la lama 6 presenta un accrescimento rispetto al valore nominale che sfiora il 40%. L'incremento della corda del flap produce un andamento crescente della portata, da cui è dedotto un graduale miglioramento delle prestazioni, giustificato dalle stesse considerazioni precedentemente dichiarate relativamente alla corda della lama, per cui è preferibile il comportamento della lama 6 rispetto alle lama di base e alla 5.

Si consideri l'influenza del parametro 5 (**Figura 47**), per il quale si rileva che per le altezze $H3$, $H4$, $H5$ è presente un punto di minimo di portata che si verifica in relazione alla lama di riferimento, mentre per le altezze $H1$ e $H2$ l'andamento è decrescente all'aumentare degli angoli di calettamento dei profili del flap.

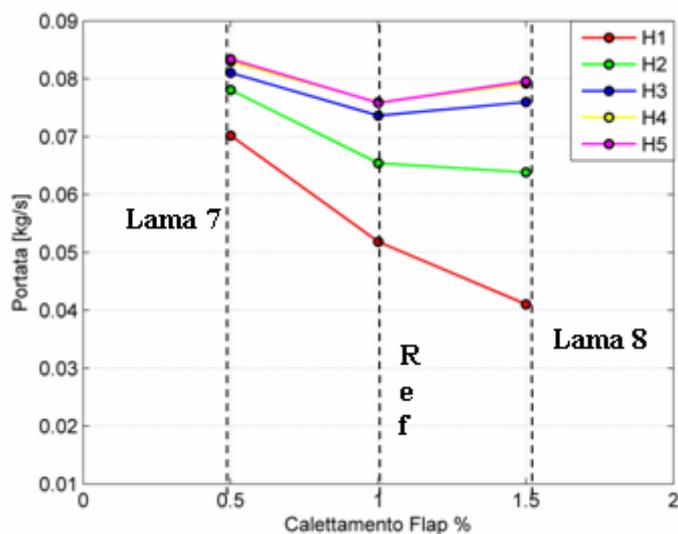


Figura 47. Andamento della portata alle altezze di lavoro del rasaerba disponibili al variare del calettamento del flap della lama stessa

Si valuti inoltre la discrepanza di portata percentualmente ad altezza di lavoro *H1* (**Figura 48**).

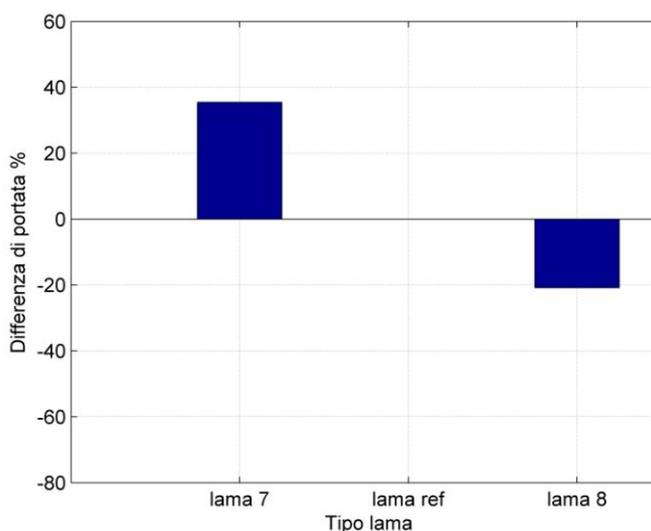


Figura 48. Differenza percentuale sul valore di portata al variare del calettamento del flap della lama ad altezza *H1*

La portata rispetto al valore di riferimento è aumentata del circa il 40% utilizzando la lama 7, mentre si è ridotta di circa il 20% per la lama 8.

Il calettamento dei profili componenti il flap della lama ha un andamento decisamente variabile sia in funzione della lama studiata (7 o 8) che dell'altezza di lavoro. In particolare all'aumento dell'angolo d'attacco del flusso i profili del flap raggiungono la situazione dello stallo, che provoca un immediato e repentino calo di portata, che è ben visibile ad altezza $H1$, per cui si preferisce il modello della lama 7.

In comune a tutti i grafici sovrastanti si osserva che la portata calcolata ad altezza $H1$ dal suolo ha modulo sensibilmente inferiore rispetto alle altre configurazioni permesse.

6.3 CONCLUSIONI

Lo scopo del progetto consiste nella creazione di una lama, sia da taglio che da malching, avente alte prestazioni, le quali vengono valutate utilizzando un test-rig di tipo lame assiale.

Una volta analizzate le prove sperimentali si ottiene quali debbano essere le caratteristiche geometriche della lama da taglio in grado di ottimizzarne la prestazione. In particolare si deduce che la lama ideale deve presentare l'apertura del flap pari a quella della lama di riferimento, la corda del flap equivalente a quella della lama 6 e infine gli angoli di calettamento dei profili del flap concordi a quelli della lama 7.

Il prossimo step consiste nella determinazione del valore ottimale della corda della lama, in modo da identificare in maniera precisa la struttura della lama dalle alte prestazioni.

Il successivo step sarà quello di verificare se effettivamente una lama con quelle date caratteristiche geometriche sia realizzabile ed installabile sul rasaerba ed in caso negativo si deve raggiungere un compromesso tra la massima performance della lama e la semplicità costruttiva dell'intero macchinario, parametro di vitale interesse per l'azienda *GGP*, il cui obiettivo è la limitazione dei costi per realizzare un prodotto finale facilmente inseribile sul mercato.

7. CONCLUSIONI

Il lavoro descritto in questo elaborato di tesi è stato eseguito su richiesta dell'azienda *Global Garden Products*, la quale svolge un ruolo di prestigio in tutta Europa nella produzione di articoli da giardinaggio, alla sezione aerodinamica della Facoltà di Ingegneria Aerospaziale con sede a Forlì. L'attività consiste nello studio delle prestazioni di una serie di lame di creazione propria, tra le quali valutare quella caratterizzata dall'ottimizzazione della prestazione del rasaerba sia per il taglio che per la funzione di malching, al fine di realizzare un prodotto finale facilmente inseribile sul mercato. La valutazione della performance avviene attraverso lo studio del flusso di aria generato dalla lama stessa, il quale è contraddistinto da diverse grandezze fisiche: pressione, velocità, densità e temperatura, che si modificano nel tempo, quindi si tratta di analizzare un campo fortemente complesso. In particolare il parametro di maggiore interesse pare essere la pressione, legata proporzionalmente alla velocità, in quanto una cospicua variazione del proprio valore causa l'instaurazione di un flusso di aria, mentre temperatura e densità rimangono circa costanti all'interno del tosaerba. L'identificazione delle caratteristiche della lama tuttavia non è attribuita allo studio del campo di pressione, infatti la capacità di 'risucchio' della lama stessa è ben descritta dal relativo valore di portata di fluido. Quest'ultima è determinabile spiegando il problema attraverso tre diversi approcci: analitico, numerico o sperimentale, tuttavia non essendo determinabile in maniera sufficientemente precisa un sistema di equazioni caratteristico su quanto accade all'interno del tagliaerba, è altresì impossibile procedere seguendo i primi due metodi dichiarati. In conclusione l'analisi del flusso può avvenire solo sul fronte sperimentale, cioè elaborando i risultati forniti da vari test, i quali sono possono essere eseguiti attraverso l'uso diretto del rasaerba operante su una zona di prato preparata alla prova. L'azienda *GGP* si è in precedenza occupata di quantificare l'entità di erba recisa dal tosaerba procedendo in tale maniera, da cui si ricava un esito solo a livello qualitativo, a causa dell'ovvia assenza di uniformità di erba distesa nel prato, per cui è necessaria la realizzazione di una struttura, il test-rig, che

presenti le proprietà di obiettività, affinché ci sia dipendenza solo dal modello di lama analizzato, e di ripetitività, cioè a parità di condizioni iniziali di lavoro le prove effettuate utilizzando un'unica lama conducano a risultati affini. Tale via di procedimento consente di differenziare la prestazione di ogni lama, tuttavia quanto richiesto coinvolge il miglioramento della performance dell'intero prodotto. Analizzando i risultati ottenuti dal Laboratorio di Aerodinamica attraverso lo studio di lame dalle prestazioni note, installate sia sul test-rig realizzato che sul rasaerba accessoriato degli apparati di misura della pressione, appare, utilizzando quest'ultimo metodo una certa discordanza con la vera performance. Ciò dimostra una forte influenza data dalla geometria della voluta anulare del rasaerba, per cui è opportuno scindere lo studio della prestazione della lama dall'efficienza della struttura accogliente la lama stessa; da tali considerazioni si preferisce concentrarsi sul test-rig lama assiale, per il quale a maggior valore di portata corrisponde direttamente un migliore rendimento della lama. Il Laboratorio di Aerodinamica sperimentale, una volta svolta la progettazione di tale macchinario, richiamando le caratteristiche di una galleria del vento subsonica a circuito aperto, ne ha verificato l'effettiva bontà delle informazioni ottenute sul flusso attraverso l'analisi dei profili di pressione, la deviazione standard e la capacità di aspirazione di quattro lame, di cui sono note le performance, applicando o meno in successione al convergente di misura honeycomb e reti, da cui prevale la validità del modello provvisto di condizionamento parziale del flusso.

Dimostrata la validità del macchinario realizzato ci si può occupare dello studio delle lame parametrizzate, le quali sono di notevole interesse economico per l'azienda *GGP*. Ognuna di esse è caratterizzata dalla distinzione di un parametro geometrico caratteristico rispetto alla lama di riferimento, in particolare nell'elaborato si analizzano l'influenza della corda sia della lama e che del flap, dell'apertura del flap e del calettamento dei profili del flap della lama sulla prestazione.

Attraverso l'analisi di tre risultati di portata per ogni parametro si deducono i valori ottimali di ogni termine per la creazione della lama caratterizzata da

alte prestazioni, tuttavia rimane da determinare il modulo ideale della corda della lama.

Nota la migliore geometria, oltre a verificarne la possibilità di realizzazione ed installazione all'interno del rasaerba si dovrà effettivamente provarne la sua performance attraverso ulteriori test sperimentali.

Gli studi futuri saranno rivolti all'ottimizzazione della prestazione del tosaerba, considerandolo nella totalità dei propri componenti, il cui esito si riversa nella creazione di un'opportuna struttura del tagliaerba che sfrutti completamente la potenzialità della lama precedentemente concretizzata.

Al termine di queste attività l'azienda *Global Garden Products* potrà realmente realizzare un macchinario per la cura del giardino in grado di trionfare sui prodotti esibiti sul mercato dalle imprese concorrenziali, in merito alle alte prestazioni che offre al consumatore.

BIBLIOGRAFIA

- [1]: Funzionamento elicotteri, http://it.wikipedia.org/wiki/Piatto_oscillante
- [2]: Hovering, <http://www.sapere.it/enciclopedia/hovering.html>
- [3]: Hovering, <http://it.wikipedia.org/wiki/Hovering>
- [4]: Hovering, <http://dida.fausser.edu/aero/quarta/elicotte/hovering.htm>
- [5]: John D. Anderson Jr, '*Fundamentals of Aerodynamics*', Mc Graw-Hill, Terza Edizione
- [6]: B.G.Buresti, '*Appunti di Aerodinamica*'
- [7]: G.Scarpi, '*Appunti di Fluidodinamica*', Anno accademico 2008-2009
- [8]: A.Talamelli, A.Segalini, H.Alfredsson, B.Lindgren, '*Wind Tunnels*', Materiale Didattico, Università di Bologna, 2009
- [9]: Trasduttore di pressione;
<http://it.wikipedia.org/wiki/Piezolettricit%C3%A0>
- [10]: A.Talamelli, A.Segalini, H.Alfredsson, B.Lindgren, '*Pressure Measurements*', Materiale Didattico, Università di Bologna

RINGRAZIAMENTI

Colgo l'occasione per ringraziare il Prof. Alessandro Talamelli per avermi dato la possibilità di avvicinarmi al mondo lavorativo nell'ambito aerodinamico e l'Ing. Alessandro Rossetti per la disponibilità ricevuta e i preziosi consigli, ben accetti durante il periodo di svolgimento dell'attività.

APPENDICE

CARATTERISTICHE STRUTTURALI DEL TEST-RIG

Il test-rig è realizzato (**Figura 48**), come detto in precedenza, affine a livello progettuale ad una galleria del vento subsonica di tipo aperta. In questa sezione si considerano gli elementi costruttivi e se ne dichiara in maniera più specifica i valori dimensionali e il relativo montaggio alle parti adiacenti; in particolare l'analisi verrà effettuata in ordine dai componenti più vicino al suolo (si osservi la numerazione della figura sottostante).

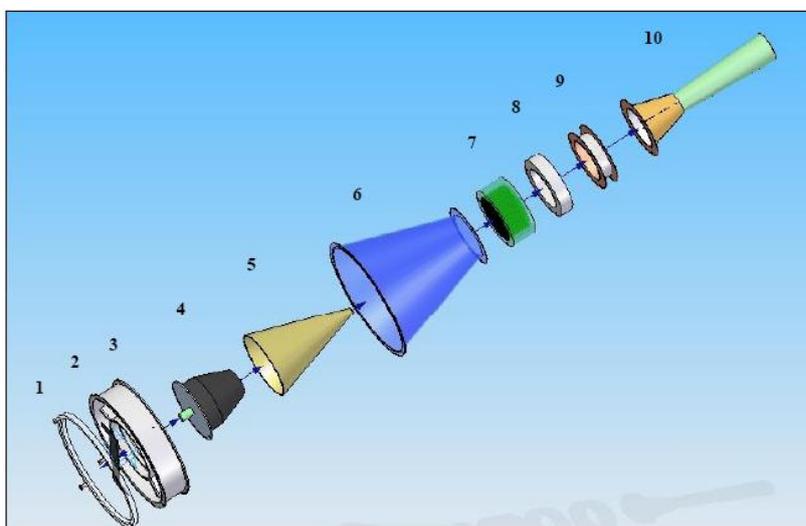


Figura 49. Esploso degli elementi costitutivi del test-rig

Il primo elemento studiato è il bordo inferiore (**Figura 49**) del test-rig, il quale si contrappone tra la voluta anulare e il suolo, tramite un sistema di tre ‘piedini’ costituito da viti, le quali ovviamente non sono completamente avvitate al foro associato, in maniera tale da poter realizzare le cinque altezze dal terreno a cui può lavorare il rasaerba fornito in dotazione dall’azienda *GGP*.

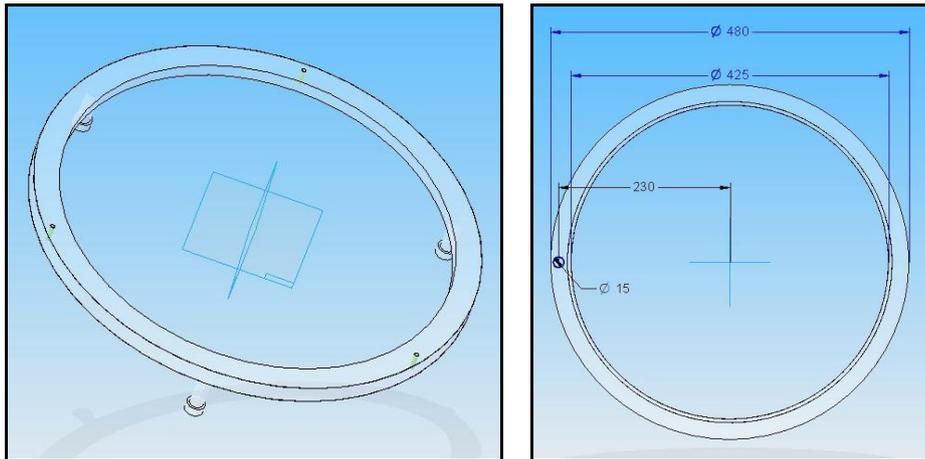


Figura 50. Bordo inferiore del test-rig in 3D (a sinistra) e in vista frontale con quotatura (a destra)

I fori sono filettati e distanziati l'un l'altro di 120° , tali da essere equispaziati lungo la circonferenza affinché il peso del test-rig sia distribuito in maniera uniforme sui tre piedistalli, allo scopo di evitare di sovraccaricare una vite rispetto alle altre due o di rendere instabile l'equilibrio dell'intera struttura.

Tali viti presentano lo stesso diametro (di valore di 15 mm) ma sono di diversa lunghezza, in quanto essendo lo spessore del bordo inferiore di soli 20 mm , per le distanze minori dal suolo non sarebbe possibile utilizzare la stessa vite che individua quelle superiori, a causa dell'ostacolo fornito dal contorno della voluta anulare.

Per il collegamento con il successivo elemento, cioè la voluta anulare (**Figura 50**), sono predisposti altri tre fori filettati al bordo del test-rig, posti intermedi a quelli precedenti, di diametro di 6 mm , sempre al fine di garantire la simmetria dei carichi agenti su di essa.

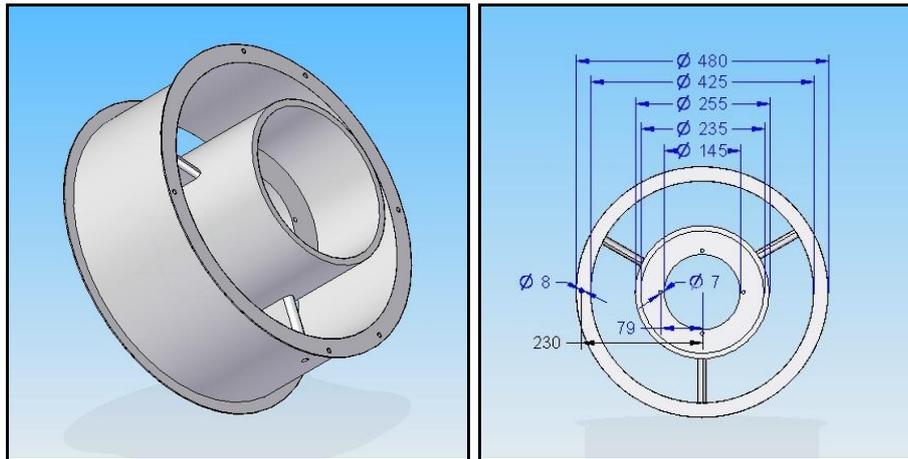


Figura 51. *Voluta anulare in 3D (a sinistra) e vista frontale con quote (a destra)*

Il diametro interno delle strutture finora citate corrisponde a quello opportunamente stimato (capitolo 2) allo scopo di generare la stessa portata che fuoriesce dal rasaerba in condizione nominale. Il dimensionamento del diametro esterno invece non ha valenza fluidodinamica, ma costruttiva, in quanto si richiede sia sufficientemente ampio affinché il pezzo possieda praticità di utilizzo sia nella fase di montaggio che di eventuale smontaggio; inoltre deve essere possibile effettuare i fori che ospiteranno le viti di collegamento, senza intaccare la rigidità del materiale. Il valore quindi non è univoco; si sceglie di fissarlo a circa 30 mm , tale corrisponderà per sia per il bordo inferiore che per la voluta, al fine di evitare eventuali sporgenze, pericolose per l'utilizzatore del macchinario.

I tre braccetti presenti all'interno della voluta hanno lo scopo di alloggiare i cavi di alimentazione del motore, i quali sono facilmente posizionabili grazie alla loro flessibilità, quindi si può agire riducendo al minimo l'impatto frontale di questi elementi rispetto al flusso di aria e svilupparli invece in lunghezza. Questo aspetto è importante, in quanto il dimensionamento della voluta si basa sul fatto che la portata rimane costante, da cui, grazie all'invarianza della sezione, il flusso non presenta accelerazioni. Tale condizione non risulta essere valida nel caso in cui i bracci fossero troppo ampi, in quanto la voluta presenterebbe sezioni di diversa misura, quindi il flusso si comporterebbe come se fosse in un condotto di forma convergente-divergente. Questa situazione indurrebbe ad un diverso valore di turbolenza

e di velocità delle particelle, rispetto a quanto studiato lungo i successivi elementi del test-rig, quindi il dimensionamento dell'intera struttura sarebbe stato effettuato in maniera inesatta. Un altro fattore da considerare è il comportamento del flusso una volta impattato il 'braccetto', per cui è importante che non siano presenti spigoli che modificano le linee di corrente del flusso, ma queste devono 'scivolare' lungo il profilo di esso avvolgendolo, affinché siano limitati i processi vorticosi e la dispersione di energia. Al fine di rispettare tutte le condizioni poste la forma preferibile è quella ellittica, minimizzando la sezione frontale (pari a 15 mm) e allungando i bracci rispetto alla direzione del flusso (pari a 80 mm).

All'interno della voluta è presente una nicchia, che in parte prosegue anche fuori da essa, la quale accoglie il motore del test-rig. La cavità è realizzata attraverso due cilindri concentrici di diametro diverso, quello esterno di 245 mm e quello interno di 145 mm. In particolare nella parte inferiore di questa sono presenti quattro fori passanti dal diametro di 7 mm per montare il dispositivo che collega la lama al motore stesso del test-rig.

Il prossimo step è analizzare i due coni, aventi lo scopo di assializzare la direzione del flusso e limitare i processi vorticosi presenti al suo interno. Il cono posto più internamente (**Figura 51**) si comporta anche come un ulteriore coperchio al motore; questo viene avvitato alla voluta anulare usando tre viti dal diametro di 7 mm, mentre quello più esterno (**Figura 52**) attraverso 4 viti dal diametro di 8 mm.

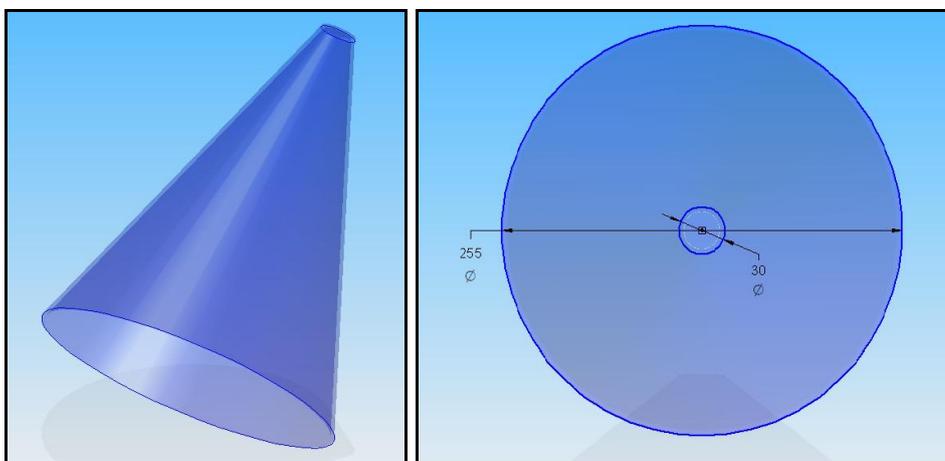


Figura 51. Cono mixer in 3D (a sinistra) e con quotatura (a destra)

L'avvitamento è permesso attraverso l'introduzione dei bordi che, come detto in precedenza, non devono avere una dimensione precisa, ma adatta al montaggio e alla manovrabilità del pezzo. In particolare il montaggio del cono di minori dimensioni deve essere effettuato in modo che il pezzo combaci perfettamente al bordo del motore, altrimenti la presenza di ostacoli influenza pesantemente il flusso creando delle zone di ristagno e intensificando le componenti di velocità tangenziale.

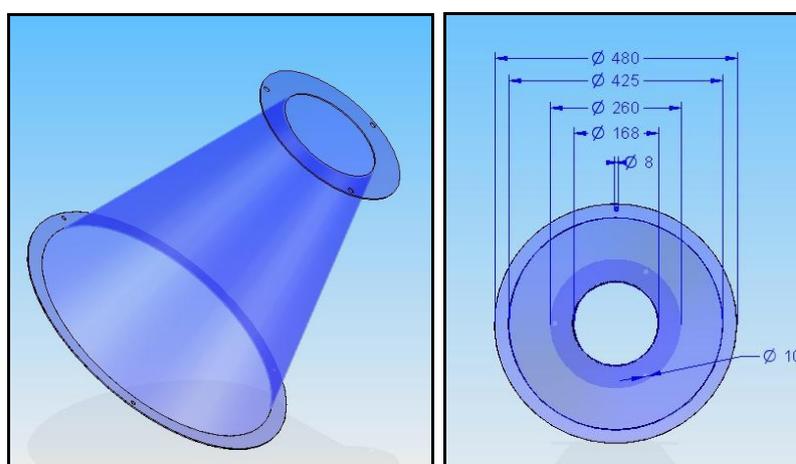


Figura 52. Coperchio del motore in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotature (a destra)

La lunghezza di entrambi gli elementi è data dal compromesso tra la loro funzione e l'ingombro verticale dell'intero test-rig, per cui il coperchio risulta di 45 *cm* mentre il cono interno di 39 *cm*.

Nella parte costruita per il trattamento del flusso di aria elaborato dalla lama sono presenti anche gli organi di condizionamento del flusso, cioè le reti e l'honeycomb; in quanto la strategia di utilizzare i due coni concentrici non è stata sufficiente affinché il flusso in ingresso alla zona di misura sia ben assializzato.

In successione al coperchio convergente è stato montato un honeycomb (**Figura 53**) grazie a tre fori distanziati di 120° lungo la circonferenza, che richiedono tre viti dal diametro di 10 *mm*; questo valore è superiore rispetto a quello delle viti che collegano tra di loro gli altri elementi finora citati. Il

motivo di questa scelta dipende dall'ingente peso di questo componente, per cui è necessario che sia ben fissato al coperchio, quindi le viti utilizzate devono presentare una buona robustezza a flessione e agli sforzi di taglio, di conseguenza sono utilizzate quelle aventi maggiore diametro.

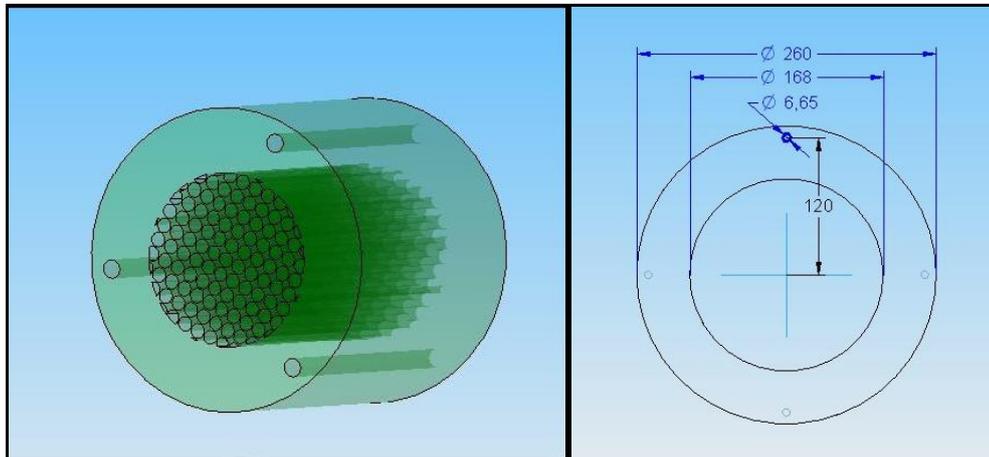


Figura 53. Honeycomb in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotatura (a destra)

Il peso di questo elemento è dovuto alla compattezza dello spessore della parete, il quale coincide con quello del bordo superiore del cono, cioè di 3 cm, affinché dopo il montaggio non rimangano superfici sporgenti dal test-rig. Si noti che l'aumento di diametro della vite usata ha comportato un aumento del diametro esterno del bordo del coperchio, al fine di aumentare la superficie di appoggio per meglio sostenere l'elemento stesso.

I condotti a nido d'ape, caratteristici dell'honeycomb, sono stati realizzati attraverso le comuni cannuce in plastica, utilizzate a livello alimentare. Tale soluzione minimizza il costo di questo elemento, mantenendone la funzionalità, infatti il flusso analizzato non presenta velocità eccessivamente elevate, per cui non si rischia il danneggiamento delle cannuce stesse, a meno dell'aspirazione di oggetti di piccole dimensioni che le possano lacerare. La disposizione delle cannuce all'interno della cavità dell'honeycomb è effettuata in maniera tale da occupare tutta la sezione frontale, affinché tutte le particelle siano soggette all'effetto di assializzazione della velocità. Le cannuce, dopo essere state opportunamente tagliate, vengono inserite all'interno dell'elemento

considerato e rimangono unite tra di loro grazie al solo attrito presente tra le loro pareti e quelle dell'honeycomb stesso, senza l'utilizzo di speciali colle. Il numero di cannuce introdotte deve essere tale che le forze di attrito generate garantiscano il mantenimento della forma circolare di ogni condotto, per evitare la disuniformità delle sezioni di passaggio, quindi zone ad accelerazione spontanea.

I fori per il collegamento di questo elemento sono tutti uguali tra di loro: sono di diametro di 10 mm, di estensione finita (37 mm) e presentano la filettatura.

Collegate all'honeycomb sono presenti le tre reti (**Figura 54**), le quali sono assemblate tra di loro per mezzo di un incastro, avente larghezza della circonferenza di 4 mm e profondità di 4 mm, che mantiene libera solo la rotazione relativa tra di esse, la quale viene bloccata grazie all'inserimento di quattro viti dal diametro di 8 mm. In particolare l'incastro è realizzato in modo che le reti presentino o una cavità (femmina) o una protuberanza (maschio), entrambi delle dimensioni appena definite.

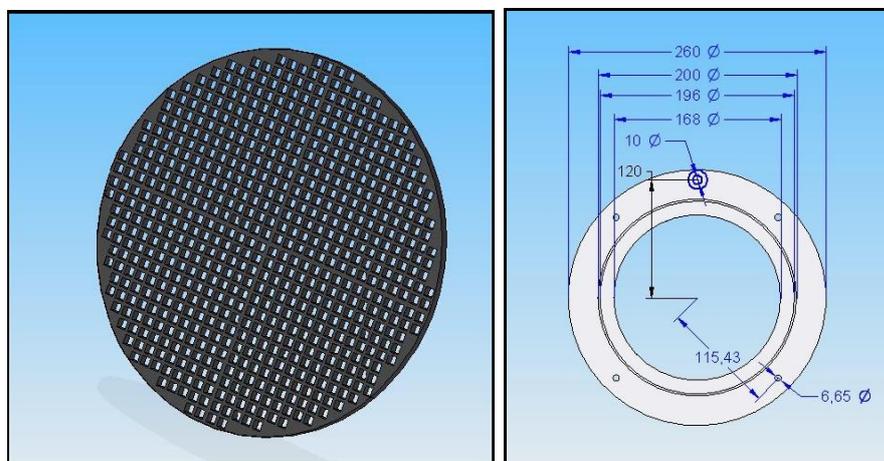


Figura 54. Rete in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotatura (a destra)

Le viti scelte hanno una lunghezza elevata, in quanto oltre ad unire le reti tra di loro, devono collegarle anche all'honeycomb; inoltre, per quanto detto in precedenza, dati pesi in gioco per garantire la stabilità della struttura, sono scelte quelle caratterizzate dal diametro di 10 mm. In particolare si opta per

le viti a testa svasata, la cui testa ha diametro di 20 mm e angolo di svasatura pari a 82° , perché non sono intrusive rispetto alla calma, cioè l'elemento adiacente che compone il test-rig.

L'utilizzo delle viti per l'assemblaggio delle varie parti rende semplice la fase di montaggio, ma allo stesso tempo anche l'eventuale smontaggio, che è di particolare interesse sia per le reti che per l'honeycomb, infatti per quanto detto al capitolo 2, sono elementi che richiedono una manutenzione periodica.

Il diametro delle reti corrisponde a quello della sezione interna dell'honeycomb (cioè a 168 mm), al fine di cercare di mantenere la velocità delle particelle costante, tuttavia in entrambi gli elementi saranno presenti delle variazioni di velocità causate dalla piccole perdite di portata causate dall'attraversamento di essi. In linea ai collegamenti tra gli altri elementi, in riferimento alla sicurezza dell'intero test-rig, il diametro esterno di entrambi è sempre lo stesso (di 260 mm).

In successione agli organi di condizionamento del flusso è inserito l'elemento di transizione tra la parte dedicata al trattamento del flusso e quella per la misurazione del campo di pressioni, nonché la camera di calma (**Figura 55**).

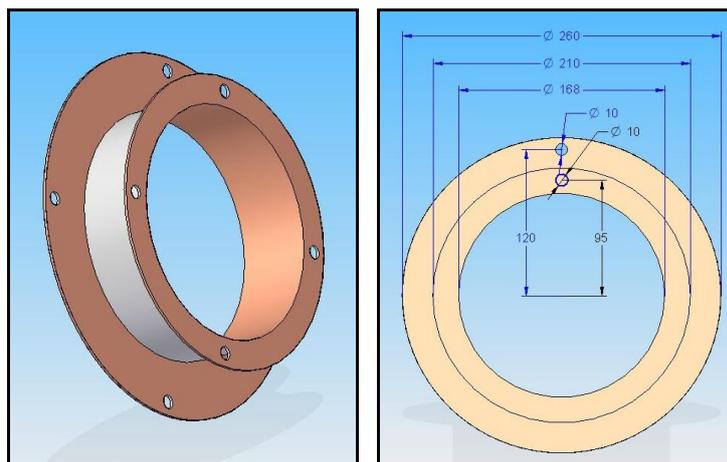


Figura 55. Calma in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotatura (a destra)

Il diametro (sia interno che esterno) si conforma a quello delle reti, per quanto riguarda la parte inferiore della calma; il collegamento alle reti avviene attraverso quattro fori dal diametro di 10 *mm*.

Il diametro esterno della parte superiore invece è di minore dimensione (210 *mm*), per uniformarsi alla dimensione bordo del tubo di Venturi, tuttavia il foro di collegamento è sempre di 10 *mm*, infatti la struttura sovrastante richiede di essere ben fissata, al fine di evitare modifiche del flusso a causa di uno spostamento relativo tra le superfici di contatto, quindi di intaccare la validità della misurazione di pressione effettuata.

I fori presenti nella calma e nel tubo di Venturi non sono filettati, quindi il collegamento è effettuato attraverso una vite e due dadi, opportunamente stretti alla piastra da entrambi i lati.

In uscita dalla calma il flusso percorre il condotto convergente (**Figura 56**), sulle cui pareti devono essere disposte le prese d'aria.

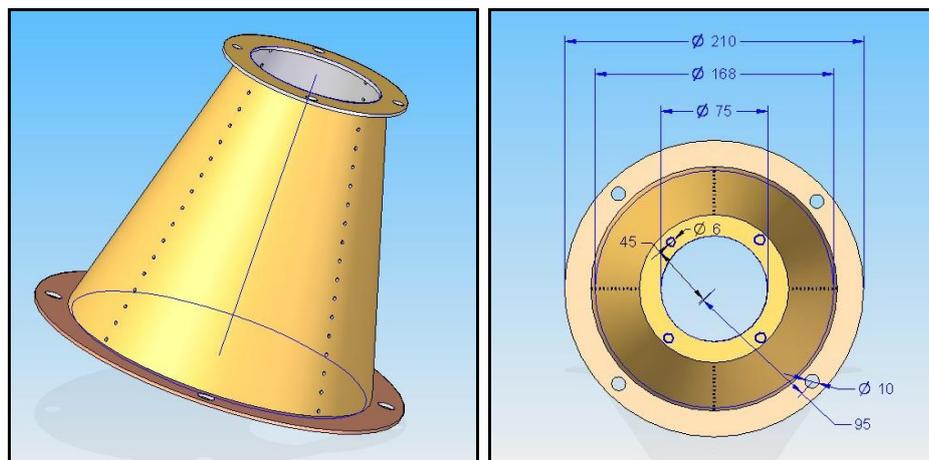


Figura 56. Tubo di Venturi: Convergente in 3D (a sinistra) e in vista dall'alto con quotature (a destra)

I fori sono di forma circolare, sia per semplicità di realizzazione sia perché non ci siano differenze di pressione lungo il perimetro di essi. Il diametro deve essere piccolo, è scelto a 2 *mm*, come compromesso tra il costo e la praticità di realizzazione e le perdite di carico. Di fatto un foro eccessivamente ampio comporterebbe forti perdite di portata, con impreviste

variazioni di pressione, per cui i risultati sperimentali non sarebbero più in grado di descrivere il fenomeno fisico di interesse con esattezza.

La disposizione dei fori è lungo quattro direttrici del cono, poste a 90° l'una dall'altra; in ognuna delle quali sono presenti 16 fori distanziati di 5 mm . Un aspetto importante è che i punti di misura definiscano delle sezioni di misura affinché i dati di output siano confrontabili tra di loro, quindi prima della fase di foratura del condotto bisogna identificare con molta accuratezza la posizione delle prese; mentre per quanto riguarda l'allineamento dei fori lungo il cono, questo non richiede lo stesso grado di precisione. Tale differenza sull'attenzione da seguire durante il posizionamento delle prese d'aria è dovuto alla caratteristica del campo di pressioni in un condotto di forma convergente, per cui la pressione varia lungo il tubo, ma è costante nei punti di una stessa sezione. Ad ogni foro è applicato per incollaggio un condotto di plastica attraverso un supporto metallico, lungo il quale si propaga l'informazione di pressione, fino alla strumentazione che permette di quantificare la pressione rilevata.

Attraversato la parte convergente il flusso percorre la parte divergente del tubo di Venturi (**Figura 57**), per poi gettarsi all'esterno del test-rig, dopo aver opportunamente ridotto la propria velocità.

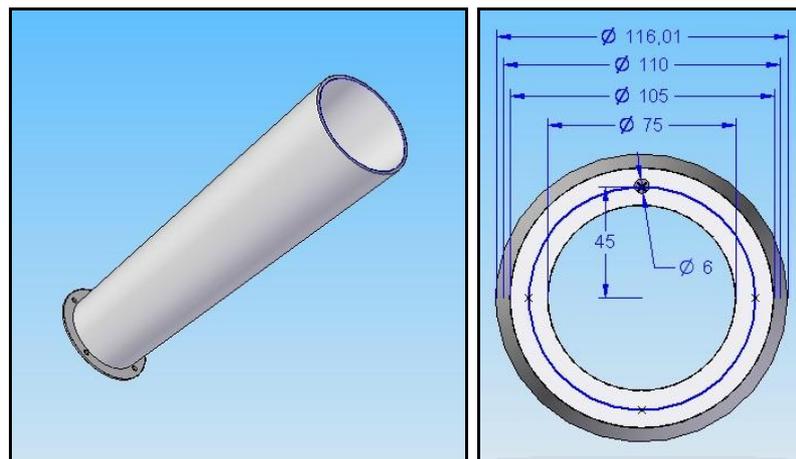


Figura 57. Tubo di Venturi: Divergente in 3D (a sinistra) e in pianta con quotature (a destra)

Il collegamento tra i due condotti avviene attraverso quattro fori equispaziati, lungo il bordo degli elementi, di diametro di 6 *mm*; il valore è stato ridotto rispetto al precedente di 10 *mm* in quanto questa parte del test-rig è molto leggera e benché abbia una lunghezza rilevante (400 *mm*) rimane ben fissata al test-rig.

Il dimensionamento di questo condotto rispetta la condizione di strato limite attaccato alla parete, da cui deriva il valore della sezione di uscita del test-rig (110 *mm*).