

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Aeronautica



Studio e realizzazione di un sistema a film caldo per misure
in flussi interni turbolenti

Relatore: Prof. Marco BELAN

Co-relatore: Prof. Franco AUTERI

Tesi di Laurea di:

Simone RAINA
Matr. 724677

Anno Accademico 2012 - 2013

A mio Padre e mia Madre

*Nella vita di ogni giorno si presentano situazioni che alcuni chiamano problemi;
io preferisco considerarle giochi di fantasia della vita che ci permettono di
esprimere qualcosa di nostro per andare avanti.*

Ringraziamenti

Ringrazio i miei genitori, che, proprio perché non sono perfetti, sono i migliori genitori che un figlio possa avere. Mio padre, un pilastro d'amore e carità, e mia madre, che gli dà la forza per esserlo. E le mie sorelle, che, nonostante le diversità, sono sempre un esempio.

Ringrazio Valentina, che negli ultimi tre anni mi è stata accanto sempre. Nel chiasso delle vittorie e nel silenzio delle sconfitte. Avendo ogni sera quella parola capace di darmi la forza e la gioia per vivere ogni giorno con serenità e determinazione e metter da parte ogni paura e ogni dubbio. Nonostante le mie assenze anche standole accanto. Per il nostro armadio, bellissimo, storto e senza maniglie, per la sua pazienza nel sopportare il mio non imparare mai, per i suoi semplici capricci sulle cose futili, per la sua serena determinazione su quelle importanti.

Ringrazio il professor Marco Belan, che, prima di essere un esemplare ingegnere, ricercatore e professore, si è dimostrato una persona capace di comprendere e ascoltare, e, essendo anche quanto detto sopra, capace di trasmettermi, oltre una profonda conoscenza nozionistica e accademica, un insegnamento giorno per giorno di come essere ingegnere e ricercatore nella realtà dello sviluppo di un lavoro, dalla sua invenzione fino alla sua realizzazione. Un insegnamento grande che va al di là del dovere e sfocia nella passione.

Ringrazio il professor Franco Auteri, sempre presente e gentile ogni volta che ce ne fosse stato bisogno. Esempio distintivo della ricerca e della conoscenza accademica, con la sua discrezione e il suo intuito, capace di trovare sempre soluzioni semplici a situazioni all'apparenza complesse.

Ringrazio Donato Grassi, un amico con diverse passioni in comune, e un ingegnere capace di farmi vedere molte cose da differenti punti di vista.

Ringrazio il professor Silvio Ferragina, sempre disponibile e con un sorriso in più, che mi ha dimostrato una stima e una gentilezza davvero fuori dal comune.

Ringrazio, Roberto e Antonio, che al posto che realizzare le parti e me necessarie, sempre con un sorriso e una disponibilità infinita, mi hanno insegnato, anche se forse non avrebbero dovuto, a utilizzare tutte le attrezzature presenti in officina così da rendermi autonomo nel mio lavorare.

Ringrazio Maurizio Quadrio, ingegnere, ricercatore, professore. Dedito a un pensiero sempre alla ricerca di capire quello che ancora non si conosce, di realizzare quello che ancora non c'è, mai con il dubbio che qualcosa non si possa spiegare o non possa essere fatto. Un amico, una persona rara.

E ancora, ringrazio, Alex, Gabriele Campanardi, e in particolare, la Elly, che dopo esser stata una compagna di banco con cui andare avanti giorno per giorno, ora in laboratorio, è stata, come una volta, quella luce in più nei giorni un po' grigi, quel sorriso che si desidera nel momento di necessità, quella persona capace di comprendere e condividere tutto.

Ringrazio, di cuore, Massimiliano Buvoli a.k.a il Massi. Sempre presente. Sempre. Senza spingere, senza parlare troppo, senza far troppo casino. Sempre vicino. A tirare come un dannato. Ad ascoltare. A ridere e gioire. Con poche parole e i giusti consigli, sempre attenti, mai una parola in più o spesa inutilmente. Io ogni tanto, forse, un pò F.o.S., lui, sempre, Brave and Humble. Una di quelle persone che auguro a tutti di incontrare nella vita.

Ringrazio il Gabry e tutto il team Rivoli's, tutta la banda della palestra e il mondo della scalata, con cui si scala ogni giorno o che s'incontrano due volte l'anno; la Manu, semplicemente Luce; Domitilla, un'Amica unica; Luis, un genio; AM, un maestro; lo Ste, il Faa, la Ile, Biagio e tutti i miei amici di ogni parte che, spesso, dovevano sopportarmi nella mia ridondanza a parlare di esami e cose assurde, di cui in fondo non gliene fregava nulla, ma che, sempre, con affetto, commentavano fintamente interessati per farmi contento.

Ringrazio il buon Dio che fa sì che gli aeroplani che stan su per caso continuino a rimaner lassù in bilico chissà perché.

Abstract

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di progettare e realizzare delle attrezzature, al fine di indagare, attraverso l'utilizzo di una sonda a film caldo, l'andamento del transitorio del fenomeno di riduzione di resistenza ottenuto con il metodo delle onde viaggianti. Lo studio e realizzazione delle attrezzature ha seguito un processo di progettazione e sviluppo con la necessità di integrarsi all'interno del complesso impianto già presente dedicato all'analisi del fenomeno delle onde viaggianti all'interno di un tubo a sezioni rotanti. Tale studio e realizzazione delle attrezzature ha portato all'integrazione del nuovo equipaggiamento all'interno del precedente impianto, e, dopo lo studio di una legge di taratura, è terminato con la determinazione di un metodo ripetibile di taratura.

Indice

1	Introduzione	11
1.1	Analisi numerica.....	11
1.2	L'esperienza.....	14
1.3	L'impianto	16
1.4	Risultati.....	18
2	Progettazione attrezzature	21
2.1	Obiettivi	21
2.2	Analisi del problema e soluzioni operative	22
2.3	Progettazione CAD.....	25
2.3.1	Albero principale.....	25
2.3.2	Supporti verticali	27
2.3.3	Sistema boccole tubo principale.....	27
2.3.4	Sistema interfaccia motore	29
2.3.5	Sistema di trazione.....	31
2.3.6	Interfaccia tubo impianto.....	33
2.3.7	Integrazione attrezzature nell'impianto principale.....	33
2.4	Realizzazione parti	35
2.5	Integrazione con l'impianto presente	39
3	Procedure operative	43
3.1	Manutenzione impianto	43
3.2	Montaggio parziale e operazioni preliminari.....	46
3.3	Allestimento del sistema di prova	48
3.3.1	Assemblaggio albero principale	48
3.3.2	Assemblaggio gambe di supporto verticali	49
3.3.3	Assemblaggio sistema di trazione assiale.....	50
3.3.4	Assemblaggio sistema di spostamento verticale	50
3.3.5	Assemblaggio interfaccia tubo principale	52
3.3.6	Ottimizzazione corsa verticale.....	54
3.4	Chiusura e riempimento impianto	55
3.5	Utilizzo	55
4	Collaudo e taratura	56
4.1	Taratura in velocità.....	56
4.2	Taratura a Reynolds variabile.....	56
4.3	Taratura a Reynolds costante.....	58
4.4	Studio funzione di taratura	59
4.5	Verifica	62

4.6	Ottimizzazione procedura di taratura	62
5	Conclusioni e sviluppi futuri	64
5.1	Conclusioni	64
5.2	Sviluppi futuri.....	64
	5.2.1 Prove transitorio	64
	5.2.2 Indagine zone ad alto numero di Reynolds	65
	Bibliografia	69
	Appendice A	72
	Appendice B.....	74

Elenco delle figure

Figura 1.1.1: Riduzione di attrito percentuale in funzione della coordinata longitudinale, tratta da <i>Ricco, Wu [21]</i> , La riga verticale posta alla distanza x/\pm indica la parte terminale della lastra.....	12
Figura 1.1.2: Schema del sistema di flusso turbolento in un canale piano con onde viaggianti a parete. λ_x è la lunghezza d'onda e c è la velocità di fase dell'onda.....	13
Figura 1.1.3: Mappa della variazione coefficiente di attrito in base a $k - \omega$..	14
Figura 1.2.1: Schema base dell'impianto.....	15
Figura 1.2.2: Schema realizzazione della traveling wave attraverso sezioni rotanti	15
Figura 1.3.1: Schema di discretizzazione della sinusoide con $s=6$	16
Figura 1.3.2: Schema di movimentazione dei segmenti rotanti.....	17
Figura 1.3.3: Schema generale dell'impianto.....	17
Figura 1.4.1: Mappa drag reduction, $k-\omega$, con $s = 2, 3, 6$	18
Figura 1.4.2: Riduzione di resistenza in funzione della frequenza di oscillazione, e per $s = 3$ (cerchi), $s = 6$ (triangoli).....	19
Figura 1.4.3: Confronto dati sperimentali con valori predetti dalla DNS.....	20
Figura 2.1.1: Rendering assieme nuova attrezzatura.....	21
Figura 2.3.1.1: Albero principale.....	25
Figura 2.3.1.2: Dettaglio grani, guida assiale e foro elettrico.....	26
Figura 2.3.2.1: Supporto verticale anteriore.....	27
Figura 2.3.3.1: Supporti di connessione alle clamp motore.....	28
Figura 2.3.3.2: Sistema boccola premistoppa.....	28
Figura 2.3.3.3: Sistema boccola premistoppa.....	29
Figura 2.3.4.1: Piastra d'interfaccia motore e clamp interna.....	30
Figura 2.3.4.2: Sistema interfaccia motore.....	30
Figura 2.3.5.1: Ruota forata e supporto d'installazione.....	31
Figura 2.3.5.2: Assieme attrezzatura con sistema di spostamento assiale.....	32
Figura 2.3.5.3: Dettaglio coassialità asse supporto verticale – asse guida trecciato.....	32
Figura 2.3.6.1: Blocco motore e interfaccia con il tubo principale.....	33
Figura 2.3.7.1: Studio posizionamento attrezzatura.....	34
Figura 2.3.7.2: Studio posizionamento attrezzatura	34
Figura 2.4.1: Assieme di alcune delle parti.....	35
Figura 2.4.2: Gamba di supporto posteriore.....	36
Figura 2.4.3: Boccola di supporto posteriore.....	37
Figura 2.4.4: Boccola di supporto anteriore.....	37
Figura 2.4.5: Sistema boccole di supporto anteriori.....	38
Figura 2.5.1: Vaso espansione con traverso motorizzato.....	39

Figura 2.5.2: Connettore controllo motore OVIS.....	40
Figura 2.5.3: Connettore controllo motori e relè su PXI.....	41
Figura 2.5.4: Case Aalab di acquisizione del film caldo.....	42
Figura 3.1.1: Segmenti sezione di prova.....	43
Figura 3.1.2: Segmento sezione di prova a seguito della manutenzione.....	44
Figura 3.1.3: Barra rettificata, asse camera di prova.....	45
Figura 3.2.1: Schema distanza sezioni.....	46
Figura 3.2.2: Marcatori di posizione.....	47
Figura 3.3.2.1: Assieme albero principale tubo di sostegno in posizione di montaggio.....	49
Figura 3.3.2.2: Assieme albero principale e boccole sistema premistoppa...	51
Figura 3.3.4.1: Assieme movimentazione assiale e radiale.....	51
Figura 3.3.5.1: Sonda Dantec R15 a film caldo.....	52
Figura 3.3.5.2: Interno del tubo principale dell'impianto, gambe di supporto verticali.....	53
Figura 3.3.5.3: Attrezzatura al termine dell'assemblaggio.....	53
Figura 4.2.1: Incertezza del flussimetro.....	57
Figura 4.3.1: Profilo di velocità.....	59
Figura 4.4.1: Esempio di curva di taratura.....	61
Figura 4.5.1: Confronto profilo di velocità laminare teorica e misurata	63
Figura 4.5.2: Confronto profilo di velocità turbolenta teorica e misurata.....	63
Figura 5.2.2.1: Mappa $k-\omega$ con nuove zone d'indagine ad alti Reynolds.....	65
Figura 5.2.2.2: Precedenti studi sulla riduzione di resistenza con tecniche attive all'aumentare del numero di Reynolds, $Re_\tau 1000 \approx Re_p 28000$	66
Figura 5.2.2.3: Bilancio di energia netto S (valori nei box con evidenza sui valori positivi) a $Re 27000$, e sotto i box sono riportati i ΔS tra $Re 4750$ e $Re 27000$	67
Figure 5.2.2.4 - 5.2.2.5: Le due figure mostrano la differenza delle zone di riduzione e aumento di resistenza in funzione di $k-\omega$ a bassi ed alti numeri di Reynolds. Nella figura superiore la mappa $k-\omega$ schematizzata per individuare le regioni d'interesse a bassi numeri di Reynolds, nell'immagine inferiore si evidenzia il comportamento all'aumentare del numero di Reynolds.....	68

Elenco delle tabelle

Tabella 1.4.1: Variazioni della lunghezza d'onda al variare di s , numero di segmenti che ruotano in modo indipendente, utilizzati per la discretizzazione della sinusoide.....	17
Tabella 3.3.6.1: Valori di compensazione della flessione in estensione assiale.....	52

Capitolo 1

Introduzione

L'aerodinamica è quella scienza che, assieme alla fluidodinamica, studia il comportamento dei gas e dei fluidi. Grande parte dello studio è rivolto non solo alla dinamica e fenomenologia propria dei gas e dei fluidi ma all'interazione di questi con corpi solidi e alle forze che derivano da questa interazione. Uno degli obiettivi maggiormente ricercati nello studio delle forze aerodinamiche è la minimizzazione della resistenza data dall'interazione di un corpo con un gas o un fluido. Tale minimizzazione se prima si rivolgeva soprattutto all'ottimizzazione della forma, ora, raggiunto un altissimo livello nell'ottimizzazione della forma e minimizzazione della resistenza da essa derivata, si è maggiormente e parallelamente spostata alla minimizzazione della resistenza dovuta al contatto tra il corpo e il fluido. Nella storia sono stati fatti diversi studi e esperimenti al fine di minimizzare la resistenza di contatto dovuta alla decelerazione del fluido nella zona di strato limite da velocità asintotica a velocità nulla a parete. L'apice di questi studi per minimizzare il coefficiente di attrito è stato realizzato al Politecnico di Milano con la realizzazione di un test set up che, attraverso un esperimento, dimostrasse quanto predetto in via teorica e numerica, [7].

Il risultato raggiunto non è stato ancora migliorato da alcun esperimento o studio al riguardo.

1.1 Analisi numerica

Lo studio del fenomeno di drag reduction, o quantomeno l'intuizione sulla possibilità di percorrere la strada del controllo attivo attraverso forzanti di tipo sinusoidale per ottenere risultati in termini di riduzione di coefficiente di attrito, trova i suoi primi risultati con Jung, che nel 1992 teorizza la possibilità di ottenere una diminuzione del coefficiente di attrito attraverso pareti oscillanti con forzante di tipo sinusoidale e movimento della parete in direzione trasversale rispetto alla corrente. Tale metodo è stato sviluppato in diversi modelli CFD [4], [5], [6], che hanno validato la tesi e, a seguito di questi, sono stati realizzati diversi esperimenti, tra cui quello da parte di Ricco, Wu, [3], in un canale a pareti piane, con legge di moto sinusoidale e movimento trasversale rispetto alla corrente, che ha portato a verificare la riduzione del coefficiente di attrito, in termini del 23%÷24% come mostrato in figura 1.1.1.

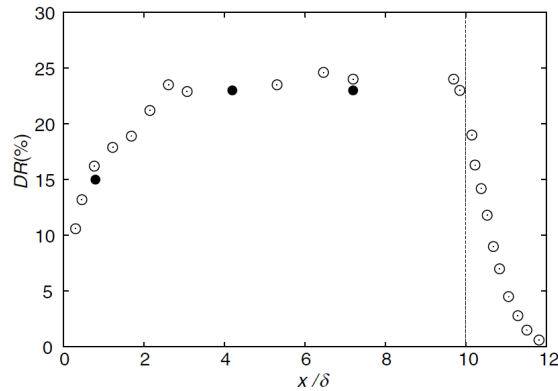


Figura 1.1.1 : Riduzione di attrito percentuale in funzione della coordinata longitudinale, tratta da Ricco, Wu [21], La riga verticale posta alla distanza x/\pm indica la parte terminale della lastra.

Tale metodo fu approfondito e sviluppato dai professori Quadrio, Ricco e Viotti, [7], che, prima considerando una legge con velocità di fase infinita, cioè oscillazioni uniformi:

$$w_w(t) = A \sin(\omega t) \quad (1.1.1)$$

E combinandola con una legge con velocità di fase nulla, cioè di onde stazionarie:

$$w_w(x) = A \sin(k_x x) \quad (1.1.2)$$

Svilupparono un modello di forzante spaziale e temporale con velocità di fase finita e pari a $c = \omega / k$, con legge:

$$w_w(x, t) = A \sin(k_x x - \omega t) \quad (1.1.3)$$

Dove:

- w_w è la componente tangenziale (z) del vettore velocità sulle pareti
- x è la coordinata spaziale lungo la direzione della corrente
- t è il tempo

- A è l'ampiezza delle oscillazioni
- k_x è il numero che caratterizza le onde, nella direzione della corrente
- ω è la frequenza delle oscillazioni data da $2\pi / T$

A tale studio di legge di forzante è seguita una DNS che rappresentasse l'andamento teorico della riduzione del coefficiente di attrito. E' stata simulata un'onda viaggiante in un canale piano che si sviluppasse e muovesse in direzione della corrente, figura 1.1.2:

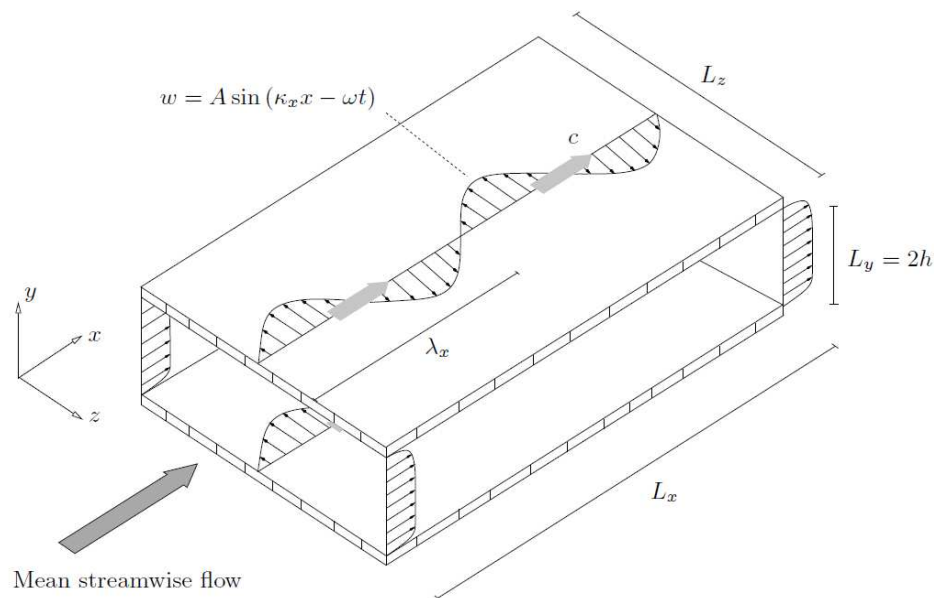


Figura 1.1.2: Schema del sistema di flusso turbolento in un canale piano con onde viaggianti a parete. λ_x è la lunghezza d'onda e c è la velocità di fase dell'onda.

Eseguendo la CFD con questo schema di canale e con legge per la forzante la legge (1.3), considerando un'ampiezza d'onda $A=0,75U_b$ e Reynolds = 3170 si è ottenuta la mappa di variazione del coefficiente di attrito percentuale in base ai parametri $k - \omega$, figura 1.1.3. A seguito dei risultati che prevedevano un massimo di riduzione di resistenza nell'intorno del 48%, è stato deciso di procedere alla realizzazione di un esperimento per validare la simulazione numerica.

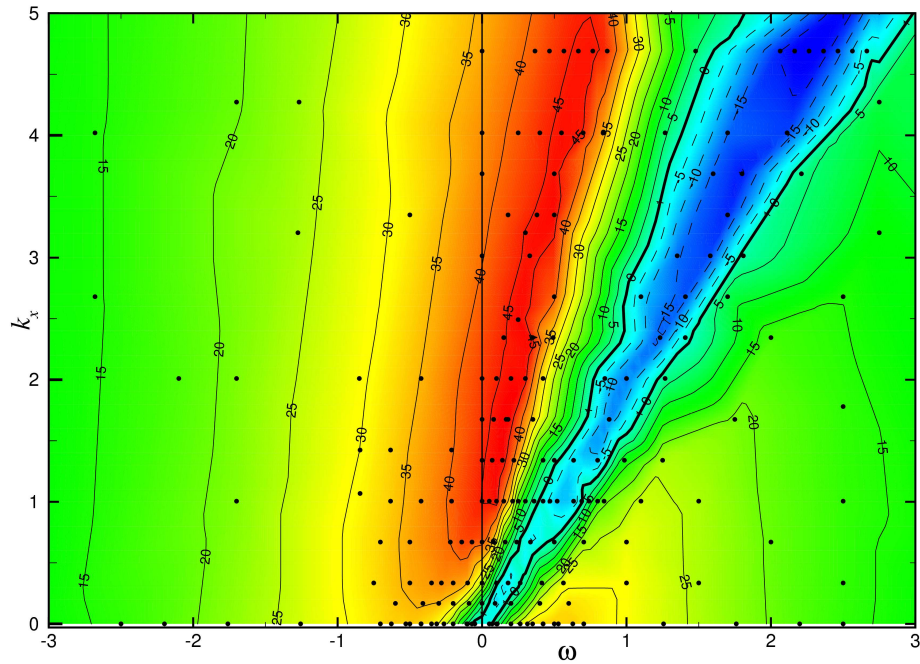


Figura 1.1.3: Mappa della variazione del coefficiente di attrito in base a $k - \omega$.

1.2 L'esperimento

L'esperimento per la validazione della DNS è consistito nella realizzazione di un impianto che, sviluppato completamente il fenomeno in una sufficiente sezione di prova, permettesse la misurazione della perdita di carico a cavallo di tale sezione per valutare la riduzione del coefficiente di attrito attraverso la formula di Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{Cf}} = 2 \log \left(\frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{Cf}} \right) \quad (1.2.1)$$

Con:

$$Cf_0 = \frac{2\Delta P}{\rho U_b^2 L/D} \quad (1.2.2)$$

Per la messa in opera dell'esperimento, per facilità di realizzazione, è stato scelto di realizzare un impianto avente geometria cilindrica nella zona di analisi.

L'impianto, figura 1.2.1 era finalizzato a creare una sezione di prova a cavallo della quale misurare la perdita di carico data dal fenomeno completamente sviluppato.

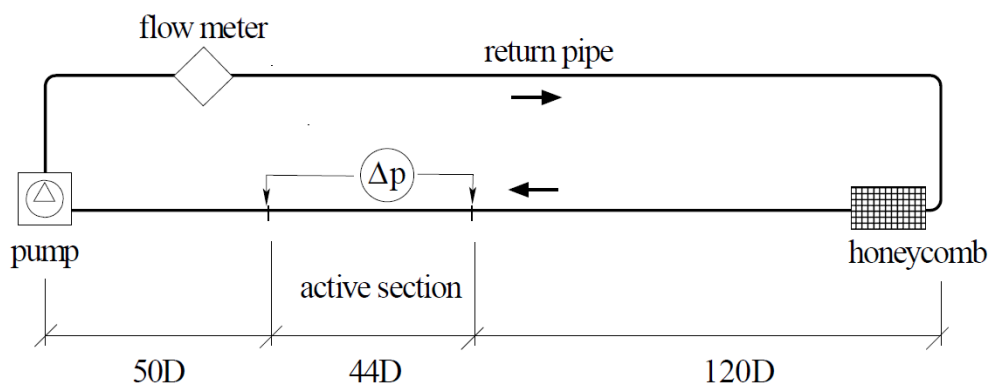


Figura 1.2.1: Schema base dell'impianto

All'interno di tale sezione di prova il tubo è stato realizzato con sessanta segmenti che, avendo la possibilità di ruotare in modo indipendente, andassero a creare l'onda viaggiante su tutta la sezione della camera di prova, figura 1.2.2.

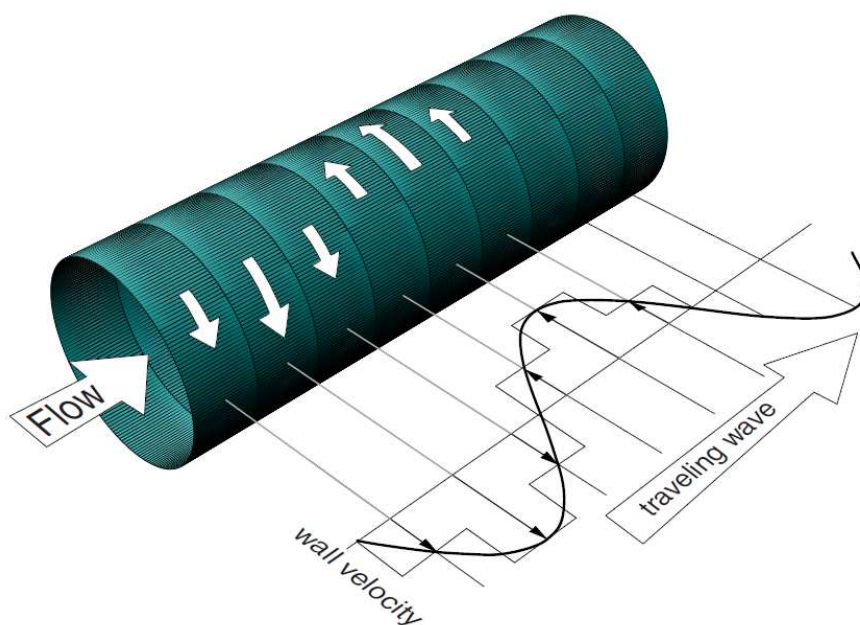


Figura 1.2.2: Schema realizzazione della traveling wave attraverso sezioni rotanti

Con questo tipo di realizzazione della sezione di prova, discretizzando l'onda sinusoidale con la movimentazione indipendente di un numero variabile s di segmenti in base alla discretizzazione voluta, si è eseguito l'esperimento per validare la DNS, [1], [8].

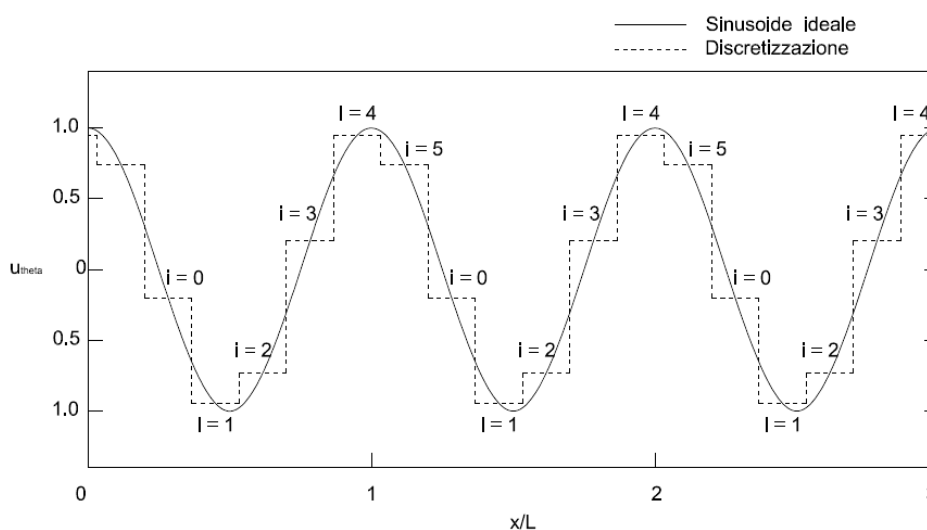


Figura 1.3.1: Schema di discretizzazione della sinusoide con $s=6$

1.3 L'impianto

La realizzazione pratica dell'impianto è stata un lavoro di grande complessità. L'impianto a circuito chiuso, contenente acqua, era controllato da un calcolatore a cui era demandato il controllo attivo dell'impianto. Per la movimentazione dei sessanta segmenti che costituivano i quarantaquattro diametri di prova sono stati utilizzati sei motori controllati da sei dinamo calibrate in velocità, che, trasmettendo il movimento in modo sfasato alle sezioni attraverso cinghie di trasmissione, andavano a creare fisicamente la sinusoide discretizzata definita nella (1.1.3), figura 1.3.1. Per la misurazione della perdita di carico a cavallo della sezione di prova erano posti dei traduttori di pressione, mentre altri erano assegnati al controllo della pressione assoluta mentre un flussimetro monitorava la portata dell'impianto. Per il controllo del numero di Reynolds erano monitorati anche i valori fisici del fluido quali temperatura, densità e pressione. È stato poi realizzato un vaso di espansione che creasse, durante la movimentazione dei segmenti, un battente di pressione sufficiente a evitare il trafilamento del grasso marino, posto tra i vari segmenti per evitarne il grippaggio e garantirne la tenuta, all'interno del fluido. In ultimo la portata dall'impianto era data da una pompa controllata da un inverter la cui tensione di alimentazione era controllata in retroazione per garantire il numero di Reynolds desiderato. La sezione di prova era costituita da sessanta segmenti in acciaio AISI 304, del diametro di 50 mm,

per una lunghezza totale della sezione di prova di 2193 mm. Tali segmenti attuati dalle cinghie di trasmissione erano posti su di una barra rettificata ad alta precisione, ± 0.025 mm, per assicurare la coassialità dei segmenti stessi, figura 1.3.2. Con l'impianto così strutturato, figura 1.3.3, si è proceduto alla realizzazione delle prove.

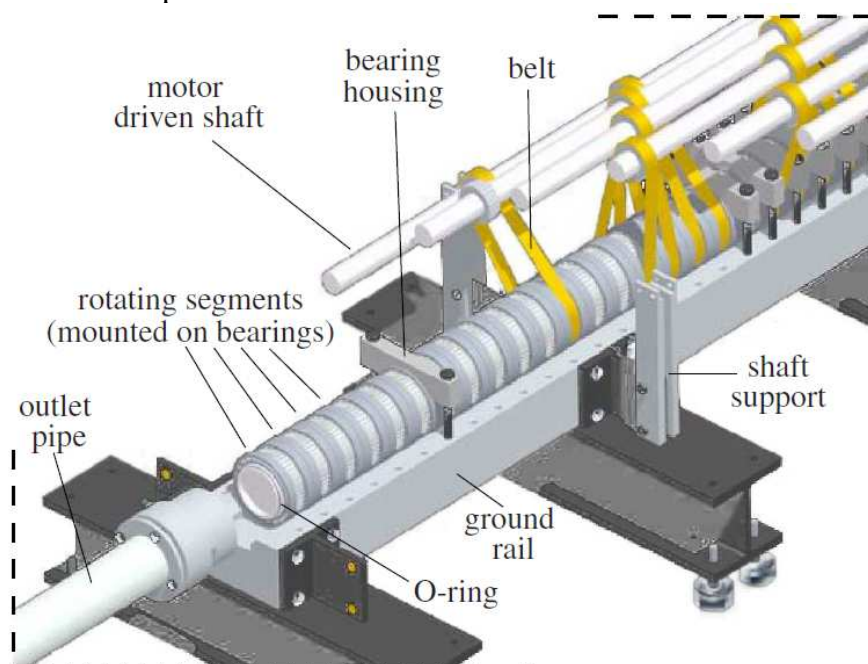


Figura 1.3.2: Schema di movimentazione dei segmenti rotanti

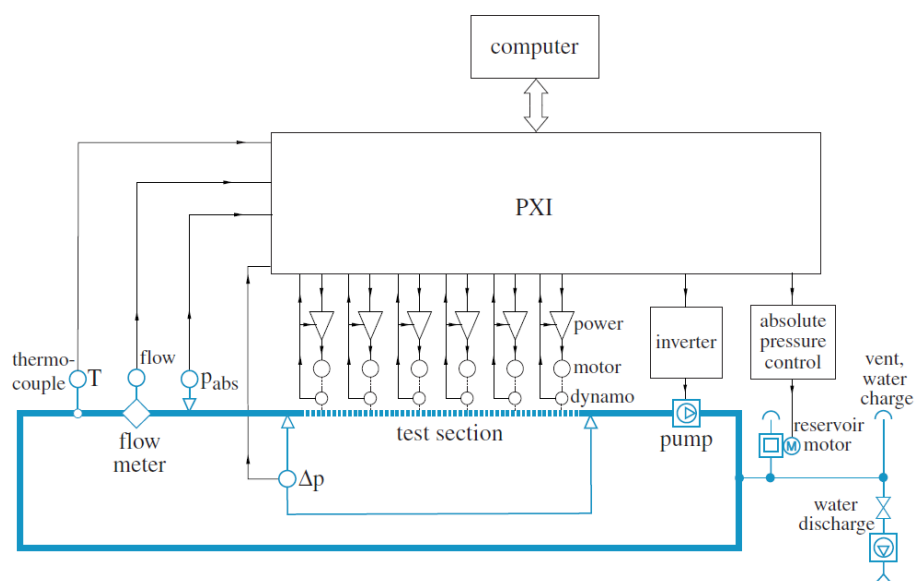


Figura 1.3.3: Schema generale dell'impianto

1.4 Risultati

La prova è stata eseguita con fluido acqua e Reynolds 4900. In tali condizioni era attesa una caduta di pressione pari a 10 Pascal. Per la misura di tale caduta di pressione è stato deciso di utilizzare un trasduttore di pressione $-200 \div +200 \text{ Pa} \pm 0.1\% \text{ F.S.}$ Si è deciso di provare la caduta di pressione attraverso tre differenti discretizzazioni della sinusoide, $s = 2, 3, 6$, così da poter creare differenti tipi di onde viaggianti e indagare differenti parti della mappa di drag reduction ottenuta con la DNS, figura 1.4.1.

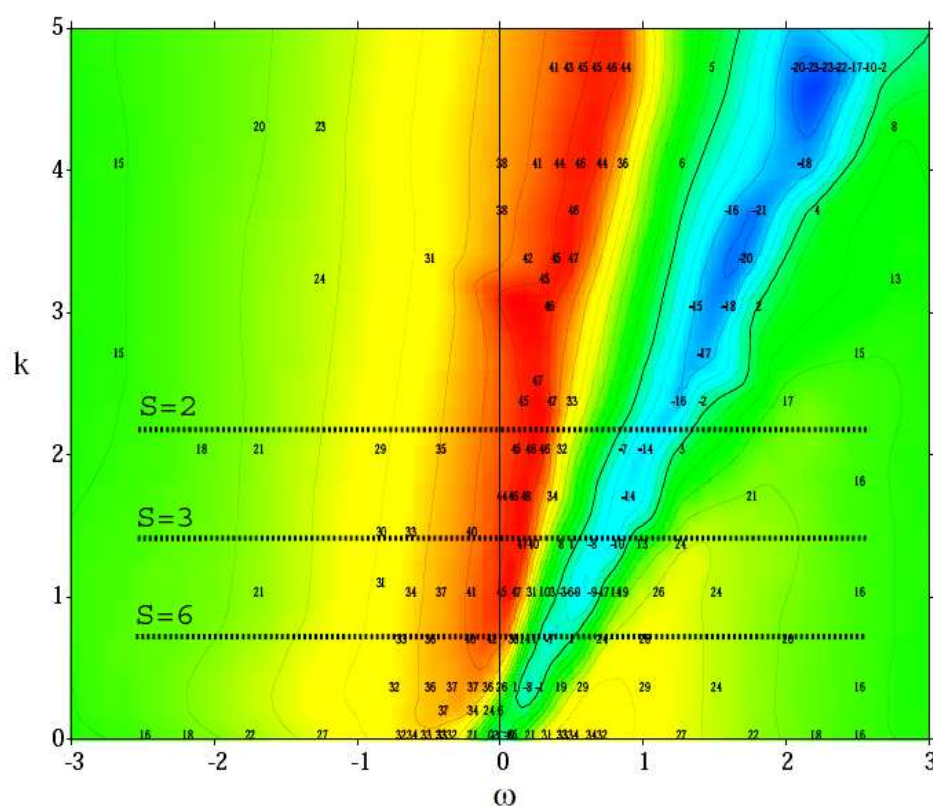


Figura 1.4.1: Mappa drag reduction, k - ω , con $s = 2, 3, 6$.

A tali differenti valori di s venivano realizzate diverse lunghezze d'onda λ e diversi valori di k , tabella 1.4.1, che permettevano di indagare diversi regimi di ω , tra cui, di prioritario interesse, il range $\omega = 0.02-0.025$ dove era predetta la massima riduzione del coefficiente di attrito. I risultati hanno portato alla verifica del funzionamento del fenomeno come predetto dalla DNS. I valori di riduzione del coefficiente di attrito sono stati leggermente inferiori rispetto alla previsione numerica, ma questo, oltre alla normale introduzione di possibili imperfezioni

dell'impianto, era anche determinato dal fatto che la DNS era stata eseguita su di un canale piano e non in un tubo a sezione circolare.

	λ [mm]	λ^+	λ/R	κ^+	κR
$s = 2$	73.1	511	2.92	0.0123	2.15
$s = 3$	109.6	766	4.38	0.0082	1.43
$s = 6$	219.3	1532	8.77	0.0041	0.72

Tabella 1.4.1: Variazioni della lunghezza d'onda al variare di s , numero di segmenti che ruotano in modo indipendente, utilizzati per la discretizzazione della sinusoidale.

Questa probabilmente è la principale causa della differenza tra i valori predetti e quelli misurati. Infatti tutto il fenomeno è dipendente dalla geometria del problema e variandone le caratteristiche in modo così determinante è plausibile che questa sia stata la causa dei differenti valori misurati. Ultimo ma non meno importante, bisogna considerare che, nonostante il nostro impianto ci permettesse di indagare i valori di $k-\omega$ desiderati, la nostra forzante sinusoidale rimane sempre una forzante discretizzata e quindi differente dalla teorica utilizzata nella DNS. In ogni caso i valori di riduzione di resistenza misurati sono stati di notevole interesse e si attestano a una riduzione di resistenza pari al 33%, figura 1.4.2, contro un valore del 48% predetto dalla DNS.

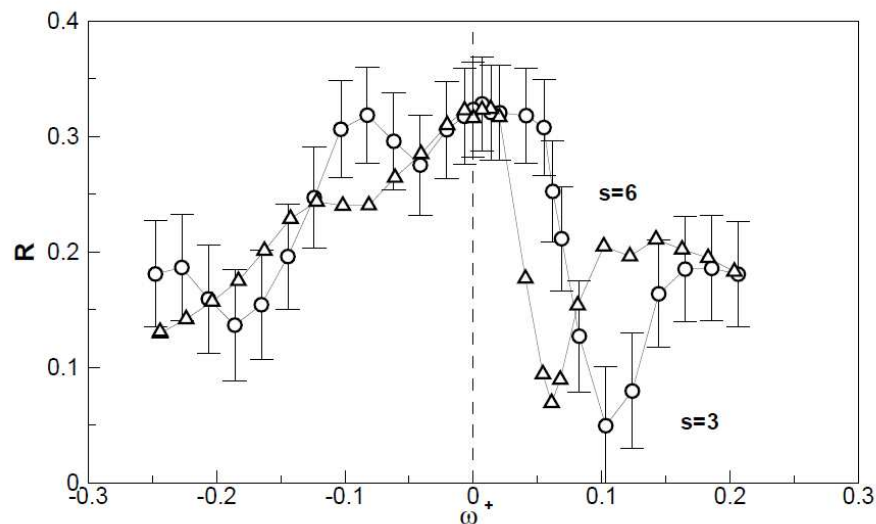


Figura 1.4.2: Riduzione di resistenza in funzione della frequenza di oscillazione, e per $s = 3$ (cerchi), $s = 6$ (triangoli)

Inoltre la realizzazione dell'esperimento ha portato anche altri risultati. Ha permesso di evidenziare un diverso comportamento nella realtà del fenomeno rispetto a quello predetto dalla DNS. Dai dati sperimentali si è visto come, analizzando anche la parte d'incremento di resistenza, il valore del coefficiente di resistenza, non supera il C_{f_0} , al contrario di quanto predetto dalla DNS; ancora, per valori di frequenza negativi, l'andamento del coefficiente di resistenza, soprattutto per $s = 6$, presenta un andamento irregolare non predetto dalla DNS, figura 1.4.3. Tali differenze di comportamento con buone probabilità sono date dalla presenza, nell'esperimento, di un transitorio all'inizio della sezione di prova. Proprio lo studio di tale transitorio sarà l'obiettivo del seguente lavoro di progettazione e realizzazione delle attrezzature al fine di poter introdurre una sonda a film caldo all'interno dell'impianto.

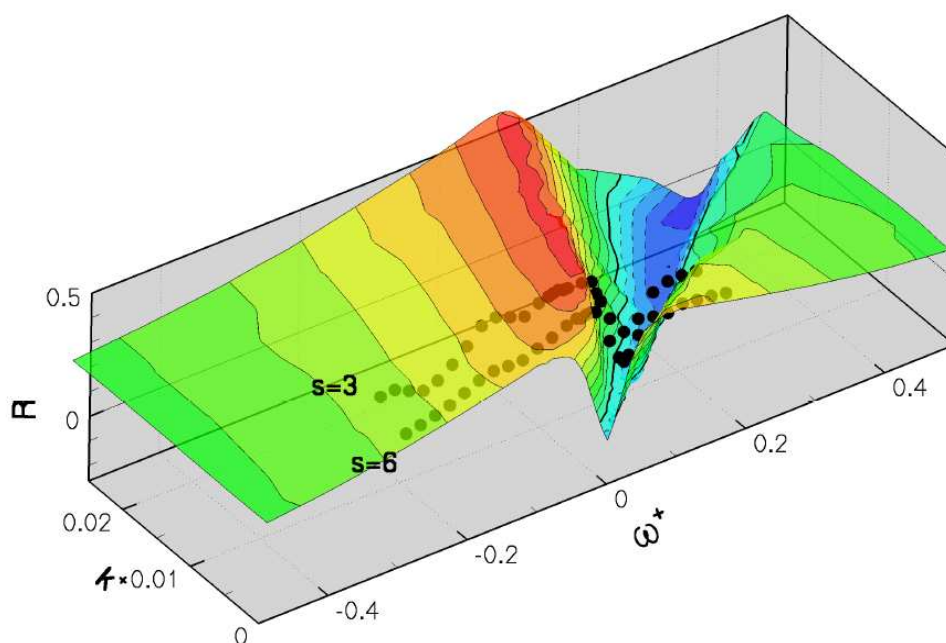


Figura 1.4.3: Confronto dati sperimentali con valori predetti dalla DNS

Capitolo 2

Progettazione attrezzature

2.1 Obiettivi

L'obiettivo del lavoro era realizzare un'attrezzatura che misurasse il transitorio del fenomeno di riduzione d'attrito precedentemente presentato. Per misurare il transitorio si è deciso di misurare le fluttuazioni di velocità attraverso l'utilizzo di una sonda a film caldo. Si è quindi proceduto allo studio di un set up dedicato all'integrazione della sonda all'interno dell'impianto già presente al fine di poter acquisire i dati necessari allo studio del fenomeno. Obiettivi principali della progettazione dell'equipaggiamento, figura 2.1.1, sono stati la precisione e ripetibilità del movimento e la completa smontabilità di tutta l'attrezzatura nel caso si volesse spostare la stessa in una parte differente del tubo o sostituire parti con altre più performanti o con caratteristiche differenti.

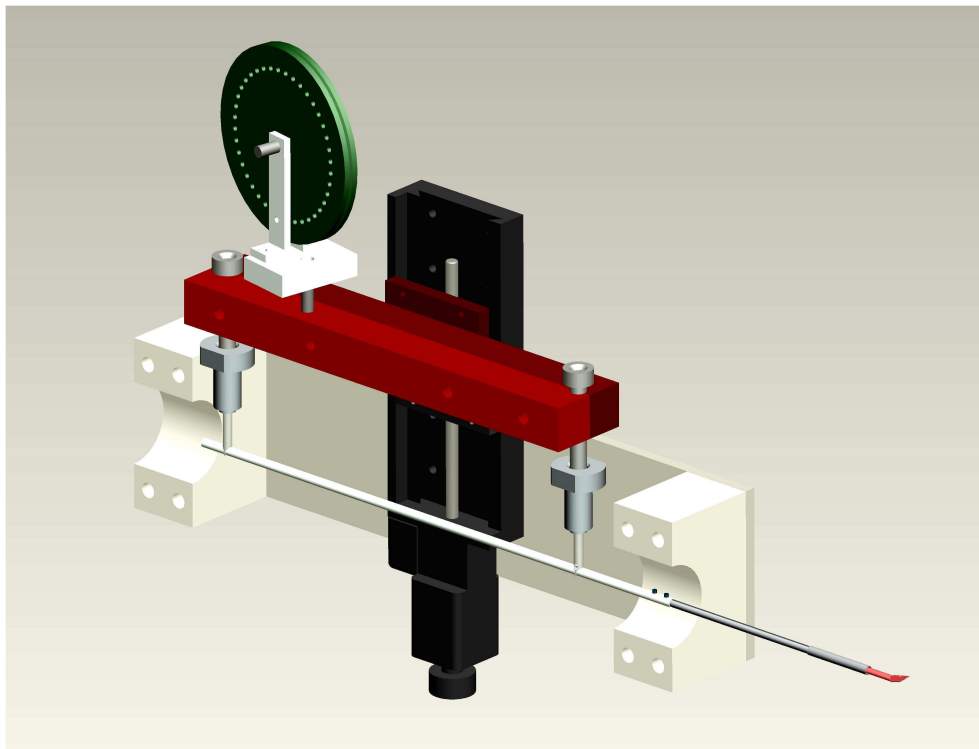


Figura 2.1.1: Rendering assieme nuova attrezzatura

2.2 Analisi del problema e soluzioni operative

La problematica principale era costituita dal dover realizzare una strumentazione che supportasse il film caldo e gli desse una possibilità di spostamento che permettesse l'indagine del transitorio del fenomeno per una lunghezza di 240/280 mm in direzione assiale, a step di 10 mm, e una distanza radiale di 25 mm, a step fino anche potenzialmente, se fosse stato necessario, di 0.01 mm. Appare subito lampante la complessità necessaria a realizzare tale movimentazione sui due assi considerando il fatto che ci troviamo a nostra volta all'interno di un tubo in cui scorre acqua. La problematica principale, infatti, non era tanto la movimentazione della sonda sugli assi, ma era la trasmissione della movimentazione nelle due direzioni all'interno del tubo dell'impianto con precisione e ripetibilità. Si è studiato un sistema di movimentazione per la sonda in direzione assiale e radiale. In direzione radiale si è considerato di voler realizzare un sistema che potesse porre la sonda in qualsiasi posizione da centro vena a parete, necessitando quindi di una possibilità di movimento minimo di 25 mm o superiore. Dato che l'unità di parete y^+ è pari a 0.015 mm, c'era la necessità di porre un sistema di movimentazione che potesse garantire una precisione di spostamento radiale che fosse alcune volte superiore all'unità di parete stessa al fine di poter indagare nel dettaglio le zone di maggiore interesse più vicine alla parete. Per risolvere questo problema si è scelto di utilizzare un motore passo passo di precisione OVIS con passo pari a 0.0025 mm così da poter garantire l'accuratezza dello spostamento e la possibilità di analisi di tutte le posizioni d'interesse. Per lo spostamento radiale si è deciso di voler indagare uno spazio pari a otto raggi, corrispondenti a 200 mm, e utilizzare un sistema di spostamento manuale di precisione. Si è considerato che in direzione assiale fosse sufficiente muoversi a step di 10 mm e non fosse necessario un sistema di controllo a computer. Infatti, mentre per ogni frequenza di sviluppo della riduzione d'attrito era necessario indagare diverse posizioni radiali e poter controllare lo spostamento della sonda e l'acquisizione dei dati all'interno del ciclo di sviluppo del fenomeno a diverse frequenze, in direzione assiale, lo spostamento doveva avvenire finito il ciclo di controllo sulle posizioni radiali e sulle frequenze dell'onda. Si è quindi considerato, per maggiore semplicità, di realizzare un sistema di spostamento manuale. Per ottenere tale spostamento è stata realizzata con la fresa a controllo numerico una ruota forata che avesse dei fori equispaziati alla distanza di 10 mm. A tale ruota è stato collegato un sottile trecciato in acciaio rivestito da una guaina che, collegato in modo solidale con l'albero di sostegno del porta sonda, ne permettesse lo spostamento attraverso il movimento della ruota forata e la conseguente trazione del trecciato a essa collegato, in contrasto alla forza di molle di ritorno poste sull'albero stesso. Per la ruota forata è stato studiato un supporto solidale con le clamp di sostegno e movimentazione dei supporti verticali che permettesse con una spina, inserita nei fori della ruota, e coassialmente in un alloggiamento

dedicato nel supporto ruota, di fissare la ruota nella posizione voluta e di tenere in trazione il trecciato, ottenendo di posizionare con precisione la sonda e poter realizzare spostamenti attendibili e ripetibili. Inoltre la trazione delle molle garantisce anche una tensione strutturale che favorisce la rigidità del sistema e ne limita eventuali oscillazioni. Per garantire un corretto funzionamento del sistema di ritorno e un corretto posizionamento della sonda, a seguito di diverse prove, è stato deciso di porre sull'albero di sostegno del porta sonda, due molle in serie. Una prima molla più corta e con un K elastico più alto, e, in sequenza, una molla più lunga con un K più basso. In questo modo la molla con il K elastico più alto garantisce sempre una forza di contrasto sufficiente a eseguire il ritorno in posizione della sonda e a vincere eventuali attriti che si possono formare nello scorrimento dell'albero su cui è posto il porta sonda; quella a K inferiore, spinta dall'altra, porta alle posizioni più lontane. L'albero di sostegno del porta sonda è costituito da un tubo in acciaio inox ed è stato riempito con resina epossidica caricata di modo da potervi fresare una scanalatura per mantenere la coassialità dell'albero con il tubo di alloggiamento ponendovi un grano da far scorrere all'interno della cava. Il tubo di alloggiamento, anch'esso in acciaio inox, con diametro interno 5 mm ed esterno 6 mm presenta due fori in corrispondenza dei supporti verticali di modo da poter permettere il passaggio al loro interno del cavo di trazione e del cavo elettrico. In corrispondenza di tali fori sono state realizzate al tornio due boccole con un diametro esterno di 110 mm e interno di 60 mm, con un foro filettato nella parte centrale per accogliere le gambe di supporto principali. Tali gambe di supporto, del diametro interno di 3 mm ed esterno di 5 mm, sono state filettate su entrambe le estremità al fine di poter essere avvitate, sul lato inferiore, alle boccole di cui sopra e, sul lato superiore, a dei supporti di connessione tra le gambe di sostegno verticali e le clamp di fissaggio al motore. Le clamp, ricavate dal pieno, vanno a strozzare i supporti verticali di modo da trasmettere loro la movimentazione del motore e sono fissate in modo solidale con la piastra d'interfaccia con il carrello del motore.

Ora bisognava considerare il fluido in utilizzo nell'impianto. Trattandosi di acqua con un battente di pressione leggermente superiore alla pressione esterna — realizzato per evitare tra filamenti di grasso verso l'interno dalla parte movimentata dell'impianto così che non fosse sporcato il fluido e non vi fossero impurità che potessero rovinare la sonda o depositarsi sulla stessa inficiando la precisione delle acquisizioni — bisognava studiare un sistema per trasportare il movimento assiale e radiale alla sonda facendo sì allo stesso tempo che non vi fosse fuoriuscita d'acqua dall'impianto.

Il primo passo è stato studiare come poter forare il tubo principale per potervi inserire i supporti verticali e realizzare un sistema solidale al tubo che garantisse la direzionalità dei supporti, senza far uscire acqua né dal tubo principale né dai supporti dell'albero stesso.

E' stato realizzato quindi un sistema di boccole che permettesse di far scorrere i supporti verticali dell'albero del porta sonda in tutta la loro corsa ma senza trafilature di acqua dal tubo, né fuoriuscite dovute al battente di pressione. Tale sistema è caratterizzato da una boccola principale con un innesto di diametro nominalmente uguale al foro realizzato sul tubo principale dell'impianto. Una volta posizionata e incastrata è stata fissata con del silicone sia per un discorso d'incollaggio, sia di tenuta a eventuali trafilature dovute a imperfezioni di lavorazione. All'interno di tale boccola femmina è stata realizzata una filettatura M18 così che potesse accogliere una seconda boccola maschio con un alloggiamento per un o-ring nella parte inferiore. In questo modo si dava la possibilità alla gamba di sostegno verticale dell'albero del porta sonda di poter scorrere all'interno del foro predisposto all'interno della boccola maschio, e coassialmente della boccola femmina, senza dar luogo a trafiletti o fuoriuscite di acqua poiché la tenuta era garantita dall'o-ring mandato in battuta all'estremità della boccola maschio, in una cava predisposta, dallo stringere dell'accoppiamento maschio-femmina delle due boccole. La realizzazione di tali boccole ha richiesto particolare attenzione giacché si è dovuto trovare la migliore soluzione per garantire la completa corsa delle gambe di sostegno dell'albero attraverso le boccole e allo stesso tempo realizzare delle parti leggere ed efficienti dal punto di vista meccanico. Infine è stato realizzato il porta sonda. Unica parte dell'attrezzature realizzata completamente a mano partendo dal pieno. Partendo da un piccolo parallelepipedo di alluminio vi sono stati fatti due fori, uno di alloggiamento dell'albero di sostegno, con un foro filettato M3 per il posizionamento di un grano che andasse a fermare l'albero, e un secondo foro per l'alloggiamento del porta sonda, anch'esso fermato con un grano M3. A seguito di un paio di tentativi non andati a buon fine si è deciso di dare a questo secondo foro un'inclinazione dell'asse rispetto a quella dell'albero che portasse ad alzare di 1 mm il porta sonda nella parte terminale del foro. In questo modo si garantiva un puntamento verso l'alto della sonda stessa, così che ci permettesse di andare a indagare con più precisione la zona di parete. Per motivi di sicurezza della sonda, per evitarne la rottura, il grano di fissaggio del porta sonda è stato dimensionato in modo che, in caso di erroneo comando al motore di spostamento verticale, nonostante un primo fondo corsa di sicurezza posizionato sulle gambe di supporto verticali, vi fosse anche un sistema di sicurezza locale che impedisse alla sonda di essere eccessivamente schiacciata verso la parete, cioè, dopo un primo contatto della sonda, necessario all'analisi a parete delle fluttuazioni, se fosse comandato un successivo spostamento verso l'alto della sonda, il grano andrebbe a toccare la

parete e proteggerebbe la sonda da una eventuale flessione o rottura. Per rendere solidale tutto il sistema con l'impianto sono state realizzate quattro grosse ganasce in alluminio che andassero a stringere il tubo principale dell'impianto e alle quali è stato fissato il motore con una piastra ben dimensionata.

2.3 Progettazione CAD

La progettazione CAD è stata una parte importante del lavoro, non solo per la realizzazione dei disegni necessari alla realizzazione a macchina di tutti i componenti, ma per le fasi di studio della realizzabilità dell'insieme delle parti, di eventuali necessità d'irrobustimento o alleggerimento dell'assieme oltre che, ovviamente, per lo studio della movimentazione di tutta l'attrezzatura e il controllo di eventuali interferenze nella movimentazione. In tutta la progettazione si è scelto di utilizzare accoppiamenti nominali per quasi tutte le parti al fine di evitare alcun tipo di gioco che potesse portare a vibrazioni o mancanza di precisione nella posizione. Attraverso l'utilizzo del software Pro Engineer si è quindi proceduto alla progettazione delle parti, alla verifica degli assiemi e della movimentazione e alla simulazione del posizionamento della nuova attrezzatura all'interno dell'impianto.

2.3.1 Albero principale

L'albero principale, figura 2.3.1.1, era la parte attorno alla quale si sviluppava tutta la progettazione dell'attrezzatura. Infatti su di esso vi è il porta sonda e quindi dalla movimentazione dell'albero principale dipendeva la movimentazione della sonda.

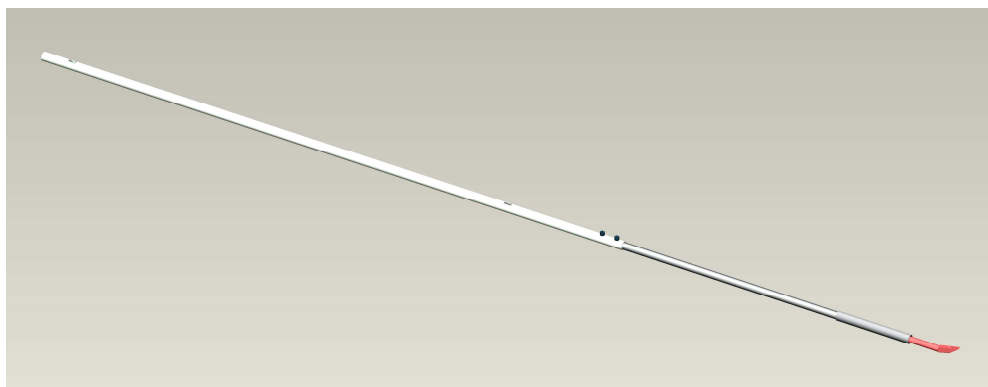


Figura 2.3.1.1: Albero principale

In primo luogo si è deciso di utilizzare acciaio inox sia per l'albero principale sia per il tubo che lo accoglieva. Questo ovviamente dettato dal lavorare immersi in acqua. L'albero principale è costituito da un tubo inox del diametro esterno di 5 mm e interno di 4 mm ed è stato riempito di resina epossidica caricata al fine di ottenere una maggiore rigidità, una lavorabilità del pezzo e una minore flessibilità. L'albero è stato posto all'interno di un tubo per potervi scorrere ed essere sostenuto, dato che a questo tubo di sostegno venivano poi innestate le boccole che si andavano a fissare in modo solidale con i supporti verticali. Per garantire il mantenimento della coassialità tra l'albero principale e il tubo di supporto nella movimentazione, sull'albero principale è stata realizzata una scanalatura con una fresa a controllo, al fine di creare una guida per un grano posto appositamente sul tubo di sostegno, figura 2.3.1.2. Al tubo di supporto sono stati realizzati due fori per permettere poi il passaggio del cavo di trazione dell'albero principale e del cavo elettrico.

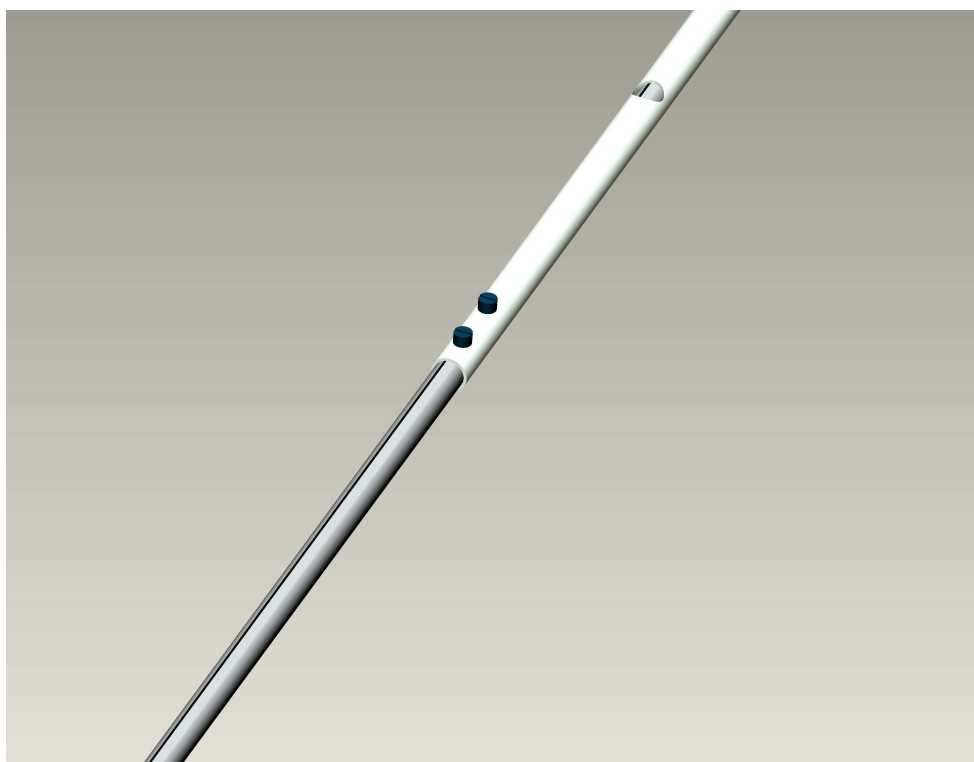


Figura 2.3.1.2: Dettaglio grani, guida assiale e foro elettrico

2.3.2 Supporti verticali

I supporti verticali erano un pezzo cruciale dal punto di vista strutturale e della movimentazione. Per questo si è deciso di realizzarli in acciaio con diametro esterno di 5 mm e interno di 3 mm di modo da poter avere una maggiore rigidità e poter filettare la parte inferiore e superiore per collegarle alle boccole sul tubo di sostegno dell'albero da un lato e alle guide di supporto verticale dall'altro. Il supporto anteriore era poi forato nella zona direttamente adiacente alle boccole di modo da poter permettere il passaggio del filo elettrico.

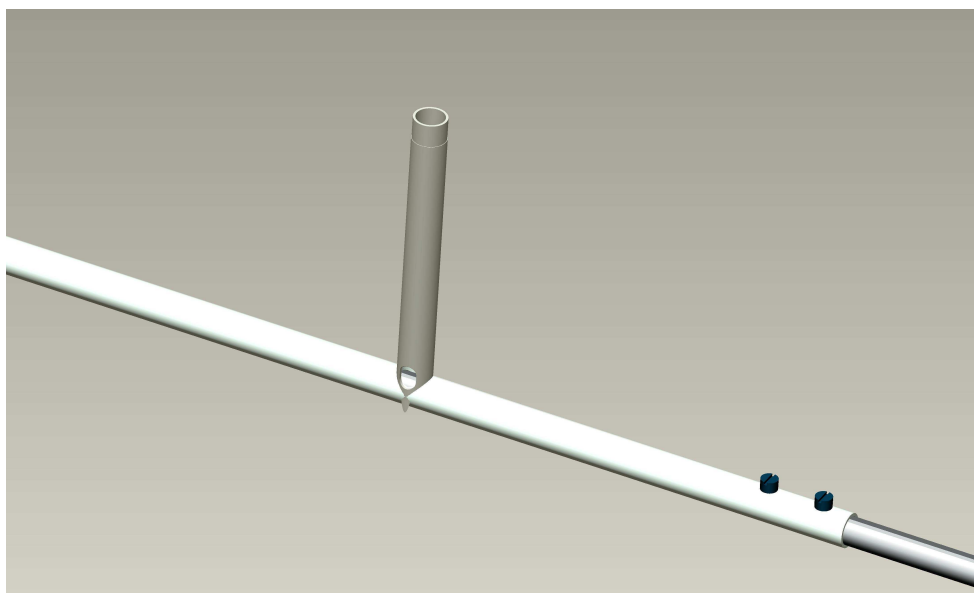


Figura 2.3.2.1: Supporto verticale anteriore

Come detto per rendere solidali tali supporti, e quindi la movimentazione del tubo principale con la movimentazione motore, sono state realizzate due gambe di supporto che filettate nella parte inferiore, andavano a fissarsi con i supporti verticali. Queste di dimensioni maggiori, 12 mm diametro esterno e 5 mm interno, sono il supporto di connessione tra motore e tubo interno, figura 2.3.2.2.

2.3.3 Sistema boccole tubo principale

Per evitare la fuoriuscita dell'acqua dall'impianto dai fori necessari all'entrata dei supporti verticali, e per dare un supporto strutturale ai supporti stessi, è stato progettato un sistema di boccole premistoppa che permettesse di collegarsi al tubo principale dell'impianto, in modo solidale per garantire la rigidità necessaria e vincolare gli spostamenti laterali e allo stesso tempo lasciare libero lo spostamento verticale e garantirne la guida e la direzione in direzione assiale, figura 2.3.3.1.

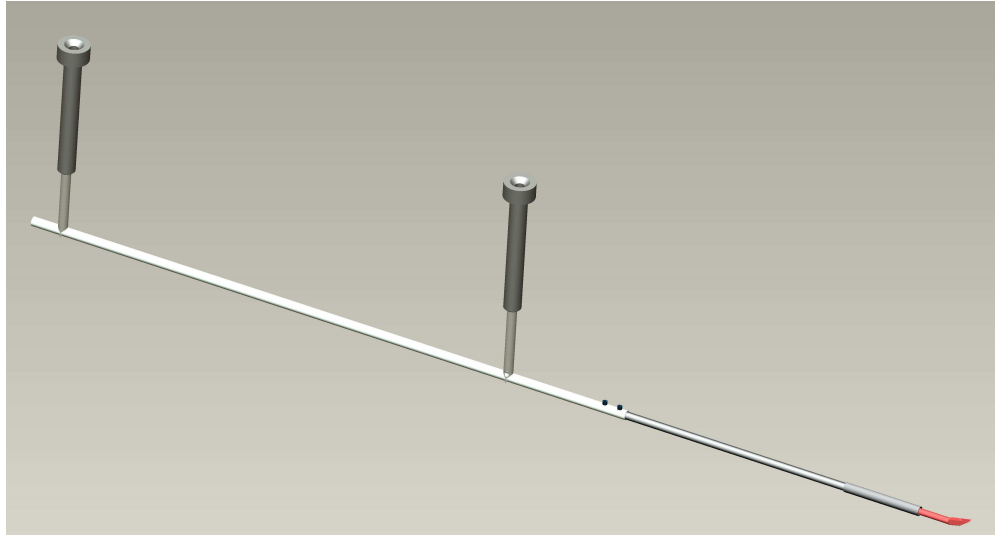


Figura 2.3.3.1: Supporti di connessione alle clamp motore

La guida in direzione assiale era data dai supporti verticali d'interfaccia motore che, scorrendo all'interno di una cava nella boccia superiore, garantivano la corretta guida del movimento alle gambe di supporto verticale. La boccia inferiore invece era fissata al tubo principale, figura 2.3.3.2.

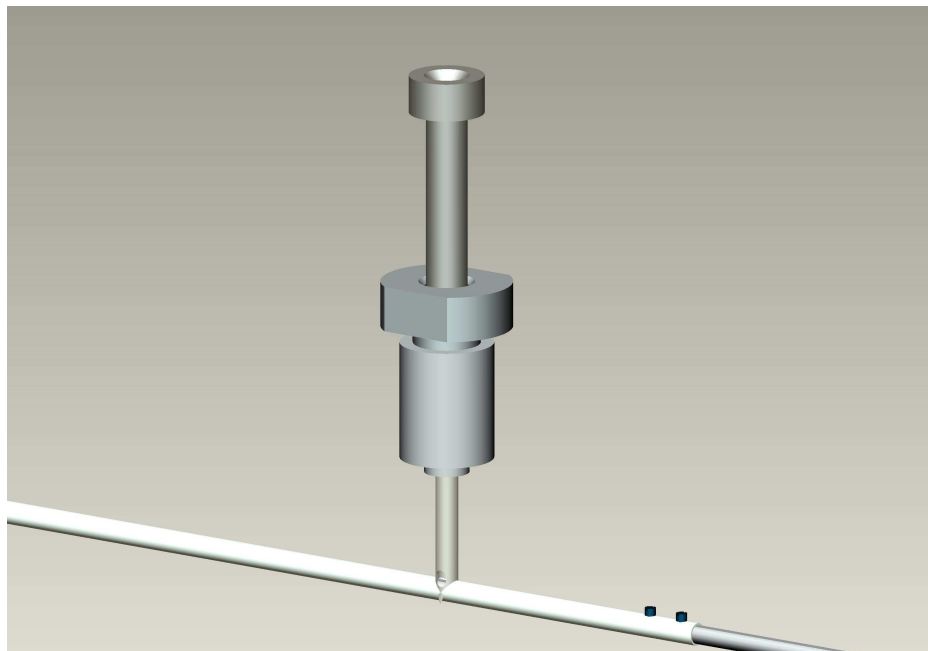


Figura 2.3.3.2: Sistema boccia premistoppa

L'accoppiamento delle due boccole, dato da una filettatura M18, andava a rendere solidale il sistema e a schiacciare un o-ring in una precisa cava di alloggiamento, che, andando in tenuta, impediva il trafilamento di acqua dal foro dedicato allo scorrimento delle gambe di supporto verticali, figura 2.3.3.3.

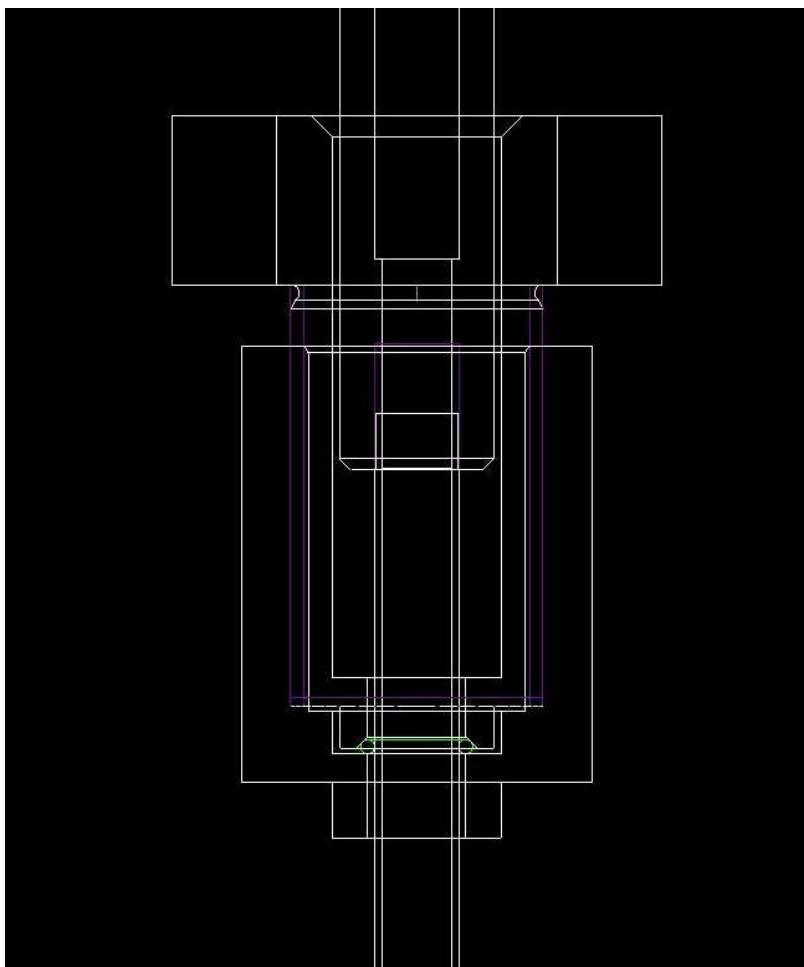


Figura 2.3.3.3: Sistema boccola premistoppa

2.3.4 Sistema interfaccia motore

Il sistema d'interfaccia con il motore OVIS passo passo per lo spostamento verticale era costituito da una due clamp che andavano a fissare in modo solidale le gambe di trazione verticale dei supporti attraverso il fissaggio di quattro viti M8. In fase di sperimentazione si è poi visto che anche solo due erano sufficienti e si è quindi scelto di non porre le altre due per non appesantire l'attrezzatura. E' stata poi studiata una piastra d'interfaccia tra le clamp e il motore, figura 2.3.4.1.

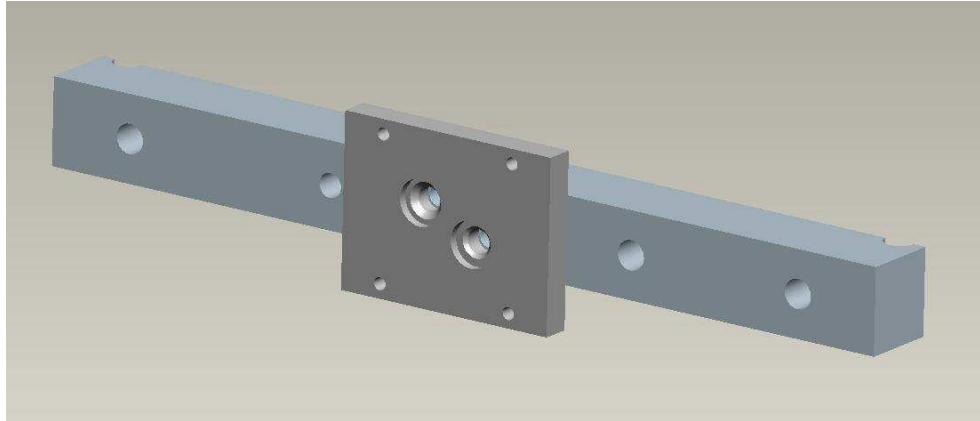


Figura 2.3.4.1: Piastra d'interfaccia motore e clamp interna

Attraverso la piastra, le clamp erano fissate in modo solidale con il motore, che, fissato poi all'impianto, figura 2.3.4.2, permetteva lo spostamento radiale della sonda con un controllo di precisione di 0.0025 mm/passaggio. Per sviluppare l'interfaccia con il motore è stato quindi necessario realizzare il modello del motore 3d in tutte le sue parti. Sia per l'interfaccia con le clamp, sia per l'interfaccia con l'impianto e lo studio degli ingombri. La clamp esterna è stata poi rifinita con la realizzazione di un foro filettato M8 che permettesse il montaggio del sistema di spostamento assiale dato dalla trazione del trecciato in acciaio attraverso la ruota forata realizzata con una fresa a controllo numerico.

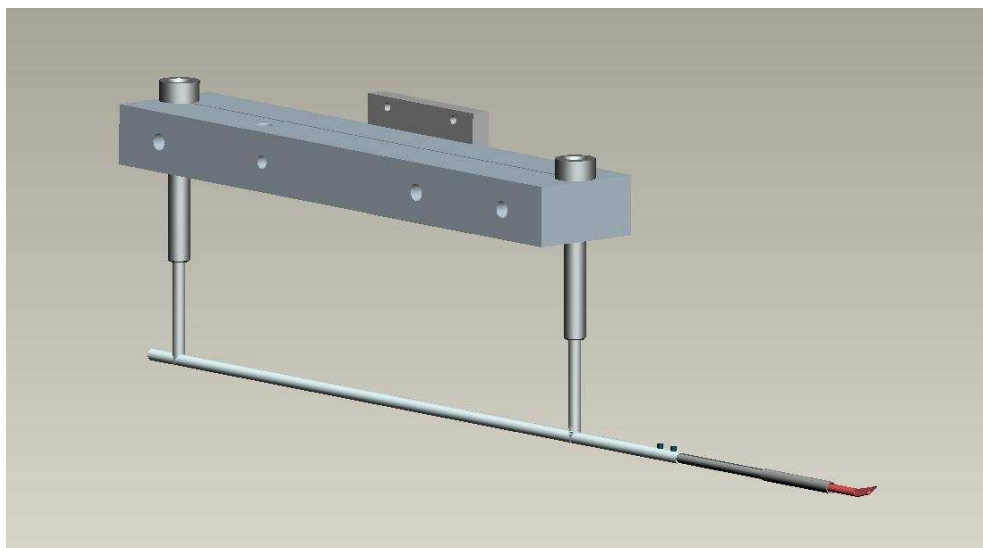


Figura 2.3.4.2: Sistema interfaccia motore

2.3.5 Sistema di trazione

Il sistema di movimentazione dell'albero in direzione assiale è stato realizzato attraverso il posizionamento di molle di contrasto sull'albero principale e in contrapposizione la trazione dell'albero attraverso un trecciato in acciaio. Le molle poste sull'albero andavano in battuta da un lato sul tubo di sostegno dell'albero, dall'altro sul porta sonda stesso. Sono state studiate e sviluppate diverse molle e combinazioni di molle così da poter utilizzare in modo differente l'attrezzatura avendo corse dell'albero differenti. Alla fine la miglior configurazione, in base alle esigenze delle prove da eseguire, è stata trovata combinando due molle: una più corta con un fattore elastico molto alto che garantisse di mantenere sempre in trazione l'albero e aiutasse l'altra molla a vincere gli attriti e gli spunti nell'estensione, e una seconda molla con un fattore elastico più basso ma di maggiore lunghezza. In questo modo si è ottenuto di avere 240 mm di corsa di cui 210 mm con le molle già a un livello di tensione che ci desse la sicurezza del posizionamento. Per la trazione è stata realizzata alla fresa a controllo numerico, una ruota con una guida per il trecciato e quaranta fori equispaziati a 10 mm di distanza uno dall'altro sulla circonferenza, figura 2.3.5.1.

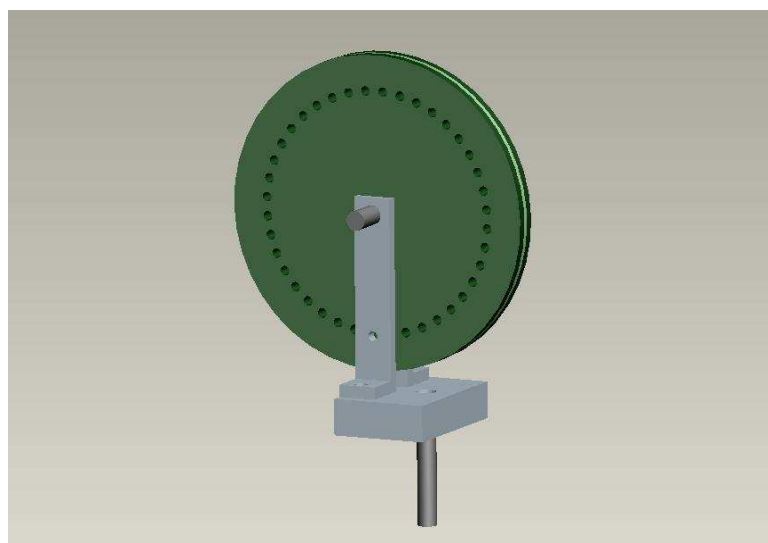


Figura 2.3.5.1: Ruota forata e supporto d'installazione

E' stato quindi studiato un supporto per la ruota che permettesse attraverso il posizionamento di una spina, di bloccare la rotazione della ruota nella posizione voluta. In tal modo ruotando in senso orario la ruota si esercita una trazione sul trecciato, e , ponendo la spina di fissaggio, si blocca il ritorno della ruota, dato dalle molle poste sull'albero, nella posizione voluta. E' stata quindi realizzata un'interfaccia con la clamp esterna di fissaggio dei supporti verticali. Infatti la ruota forata doveva spostarsi in direzione radiale con tutto il gruppo albero e

sonda, in quanto si voleva mantenere una determinata posizione assiale per diversi spostamenti radiali, figura 2.3.5.2. Infine nell'assemblaggio della ruota e dei suoi supporti si è fissata la ruota su una barra filettata in modo che il cavo di trazione entrasse direttamente sull'asse del foro del supporto verticale senza dare luogo ad attriti o angoli che potessero inficiarne il funzionamento o portarlo a rottura, figura 2.3.5.3.

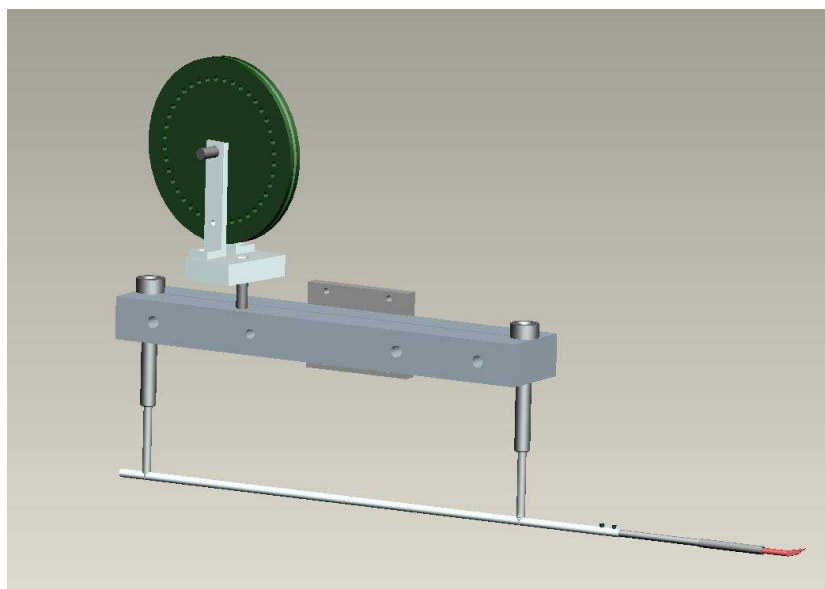


Figura 2.3.5.2: Assieme attrezzatura con sistema di spostamento assiale

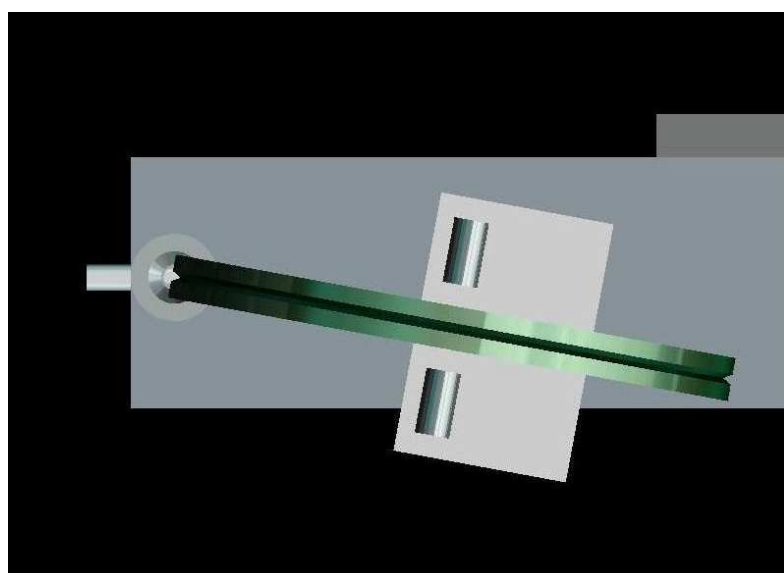


Figura 2.3.5.3: Dettaglio coassialità asse supporto verticale – asse guida trecciato

2.3.6 Interfaccia tubo impianto

Per l'interfaccia dell'attrezzatura con il tubo principale dell'impianto sono state realizzate delle ganasce di grosse dimensioni di modo da potersi fissare sul tubo e potervi fissare il motore, figura 2.3.6.1. Il sovradimensionamento delle ganasce è stato scelto per poter scaricare su di esse la forza necessaria al motore per la movimentazione delle clamp e perché sostenessero il peso stesso del motore. Una volta realizzato il modello 3D del motore per studiarne eventuali interferenze con l'impianto si è deciso di porlo in posizione rovesciata. A seguito di questo si è proceduto con l'integrazione all'impianto principale.

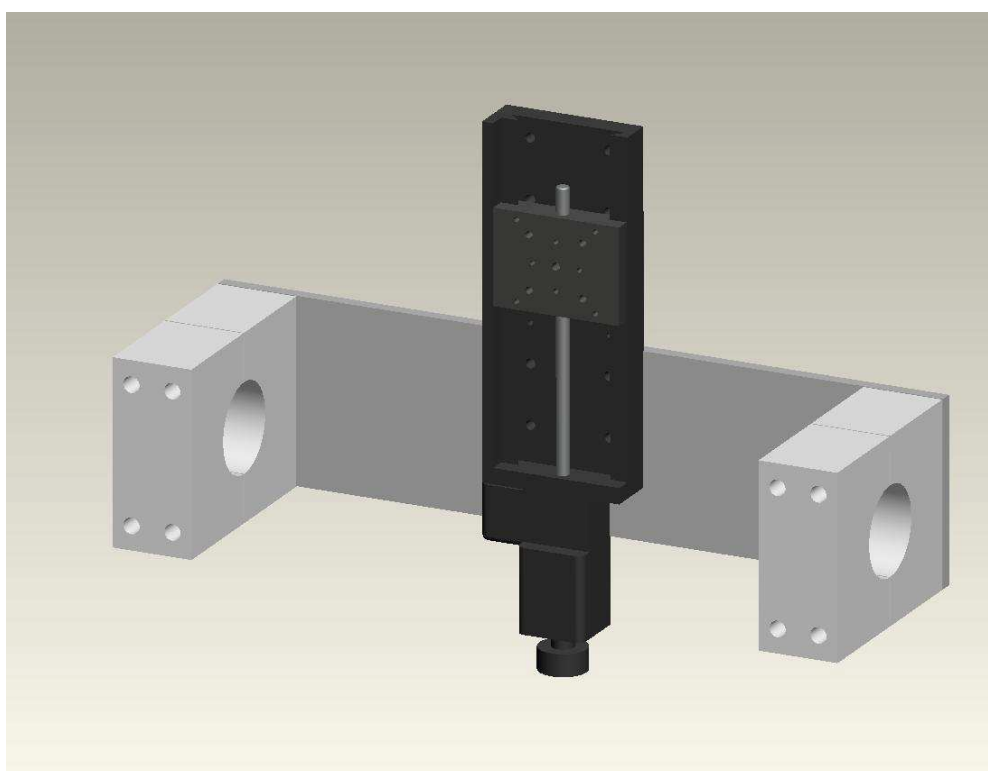


Figura 2.3.6.1: Blocco motore e interfaccia con il tubo principale

2.3.7 Integrazione attrezzature nell'impianto principale

L'integrazione con l'impianto principale, da cui si era partiti per studiare come risolvere il problema, è stata realizzata in funzione della zona da indagare con le prove, figura 2.3.7.1, 2.3.7.2. Infatti si è forato il tubo principale dell'impianto per porvi le boccole del sistema premistoppa, di modo che la sonda andasse ad indagare l'ultimo segmento della sezione di prova e rientrasse nel tubo principale per 170 mm, zona d'indagine ritenuta sufficiente dalle previsioni CFD.

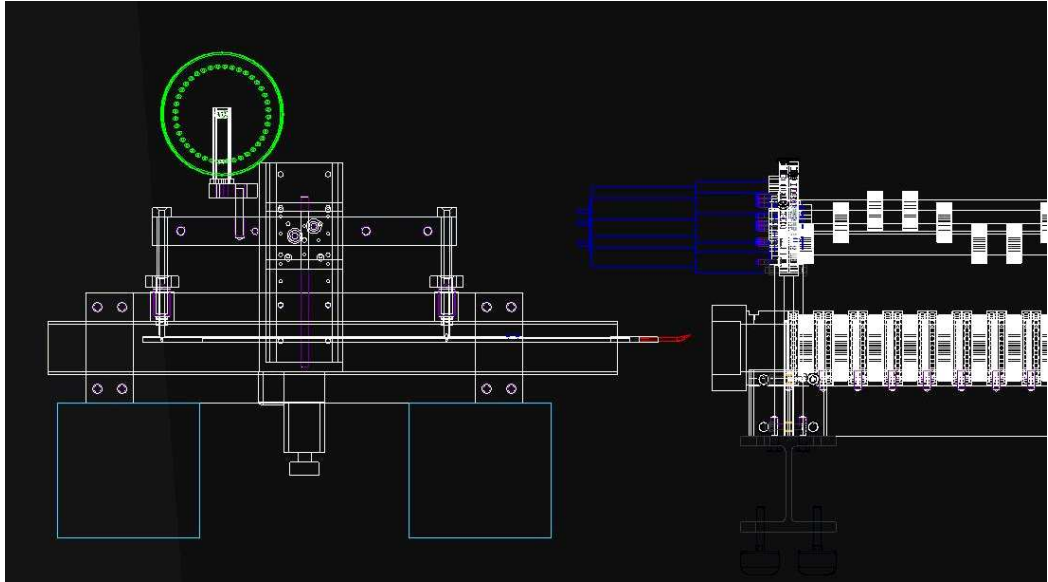


Figura 2.3.7.1: Studio posizionamento attrezzatura

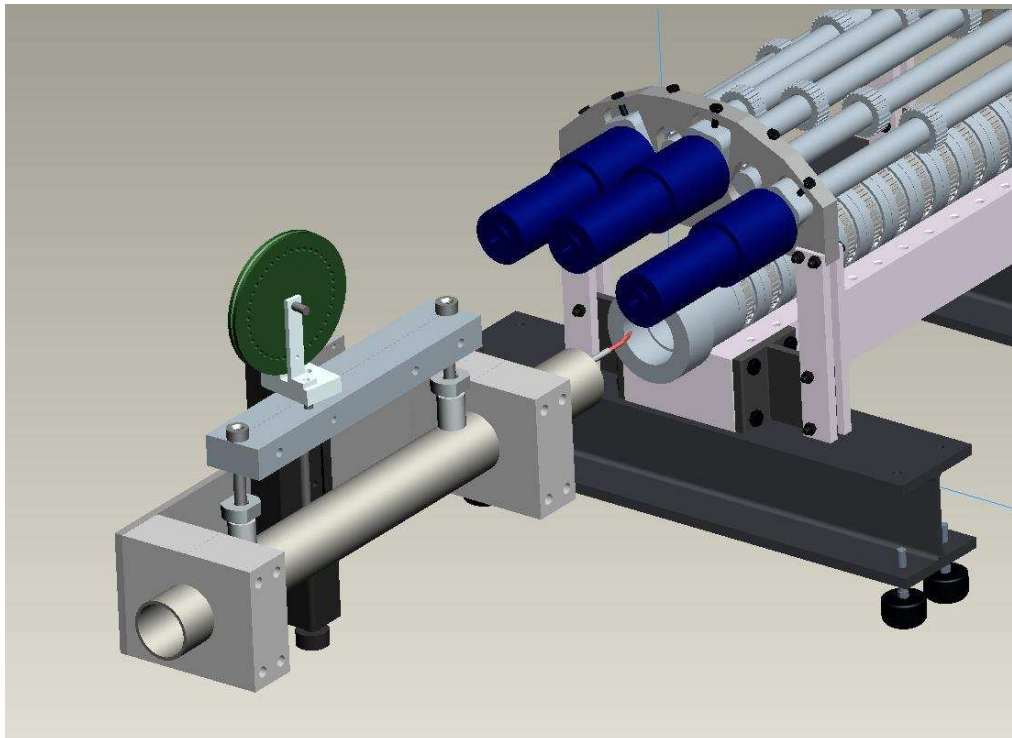


Figura 2.3.7.2: Studio posizionamento attrezzatura

2.4 Realizzazione parti

A seguito della progettazione si è passati alla realizzazione delle parti. Tutte le parti sono state ricavate dal pieno, realizzate a macchina con controllo di misura. Nulla è stato lasciato al caso perché gli accoppiamenti, per evitare giochi, sono stati considerati nominali per quasi tutte le parti dell'impianto. Si è quindi proceduto alla realizzazione delle parti seguendo lo schema di progettazione e provando di volta in volta gli accoppiamenti e le movimentazioni. Sono stati realizzati quindi gli alberi, il tubo portante e le gambe di supporto verticale, figura 2.4.1.

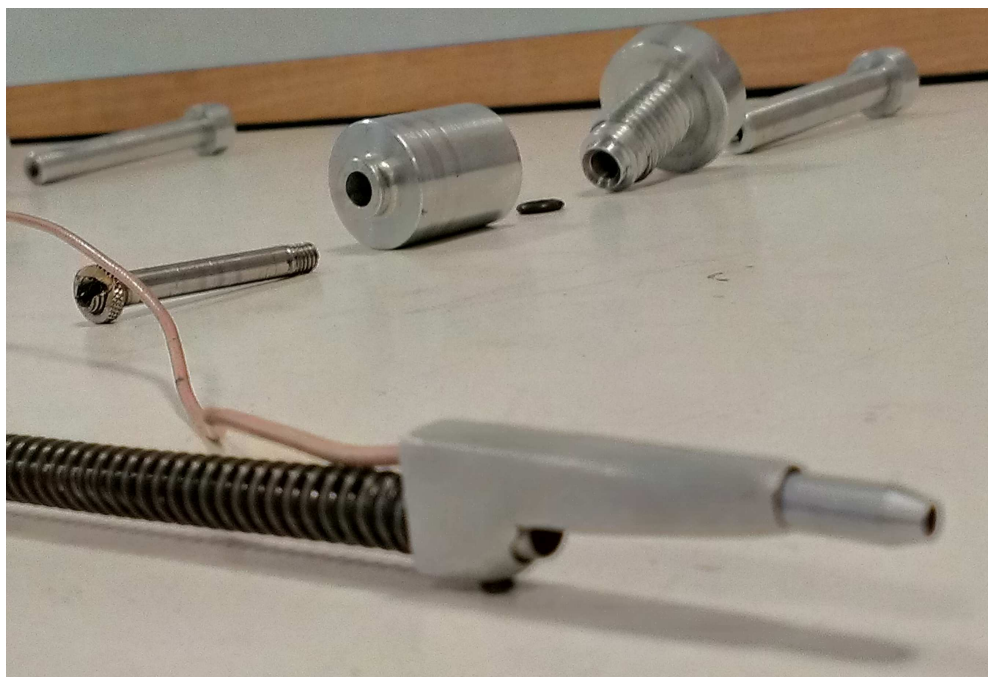


Figura 2.4.1: Assieme di alcune delle parti

Le gambe di supporto verticale realizzate in acciaio con spessore di 2 mm sono state filettate a mano sul tornio di precisione. Per garantirne la tenuta sulle boccole e per realizzare uno spessore che facesse da fondo corsa è stata posta una piccola ghiera per mandare in tenuta la filettatura e creare un blocco in movimentazione radiale, figura 2.4.2. In seguito sono state realizzate le boccole di collegamento al tubo di sostegno dell'albero con i fori filettati per l'alloggiamento delle gambe verticali. Nella fase di realizzazione sono anche state apportate alcune migliorie al progetto.



Figura 2.4.2: Gamba di supporto posteriore

Ad esempio per evitare la rottura del trecciato in acciaio rivestito da una guaina protettiva, è stato deciso, di porre un tubicino in gomma per facilitarne lo scorrimento ed evitare che la guaina si bloccasse sullo spigolo vivo della lavorazione, figura 2.4.3. In questo modo il trecciato poteva scorrere all'interno del tubicino e andare in trazione senza problemi anche dovendo affrontare la curva a gomito dalla gamba di supporto verticale all'interno del tubo di supporto dell'albero. Per quanto riguarda la boccia anteriore si è eseguito un lavoro di fino per facilitare il montaggio. Dopo aver realizzato la boccia, è stato asportato del materiale sia dalla gamba di sostegno anteriore che dalla relativa boccia, figura 2.4.4. Questo per ricavare uno spazio per il passaggio del filo elettrico. In questo modo in fase di montaggio, dovendo lavorare solo attraverso il foro anteriore sul tubo principale, si poteva andare a porre la gamba di sostegno con il filo elettrico all'interno della filettatura, ed eseguendo solo un quarto di giro si mandavano in tenuta contro la ghiera tre giri di filetto, più che sufficienti per garantire la resistenza strutturale. A seguito dell'accoppiamento gambe - bocce è stato realizzato il sistema bocce premistoppa d'interfaccia con il tubo principale.

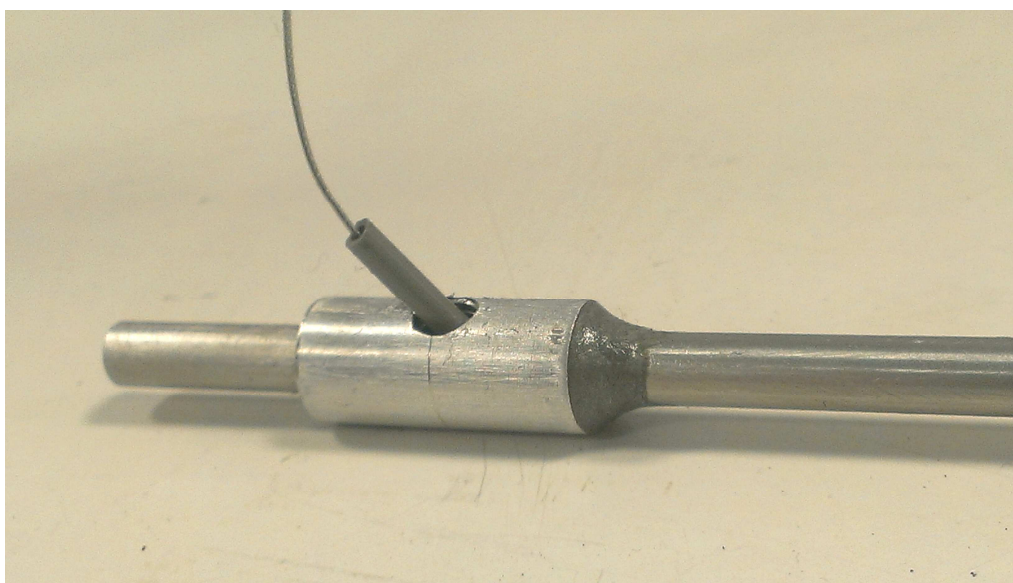


Figura 2.4.3: Boccola di supporto posteriore



Figura 2.4.4: Boccola di supporto anteriore

Il risultato è stato soddisfacente, in quanto, nel progredire della realizzazione delle parti, lavoro che ha impegnato mesi, testando di volta in volta gli accoppiamenti di ogni parte e verificandone la movimentazione e il gioco, non sono stati riscontrati particolari problemi e gli assemblaggi parziali di verifica erano tutti coerenti, figura 2.4.5.

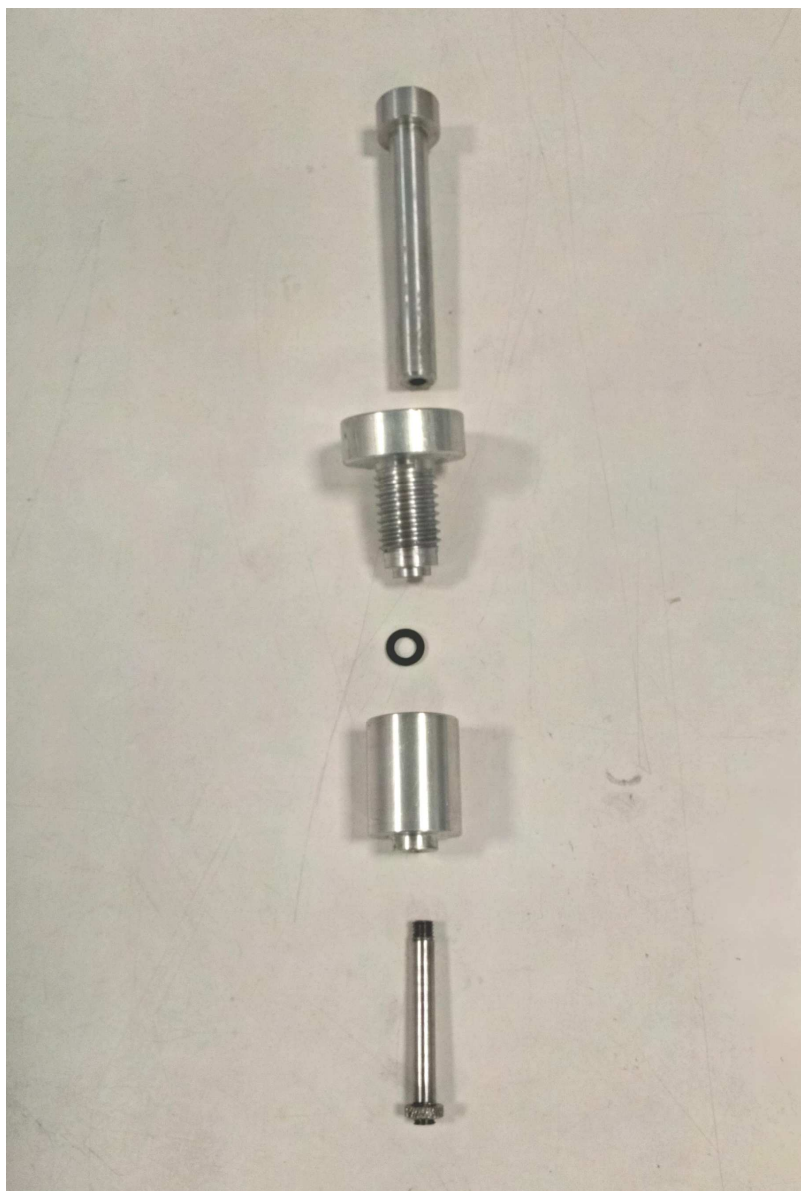


Figura 2.4.5: Sistema boccole di supporto anteriori

2.5 Integrazione con l'impianto presente

Prima del montaggio si è proceduto a integrare alcune modifiche all'impianto per ottimizzarlo con le necessità delle prove. In primo luogo si è sostituito il vaso di controllo per il controllo del battente di pressione interno, figura 2.5.1.

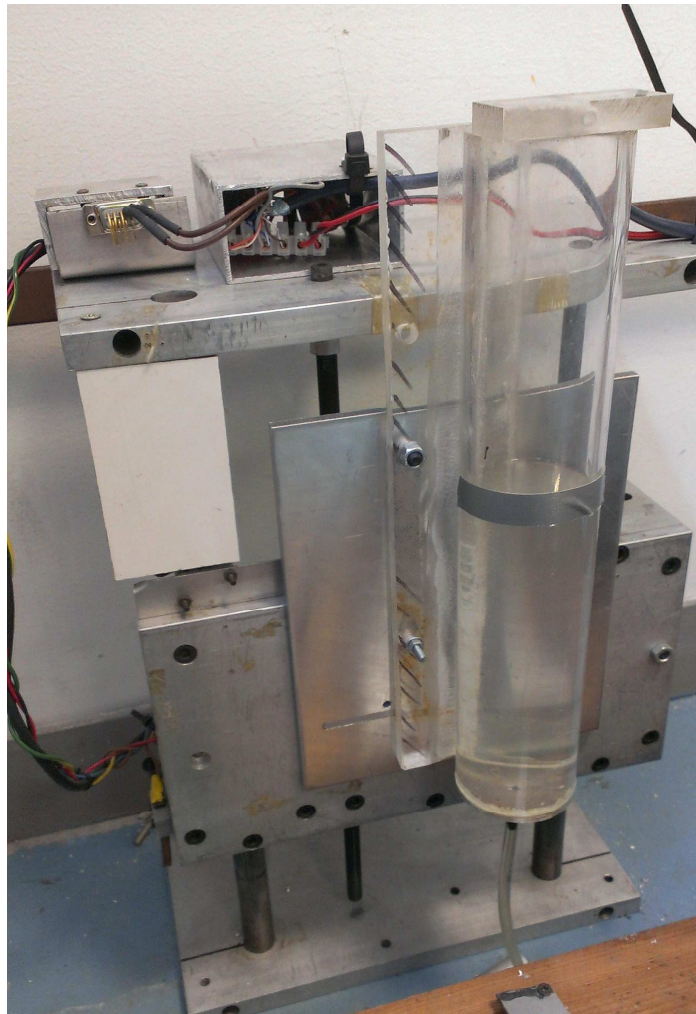


Figura 2.5.1: Vaso espansione con traverso motorizzato

Il precedente sistema di controllo della sovrappressione, nella precedente versione, era costituito da un traverso a controllo in posizione con un complesso sistema di monitoraggio in retroazione in base alla pressione ambiente. E' stato sostituito con un più semplice traverso a motore controllato solo con un sistema di spostamento del tipo accensione - spegnimento che garantisce il battente di

pressione necessario con una semplice movimentazione da un limite inferiore a un limite superiore. Tale traverso serve a garantire che all'interno del tubo vi sia un battente di pressione superiore a quello ambiente. In questo modo si garantisce che non vi siano depressioni all'interno della camera di prova che aspirino il grasso presente tra i segmenti all'interno del fluido, evitando così di sporcarlo e quindi di sporcare la sonda a film caldo o, peggio, romperla. Per integrare il controllo della movimentazione del traverso è stato realizzato un piccolo circuito con due relè che associati a un canale dedicato sul case di controllo, il PXI 1010 della National Instruments. Alla chiusura di un relè viene comandata la direzione del movimento e, alla chiusura dell'altro relè, viene comandata l'attivazione del motore. Fatto questo è stato integrato il sistema di controllo del motore di spostamento verticale dell'attrezzatura. Tale motore in teoria necessitava di una scheda propria di controllo con un sistema di connettore dedicato che realizzasse la sinusoide di controllo del movimento e gestisse la direzione di movimentazione. Per evitare di rendere più complesso l'insieme di computer hardware e di controllo software, si è deciso di controllare il motore creando un connettore dedicato che s'interfaciasse con il PXI e, sfruttando i bit necessari al clock e alla direzione, controllasse il motore direttamente da una scheda di output del PXI e fosse immediatamente integrato nel sistema. Determinati quindi i canali dei bit necessari, è stato creato un connettore che fornisse direttamente i bit dal PXI al controllo del motore. A tale connettore è stato anche assegnato il controllo dei relè del traverso visto sopra, figura 2.5.3. Infine è stato realizzato anche il connettore al case di controllo del motore per interfacciarsi col sistema creato col PXI, figura 2.5.2.

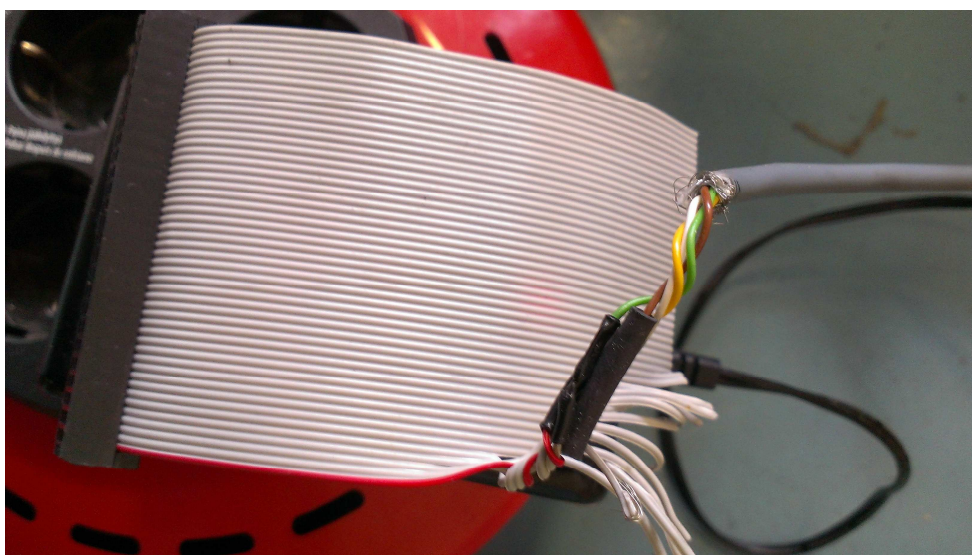


Figura 2.5.2: Connettore controllo motore OVIS

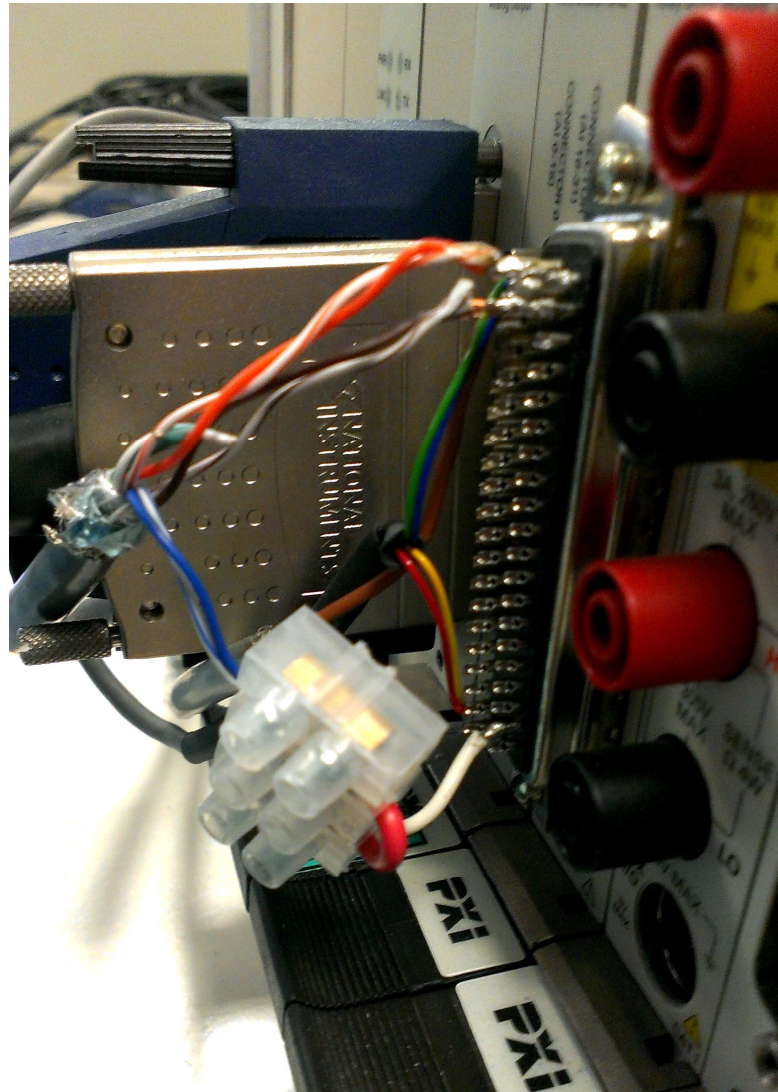


Figura 2.5.3: Connettore controllo motori e relè su PXI

Infine, ma più importante, all'impianto è stato aggiunto il sistema di acquisizione del film caldo. Per l'acquisizione del segnale del film caldo è stato deciso di utilizzare il sistema Aalab. Un case con un sistema di controllo del segnale manuale a pannello, dal quale, come vedremo in seguito, era possibile bilanciare il ponte della sonda, stabilire un offset e un guadagno e volendo ancora amplificare il segnale. Sul monitor viene mostrato il segnale acquisito real time di modo da poter controllare l'acquisizione e meglio monitorare la prova, figura 2.5.4. Il segnale acquisito entrava anch'esso dal sistema Aalab al PXI nella scheda d'input per andare a interfacciarsi alla CPU di controllo di tutto l'esperimento.



Figura 2.5.4: Case Aalab di acquisizione del film caldo

Capitolo 3

Procedure operative

3.1 Manutenzione impianto

Dato il lungo periodo di inattività trascorso dalle precedenti prove, è stata realizzata una manutenzione generale dell'impianto. E' stato completamente smontato e pulito in tutte le sue parti. Sono stati smontati e puliti i tubi in alluminio precedenti e successivi la sezione di prova, i tubi flessibili di chiusura del circuito e tutti e sessanta i segmenti della sezione di prova. Per la pulizia interna dei tubi in alluminio e di quelli flessibili è stata eseguita la pulizia attraverso la trazione di uno straccio con un filo metallico rivestito tipo elettrico. Per quanto riguarda i segmenti, il lavoro è stato decisamente più lungo e complesso. Sono stati smontati tutti i segmenti della sezione di prova e tutte le selle di fissaggio dei segmenti mantenendone l'ordine, figura 3.1.1.



Figura 3.1.1: Segmenti sezione di prova

Infatti, ogni sella è stata rifinita ad hoc per il segmento che doveva fissare. Questo perché nella fase di montaggio le selle non devono andare a interferire con le cinghie di trasmissione, pena il malfunzionamento della rotazione del segmento e il rischio di rottura della cinghia stessa. Le sezioni una volta smontate, sono state

tutte analizzate visivamente e al tatto e sono state rettificate laddove fosse necessario, figura 3.1.2. Se all'ispezione visiva e tattile si riscontrava anche la minima imperfezione, questa, con l'ausilio di diverse grammature finissime di carta vetrata, venivano eliminate e veniva ricostituita la necessaria finitura superficiale. In particolare si è posta molta attenzione alla zona di contatto tra le sezioni: tali zone, che teoricamente non dovrebbero essere in contatto, ma distanti 0.05 mm, potevano presentare segni attrito dovuti a contatti non previsti durante la movimentazione di rotazione tra le stesse. Tali imperfezioni, se non eliminate immediatamente, porterebbero, quasi con certezza, al grippaggio della sezione in questione con conseguente successiva impossibilità di movimento. Allo stesso tempo si è posta molta attenzione a eventuali imperfezioni sui bordi delle sezioni. Tali imperfezioni di spigolo nella parte interna potrebbero causare variazione delle condizioni al contorno a parete e dar luogo a fenomeni di turbolenza localizzata che potrebbero rovinare lo strato limite e quindi lo sviluppo dell'onda viaggiante e i risultati delle prove.



Figura 3.1.2: Segmento sezione di prova a seguito della manutenzione

Una volta terminata la fase di eliminazione delle imperfezioni superficiali tutte le sezioni sono state ripulite dal vecchio grasso presente nelle zone di contatto e nei

cuscinetti. Terminato il lavoro sui cuscinetti e sull'interno delle sezioni sono stati ingrassati tutti gli alberi di trasmissione del movimento. Tale rivestimento di un sottile strato di grasso serve non soltanto per facilitare la movimentazione nei punti di contatto e sostegno degli alberi stessi, ma soprattutto per preservare il materiale dagli agenti esterni. Allo stesso tempo e per le stesse ragioni è stata ingrassata anche la barra rettificata sulla quale appoggiano i cuscinetti delle sezioni di prova, figura 3.1.3, fondamentale per mantenere il corretto allineamento assiale e orizzontale di tutta la sezione di prova.

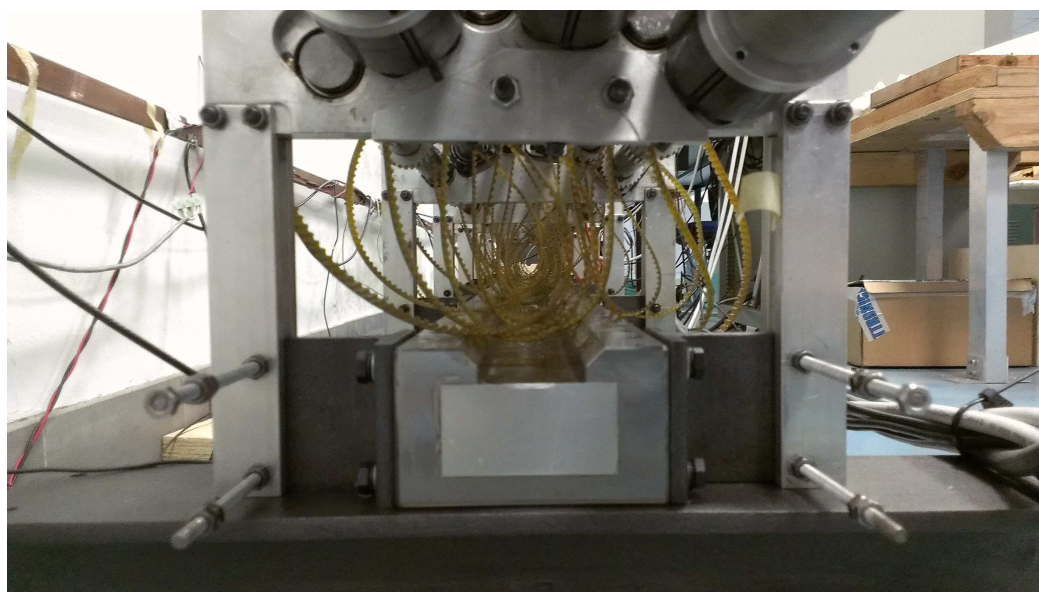


Figura 3.1.3: Barra rettificata, asse camera di prova

Successivamente alla manutenzione delle sezioni e degli alberi si è proceduto alla manutenzione del giunto necessario alla protezione catodica dell'impianto e allo svuotamento. Tale giunto realizzato in nylon, presenta due fori in direzione assiale per il flusso principale, e due fori in direzione trasversale, uno superiore e uno inferiore, per lo spurgo dell'impianto e per un traverso verticale necessario ad accedere al condotto principale dove scorre l'acqua, sia per il riempimento dell'impianto, sia per la protezione catodica. Il tubo di spurgo nella parte sottostante presentava trafileture dal precedente incollaggio; per questo motivo la parte è stata smontata ed è stato realizzato un nuovo incollaggio in resina epossidica caricata, e non più in silicone, per realizzare il nuovo fissaggio del tubo di spurgo. Per il riempimento dell'impianto è stato realizzato un alloggiamento a muro per il tubo di portata dell'acqua all'interno dell'impianto.

3.2 Montaggio parziale e operazioni preliminari

A seguito della manutenzione si è proceduto con il montaggio di quanto disassemblato. In primo luogo la camera di prova. Di fondamentale importanza nel montaggio dei segmenti era il rispettare lo spazio di 0.05 mm tra le facce delle sezioni per evitare il grippaggio come mostrato in figura 3.2.1.

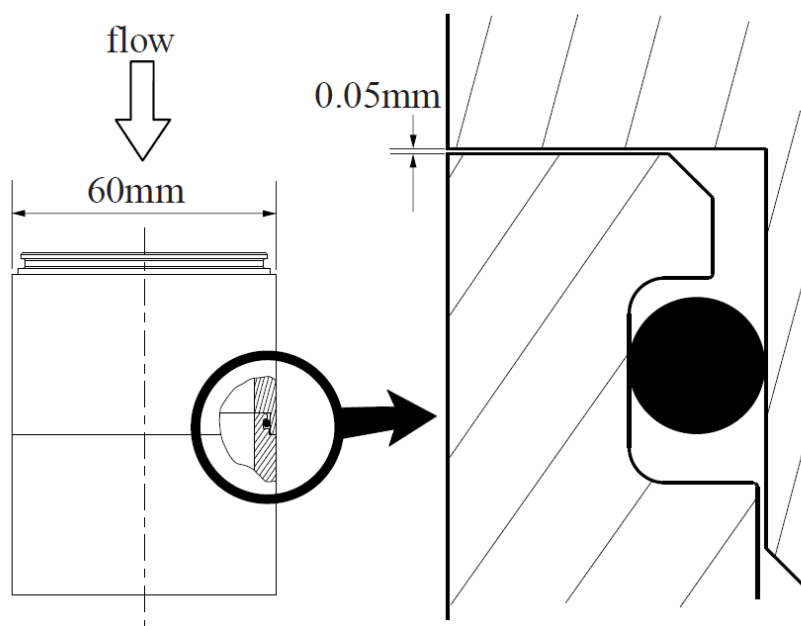


Figura 3.2.1: Schema distanza sezioni

In primo luogo per il montaggio dei segmenti è di fondamentale importanza iniziare dalla parte centrale, dal segmento numero 30. questo perché con il montaggio e l'accumularsi d'infinitesime imperfezioni in direzione assiale se s'iniziasse dalla sezione numero uno, ad esempio quella a destra, all'arrivare alla sezione numero sessanta al termine della camera di prova, si avrebbe di sicuro uno scostamento di almeno un millimetro dalla posizione voluta. Ma questo porterebbe all'impossibilità di montare la sella corrispondente in quanto andrebbe a fare interferenza con la cinghia di trasmissione del segmento. Fondamentale la procedura di montaggio: i segmenti devono essere incastrati tra loro ma non a contatto e garantire la tenuta dell'acqua. Per far questo i segmenti venivano appoggiati sulla barra di guida, premuti tra loro ma nella zona di contatto veniva posto uno spessore di 0.05 mm. Poi veniva fissata la sella corrispondente al segmento e quindi levato lo spessore di 0.05mm. e si procedeva con la successiva. In questo modo le sezioni s'incastrano tra loro facendo tenuta sull'o-ring ma allo stesso tempo non vi è contatto tra le facce. Prima del montaggio di ogni segmento

le zone di contatto e i cuscinetti venivano ingrassati con il grasso marino, sia per ridurre gli attriti, sia per garantire la tenuta. Montati i segmenti della sezione di prova si è proceduto con la taratura delle dinamo per il controllo dei motori. Sugli alberi sono stati attaccati dei marcatori a strisce bianche e nere stampati con una stampante di precisione, figura 3.2.2.

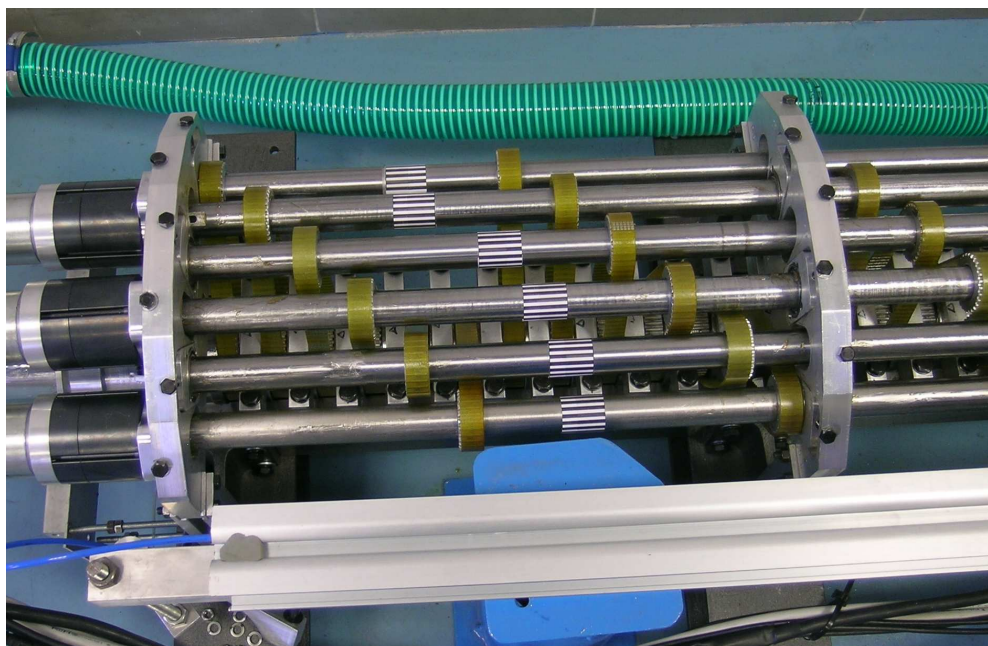


Figura 3.2.2: Marcatori di posizione

E' stato poi posto su un supporto un fotodiode che è stato collocato direttamente sopra i marcatori. Attivando la rotazione dei motori e collegando il fotodiode, attraverso un piccolo circuito realizzato appositamente, al sistema di acquisizione, si è eseguita la calibrazione tra il voltaggio in entrata alle dinamo e la reale rotazione degli alberi. Ad ogni giro il fotodiode leggendo il bianco e il nero dei marcatori registrava il regime di rotazione dei motori a diverse tensioni di alimentazione. Interpolati poi le curve dai dati acquisiti si è ottenuto il file di calibrazione necessario poi successivamente in fase di sperimentazione. La taratura delle dinamo è un passo fondamentale del processo di preparazione dell'impianto, infatti, sarà poi questa taratura che regolerà la movimentazione dei segmenti di prova e quindi della realizzazione fisica dell'onda viaggiante cuore dell'esperimento. Una scorretta taratura delle dinamo vorrebbe dire una scorretta discretizzazione della sinusoide e quindi l'impossibilità di ottenere riduzione del coefficiente di attrito o la realizzazione di onde parziali o non discretizzate correttamente che potrebbero anche portare ad un aumento della resistenza a parete.

3.3 Allestimento del sistema di prova

Data la complessità delle nuove attrezzature, il montaggio si è rivelato una procedura complessa e di alta precisione. Tutta la procedura di montaggio, e l'utilizzo di questa attrezzatura, richiedono una buona esperienza e sensibilità da parte dell'operatore nel saper considerare negli accoppiamenti la corretta forza di serraggio delle connessioni che deve essere sufficiente a garantire la robustezza strutturale e l'assenza di giochi ma allo stesso tempo non deve essere eccessiva per non compromettere la completa e corretta mobilità di ogni parte. La parte più delicata è stato il fissaggio della gamba di supporto anteriore in cui passava il filo elettrico della sonda. Vediamo schematicamente la procedura di montaggio:

- Assemblaggio albero principale – tubo di supporto
- Assemblaggio gambe di supporto verticali
- Assemblaggio sistema trazione assiale
- Assemblaggio sistema di spostamento verticale
- Assemblaggio supporti al tubo principale

3.3.1 Assemblaggio albero principale

Per prima cosa l'albero principale, a cui era stato fissato in precedenza il trecciato per la trazione assiale, è stato infilato nel tubo di sostegno. Il tubo di sostegno era stato preparato, come mostrato in figura 2.4.2 - 2.4.3, con le boccole di sostegno dei supporti verticali, di cui la posteriore è stata fissata coassialmente al tubo di sostegno con della resina epossidica, mentre l'anteriore è stata solamente fissata per incastro per dargli la possibilità di adattarsi meglio all'ingombro del filo elettrico e compensare eventuali giochi. Infilato quindi l'albero principale nel tubo di sostegno, si è recuperato il trecciato per la trazione assiale dal foro predisposto con un paio di pinzette facendo attenzione a non rovinarne la guaina di protezione. Una volta recuperato il trecciato vi è stato infilato il tubicino in pvc di protezione di modo che andasse a fare da guida nella zona del gomito a 90° proteggendo il trecciato da rotture. Sistemato quindi il trecciato si è posto nella parte anteriore del tubo di sostegno, il grano per il mantenimento e la guida della coassialità dell'albero. Tale grano, è stato avvitato con un paio di giri della filettatura ma senza andare in battuta nella scanalatura. Infatti, se si fosse stretto troppo il grano, si sarebbero potuti avere problemi in fase di movimentazione. Fissato il grano, sono state poste le molle sull'albero principale. Le molle internamente andavano in battuta sul tubo di supporto, mentre esternamente si è proceduto con il montaggio del porta sonda che faceva da battuta esterna. Il porta sonda è stato fissato all'albero principale attraverso un grano M3 posto nella parte

inferiore, che, bene stretto, teneva fisso il porta sonda anche a fronte del massimo carico espresso dalle molle. In questo modo si è terminato l'assemblaggio albero – tubo di sostegno.

3.3.2 Assemblaggio gambe di supporto verticali.

Per prima cosa si è preso un profilato a C 40x40 mm e della lunghezza di 600 mm e, dopo aver coperto con dello scotch in carta i bordi del profilato per non rovinare la parete del tubo, il profilato è stato introdotto all'interno del tubo principale dell'impianto. Posto in posizione il profilato, è stato introdotto all'interno del tubo principale l'assieme albero principale più tubo di supporto finché non si trovasse in posizione con le boccole anteriore e posteriore poste sotto i fori precedentemente realizzati sul tubo principale dell'impianto, figura 3.3.2.1.

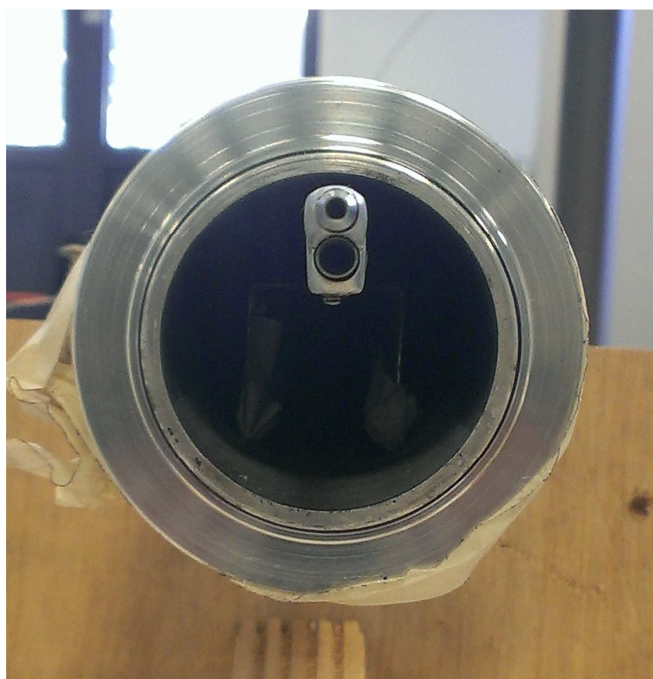


Figura 3.3.2.1: Assieme albero principale tubo di sostegno in posizione di montaggio

Una volta in posizione l'assieme si è recuperato il trecciato di trazione assiale con delle pinzette dal foro posteriore eseguito sul tubo principale dell'impianto e lo si è infilato all'interno della gamba di supporto verticale posteriore. Una volta passato il trecciato all'interno della gamba questa è stata avvitata sulla boccola posteriore sull'assieme dell'albero principale. Successivamente si è passati alla gamba di supporto anteriore. La gamba di supporto anteriore è stata studiata

appositamente per permetterne l'assemblaggio. Infatti, come visto in precedenza, la boccola anteriore è stata lavorata di modo da asportare metà della filettatura su di un lato e allo stesso modo è stata asportata metà della filettatura sulla gamba di supporto verticale. In questo modo vi era lo spazio per far passare il filo elettrico ma allo stesso tempo era funzionale per il montaggio. Infatti, per assemblare la gamba di supporto anteriore, una volta fatto passare il filo elettrico al suo interno, bisogna andare a porre la gamba all'interno del foro anteriore sul tubo principale posizionandola lateralmente e non superiormente alla sua filettatura. Una volta posta di lato la gamba, tenendo ben saldo l'albero principale di modo da fermare eventuali movimenti della boccola, si applica un movimento di traslazione in direzione laterale facendo sì che la gamba entri dal materiale asportato dalla filettatura, nel foro della filettatura. Una volta in posizione si applica un quarto di giro della gamba di supporto. Applicando un quarto di giro con la gamba già posta all'interno della filettatura attraverso lo spazio creato nella boccola, la filettatura entra in sede e lavora con tre filetti mandando in battuta la ghiera presente al termine della filettatura sulla gamba verticale e garantendo la tenuta strutturale lasciando il filo elettrico nella giusta posizione. Per far sì che il filo elettrico non grippasse nel gomito, anche qui è stato posto un sottile tubo in pvc che evitasse l'attrito con lo spigolo e permettesse un miglior scorrimento del filo elettrico. A seguito di questo sono state poste sul tubo principale le boccole con il sistema di premistoppa che hanno quindi accolto le gambe di supporto verticale fermandole in posizione, figura 3.3.2.2.

3.3.3 Assemblaggio sistema di trazione assiale

Per il sistema di trazione assiale in primo luogo è stato assemblato il sistema di supporto della ruota forata addetta alla trazione. Tale sistema di supporto serviva non solo a sostenere la ruota ma anche a creare l'alloggiamento per la spina che avrebbe tenuto la ruota nella posizione voluta. Assemblato il supporto, la basetta è stata fissata ad una barra filettata a sua volta fissata alla clamp di movimentazione dei supporti verticali. Unico accorgimento è stato quello di essere attenti, attraverso un preciso uso di dadi e controdadi, all'allineamento della guida del cavo di trazione sulla ruota con l'asse della gamba di supporto verticale. In questo modo il trecciato lavorava solo in direzione assiale e andava direttamente all'interno del tubo di sostegno, senza incontrare altri spigoli o altri contatti.

3.3.4 Assemblaggio sistema di spostamento verticale

Per l'assemblaggio del sistema di movimentazione verticale in primo luogo sono stati avvitati i supporti di spostamento verticale alle gambe di sostegno.

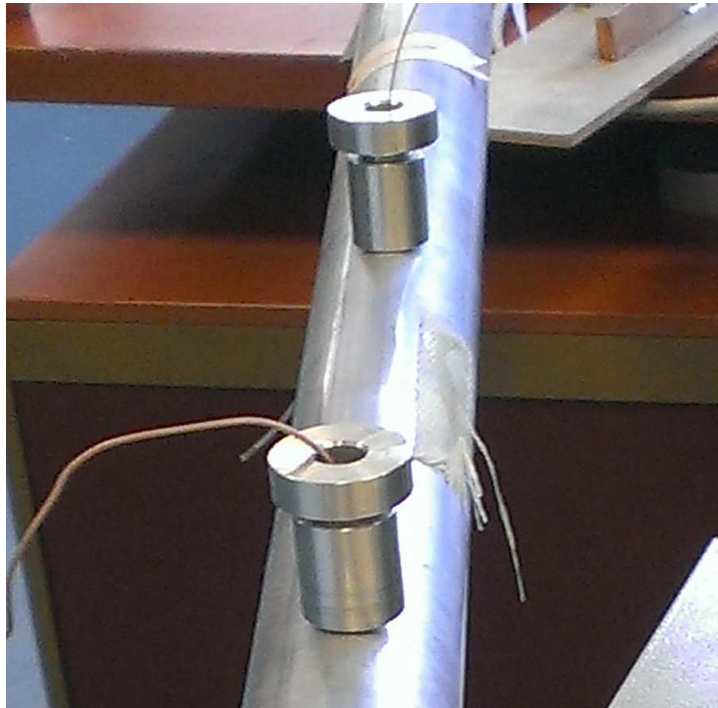


Figura 3.3.2.2: Assieme albero principale e boccole sistema premistoppa.

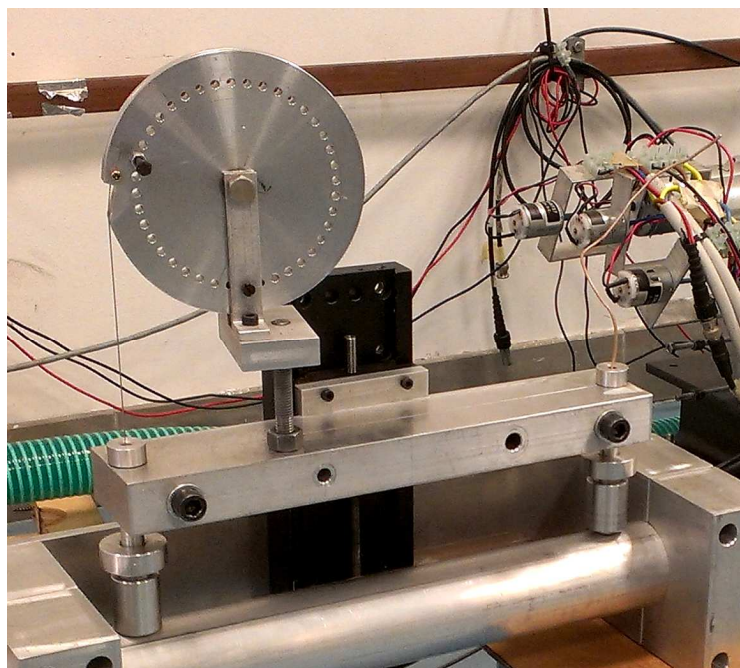


Figura 3.3.4.1: Assieme movimentazione assiale e radiale.

Fissati tali supporti sono state messe insieme le clamp di movimentazione. Nel fissare tali clamp, data anche la grossa dimensione dei bulloni, non bisognerà esercitare una pressione eccessiva per non incorrere in sforzi e consentire la corretta e precisa corsa del carrello del motore. Fissate le clamp, è stata fissata la piastra di interfaccia al motore che è stato montato successivamente, figura 3.3.4.1.

3.3.5 Assemblaggio interfaccia tubo principale

Il sistema d'interfaccia con il tubo principale era realizzato anche qui con delle morse ricavate dal pieno. Sono state quindi poste in posizione le morse e la piastra di sostegno del motore. La parte delicata era di stringere le morse mantenendo il corretto allineamento del piano del carrello di spostamento del motore senza andare ad avere una non complanarità anche minima che avrebbe potuto dar luogo a torsioni e quindi a difficoltà nella movimentazione. Terminato l'assemblaggio del sistema d'interfaccia al tubo principale, è stata posizionata la sonda, figura 3.3.5.1, 3.3.5.2, e terminato il lavoro di assemblaggio delle attrezzature, figura 3.3.5.3.



Figura 3.3.5.1: Sonda Dantec R15 a film caldo

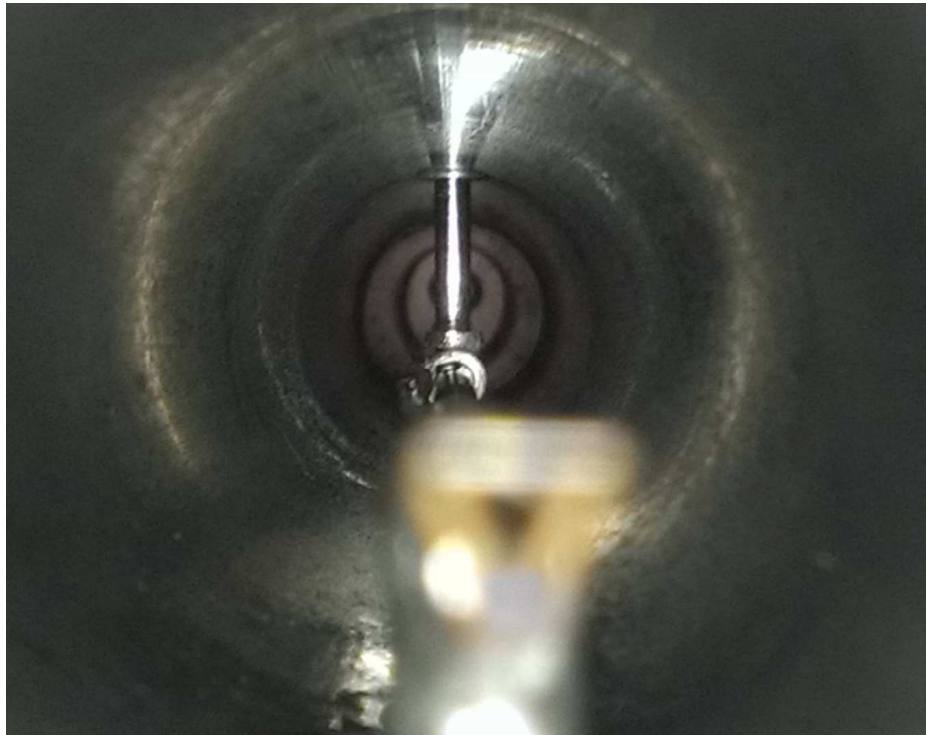


Figura 3.3.5.2: Interno del tubo principale dell'impianto, gambe di supporto verticali

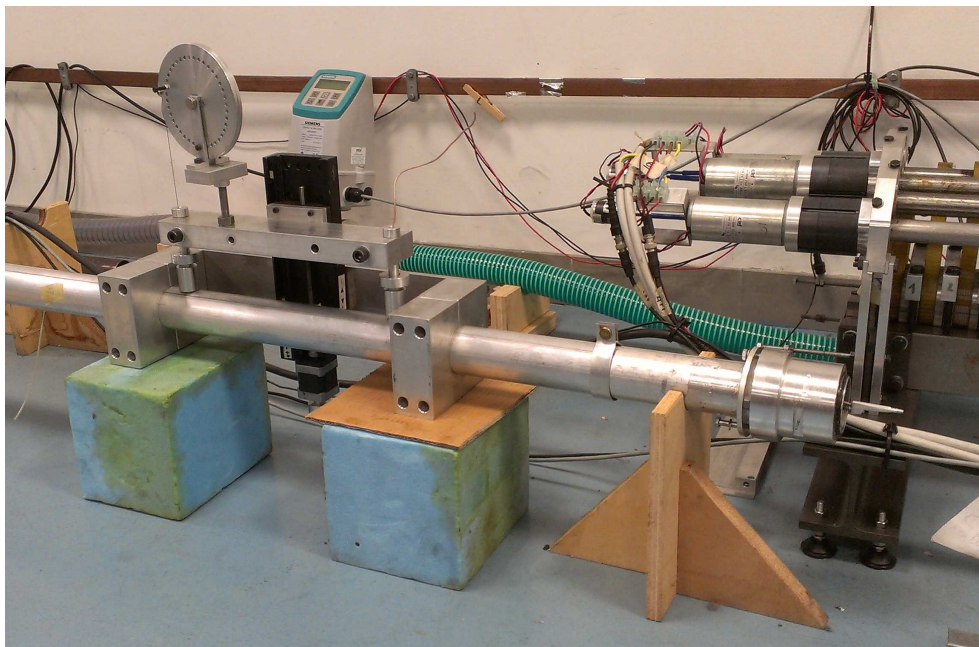


Figura 3.3.5.3: Attrezzatura al termine dell'assemblaggio

3.3.6 Ottimizzazione corsa verticale

Una volta terminato l'assemblaggio delle attrezzature sono stati eseguiti diversi test di movimentazione per verificarne il corretto funzionamento. A seguito di diversi cicli di movimentazione sia assiale che radiale si è notato un effetto di flessione sull'albero principale dato dal peso stesso dell'albero e dal peso del porta sonda. Per ovviare a questo problema è stata realizzata una compensazione degli effetti di flessione relazionando la posizione assiale con una relativa corsa radiale così che la movimentazione radiale porti la sonda a parete ad ogni posizione assiale considerando gli effetti di flessione.

CONTROLLO POSIZIONE ASSIALE

zero assiale: molle completamente compresse
zero radiale: arresto inferiore traverso (zona centro vena)

Registrazione posizioni sonda a parete:

Posizione		
assiale	radiale	note
[cm]	[mm]	
0	24.0	molle completamente compresse
2	24.0	
4	24.3	inizio compensazione flessione
6	24.6	
8	25.0	
10	25.3	
12	25.6	
14	26.2	
16	26.8	
17	27.0	max estensione molle nel tubo fisso (disponibili altri 4 cm nella sez. rotante)

Tabella 3.3.6.1: Valori di compensazione della flessione in estensione assiale

3.4 Chiusura e riempimento impianto

Sistemata la movimentazione della sonda, il tubo principale è stato rimontato all'interno dell'impianto. A seguito della chiusura dell'impianto si è proceduto con il riempimento dello stesso di acqua. Per evitare la presenza d'impurità che potessero rovinare la sonda, l'acqua è stata filtrata prima dell'immissione nell'impianto. Una volta riempito, molto lentamente e con i fori di spurgo aperti, per permettere all'aria di uscire, si è continuato con le operazioni di eliminazione delle bolle d'aria presenti nei tubi. Soprattutto i tubi semirigidi in pvc sono stati oggetto di un lavoro di eliminazione delle bolle d'aria molto attento e minuzioso. Infatti, se la sonda incontrasse dell'aria in acquisizione darebbe dei valori in tensione completamente sballati. Per facilitare lo spurgo è stata fatta girare la pompa dell'impianto per diverso tempo di modo che l'acqua girando portasse con sé le bolle d'aria fino allo snodo della protezione catodica dove potevano fuoriuscire verso l'esterno. Dato l'utilizzo della pompa di filtraggio, l'operazione di spurgo è stata ripetuta ancora nei giorni successivi. Infatti, filtrando l'acqua, questa si mescolava con micro bolle d'aria che poi nel tempo, aggregandosi, davano vita a bolle di maggiore dimensione. terminate le operazioni di spurgo si sono iniziate le procedure di acquisizione.

3.5 Utilizzo

Per l'utilizzo dell'attrezzatura ci sono alcune semplici operazioni da seguire. In primo luogo ogni giorno all'accensione del sistema di acquisizione del filo caldo bisogna bilanciare il ponte della sonda. Per far questo l'operazione prevede di cortocircuitare il cavo di acquisizione impostando una resistenza nulla, e bilanciare il ponte. Poi collegata la sonda e impostato il valore di resistenza nominale della sonda più il cavo, si bilancia il ponte della sonda. A seguito del bilanciamento del ponte della sonda si aumenta del 10% il surriscaldamento del film per avere una migliore acquisizione. Questo all'inizio di ogni giornata. Al termine di ogni giornata invece è di fondamentale importanza inserire la protezione catodica che preserva i materiali dall'acqua e dal formarsi di alghe.

Capitolo 4

Collaudo e taratura

La taratura della sonda è stata il punto di arrivo di quest'attrezzatura. In questo impianto la taratura della strumentazione e la determinazione di una legge di taratura ripetibile e stabile assume un'importanza decisamente superiore alla norma. Infatti, l'impossibilità di accesso alla sonda, ma allo stesso tempo la necessità di una buona precisione delle acquisizioni, ha richiesto uno studio dettagliato del problema. La determinazione della legge di taratura è stata solo il punto di arrivo di un lungo processo di affinamento e studio del comportamento della sonda.

4.1 Taratura in velocità

L'obiettivo era quello di stabilire una relazione tra le tensioni acquisite in volt dalla sonda e le velocità in metri al secondo corrispondenti a tali tensioni. In primo luogo bisognava considerare che in questo processo di acquisizione dati per stabilire la legge di taratura in velocità vi era intrinsecamente una verifica della legge di taratura in posizione realizzata meccanicamente prima della chiusura dell'impianto. Infatti, acquisendo e verificando i dati rispetto a profili noti di velocità si è potuto verificare la correttezza della legge di taratura in posizione a meno di pochi decimi di millimetro causati da effetti di spinta idrostatica e da portanza data dalla forma del porta sonda. Per eliminare tali effetti, e per avere un procedimento sempre ripetibile di taratura conoscendo entro i corretti limiti di accuratezza la posizione della sonda, nel nostro caso era richiesta una accuratezza di 0.3 mm, è stato scelto di acquisire i dati del processo di taratura con la sonda in posizione tale da non avere alcuna possibilità di essere oggetto di forze idrostatiche o di portanza e cioè la posizione zero a molle tutte compresse. Tale posizione è la più sicura in termini di ripetibilità, e, essendo le molle completamente compresse, garantisce la completa stabilità della sonda senza alcuna possibilità di movimento della stessa.

4.2 Taratura a Reynolds variabile

Una volta decisa la posizione in cui porre la sonda per acquisire i dati per la taratura è stato inizialmente scelto di procedere a una taratura a Reynolds variabile e posizione costante. Questo metodo consiste nell'acquisire differenti set di dati variando il numero di Reynolds. Quindi una volta fissata la posizione, nel nostro caso è stato scelto il centro vena, si acquisiva il valore della sonda a

differenti numeri di Reynolds. Acquisisti i dati in tensione della sonda li si correlava ai rispettivi valori di velocità calcolati con la soluzione dell'equazione di Poiseuille in base ai valori di portata acquisiti dal flussimetro. Tale metodo, di tarare la sonda a film caldo in centro vena, è uno dei più conosciuti e utilizzati ma presentava nel nostro caso un problema di carattere esecutivo. L'obiettivo della nostra procedura di taratura era quello di realizzare una taratura che fosse accurata a basse velocità e ci desse la possibilità di analizzare le fluttuazioni di velocità non solo nella zona di centro vena ma, soprattutto, di poter acquisire e analizzare le fluttuazioni di velocità a parete nella zona di strato limite. Per far questo si sarebbe dovuta realizzare una serie di acquisizioni indagando diversi numeri di Reynolds ma concentrandosi e rendendo molto fitto l'intervallo di analisi intorno a bassi numeri di Reynolds. Ora, la pompa del nostro impianto, controllata in tensione e integrata all'interno dell'impianto attraverso un controllo in retroazione, dato il suo dimensionamento meccanico e le sue prestazioni sovradimensionate per il nostro impianto, non ci permetteva di scendere a numeri di Reynolds troppo bassi. Questo problema, di garantire bassi numeri di Reynolds si abbinava al fatto che il flussimetro, nonostante l'alta precisione, a bassi valori di acquisizione poteva dare piccoli errori di portata che però avrebbero dato grandi errori sulla taratura del filo caldo, figura 4.2.1. A questo problema si sarebbe potuto avviare creando una robusta perdita di carico in uscita dalla pompa. Infatti, ponendo una forte perdita di carico si sarebbero riusciti a creare bassi numeri di Reynolds facendo lavorare la pompa e il flussimetro in range stabili e ripetibili ma questo avrebbe comportato un grosso lavoro di studio e realizzazione per inserire la perdita di carico nel circuito dell'impianto. Si è allora deciso di seguire un'altra strada.

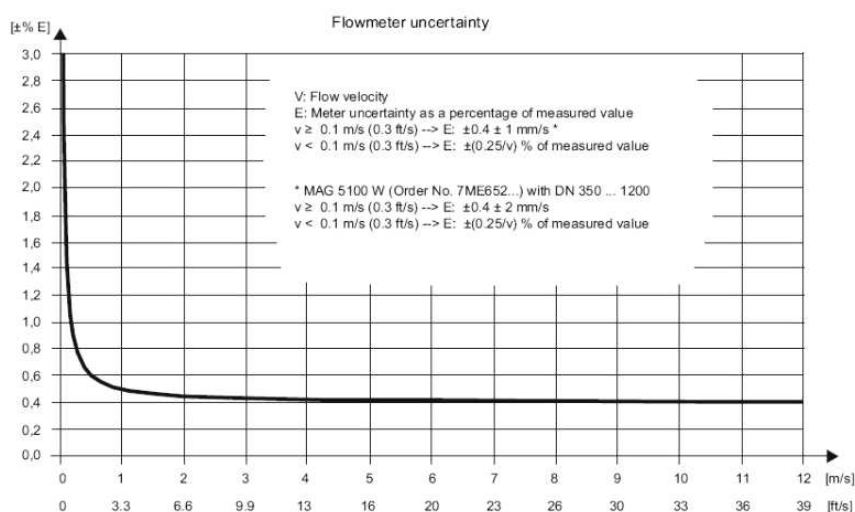


Figura 4.2.1: Incertezza del flussimetro.

4.3 Taratura a Reynolds costante

E' stato quindi scelto di lavorare a Reynolds costante e variare la posizione della sonda in direzione radiale. Questo, oltre a consentirci di ottenere una buona legge di taratura, ci ha anche permesso di analizzare il comportamento della sonda e della movimentazione verticale e trovare una buona legge di correlazione tra tensione e velocità. Si è proceduto quindi a tarare la sonda attraverso acquisizioni di tensione muovendoci da centro vena a parete a Reynolds costante in regime laminare. Infatti in regime laminare all'interno di un tubo è noto il profilo di velocità parabolico dato dalla soluzione dell'equazione di Poiseuille:

$$v = \frac{\Delta P}{4\mu L} (R^2 - r^2) \quad (4.3.1)$$

Nel nostro caso per il calcolo della velocità però ci basavamo sul valore della portata dato dal flussimetro. La relazione tra la velocità e la portata è data in primo luogo da:

$$Q = \bar{v} \pi R^2 \quad (4.3.2)$$

Ma se la consideriamo come integrale sul raggio e vi sostituiamo il valore di v dato dalla (4.3.1) otteniamo:

$$Q = \bar{v} \pi R^2 = \int_0^R v 2\pi r dr = \frac{\pi R^4}{8L} \frac{\Delta P}{\mu} \quad (4.3.3)$$

Da questa possiamo ricavare il valore della costante della soluzione di Poiseuille per il nostro impianto e le condizioni di prova rispetto alla portata. Così facendo abbiamo ottenuto la soluzione del profilo parabolico di velocità all'interno del nostro tubo per Reynolds laminari, figura 4.3.1, partendo del solo valore in entrata della portata acquisita dal flussimetro. Abbiamo quindi realizzato diversi set di acquisizioni a Reynolds costante muovendoci in direzione radiale. Una volta acquisiti i dati avevamo la relazione cercata tra i dati in tensione e le velocità note. Inoltre, in questo modo, si è potuto risolvere il problema di analizzare e trovare una relazione per le basse velocità. Infatti, analizzando in direzione radiale da centro vena a parete si è potuto acquisire dati sia per le alte velocità sia per le basse velocità.

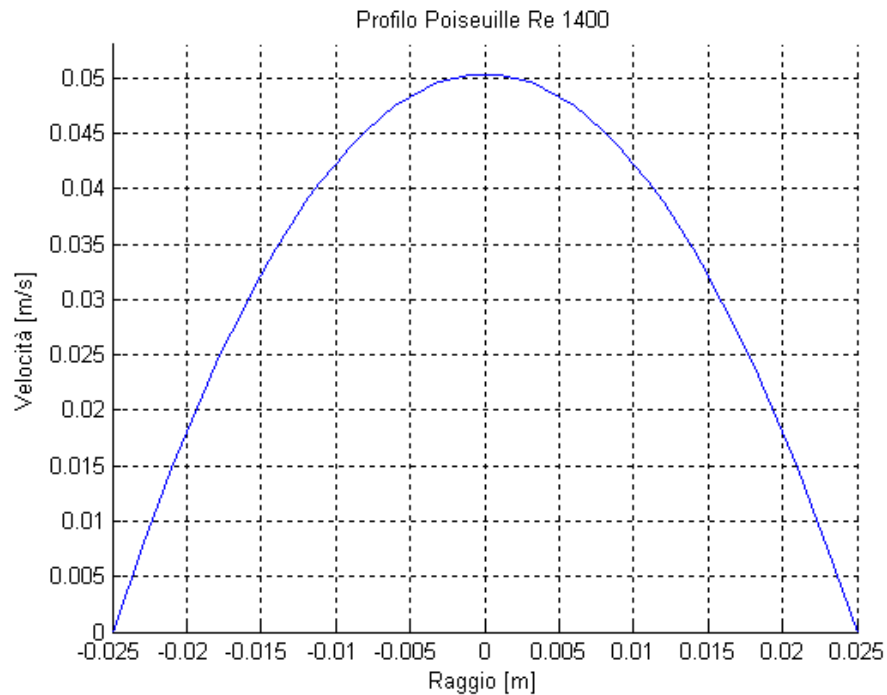


Figura 4.3.1: Profilo di velocità

4.4 Studio funzione di taratura

Scelto il metodo di taratura e acquisiti dati in tensione, si è passati allo studio di una funzione che correlasse i valori di tensione e velocità e soprattutto che fosse ripetibile e stabile al variare di differenti set di dati in entrata. Infatti, tutto lo studio della funzione di taratura è finalizzato a realizzare una procedura di taratura che sia veloce e ripetibile all'inizio di ogni set di prove per l'acquisizione di dati da parte della sonda. Le sonde a film caldo come abbiamo già visto sono molto sensibili alle anche più minime variazioni di temperatura del fluido e di variazione delle condizioni di bilanciamento del ponte. Quindi prima di ogni acquisizione di dati, soprattutto volendo lavorare su alte sensibilità e bassi valori di velocità e fluttuazioni, è fondamentale tarare la sonda rispetto alle condizioni di acquisizione che s'incontreranno durante la prova e da qui la necessità di una funzione che legghi correttamente tensione e velocità e sia robusta a generali variazioni sui dati. Allo stesso tempo la funzione deve ben rappresentare la forte non linearità della relazione tra tensione e velocità. Lo studio sulla funzione, dato che nel nostro caso sono noti entrata e uscita, x , y , o meglio U , V (velocità e tensione), è basato sul determinare un insieme di coefficienti per una certa tipologia di funzione che fornisca una buona interpolazione per i nostri dati. In

primo luogo si è provato a interpolare i dati con una funzione polinomiale del tipo:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots \quad (4.4.1)$$

Con questo tipo di funzione, anche aumentando molto lo sviluppo, non si è trovata alcuna interpolazione che desse una buona stabilità alla legge di taratura e che fosse monotona. La forte non linearità dei dati, infatti, dava luogo a variazioni, seppur minime, nel verso della pendenza, cosa che significherebbe mettere in relazione ad un aumento nella tensione una diminuzione del valore di velocità. Cosa ovviamente assurda. Inoltre in questo tipo d'interpolazione non vi era alcuna garanzia sulla stabilità della funzione al variare dei dati in ingresso. Questo perché dovendo aumentare il grado dell'esponente per cercare una buona interpolazione aumentano anche i coefficienti, ma all'aumentare dei coefficienti aumenta anche l'instabilità rispetto ai dati in entrata, cosa verificata con diversi set di acquisizione. Dopo differenti tentativi che non hanno portato a buone interpolazioni stabili e ripetibili, si è quindi passati ad uno sviluppo con funzione di tipo razionale:

$$y = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \dots}{b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 \dots} \quad (4.4.2)$$

Tale tipologia di funzione ha subito mostrato un'ottima interpolazione dei dati e una buona ripetibilità variando i dati in entrata, eliminando il problema della non monotonia nell'interpolazione. Si è quindi proceduto a rendere stabile la funzione minimizzando il numero dei coefficienti. In pochi tentativi si è riuscito a ridurre il numero di coefficienti a soli tre, che danno luogo ad una funzione di taratura rappresentata da un'iperbole :

$$y = \frac{a_0 + a_1x}{b_0 + x} \quad (4.4.3)$$

Determinata quindi la funzione, sono stati eseguiti diversi set di prove per verificare la stabilità della stessa al variare dei dati in entrata, e, verificato che per molti set di dati acquisiti in regime laminare da velocità di centro vena fino allo zero a parete, la funzione ben interpolava i dati, tale funzione è stata scelta come funzione di taratura per la nostra sonda, figura 4.4.1.

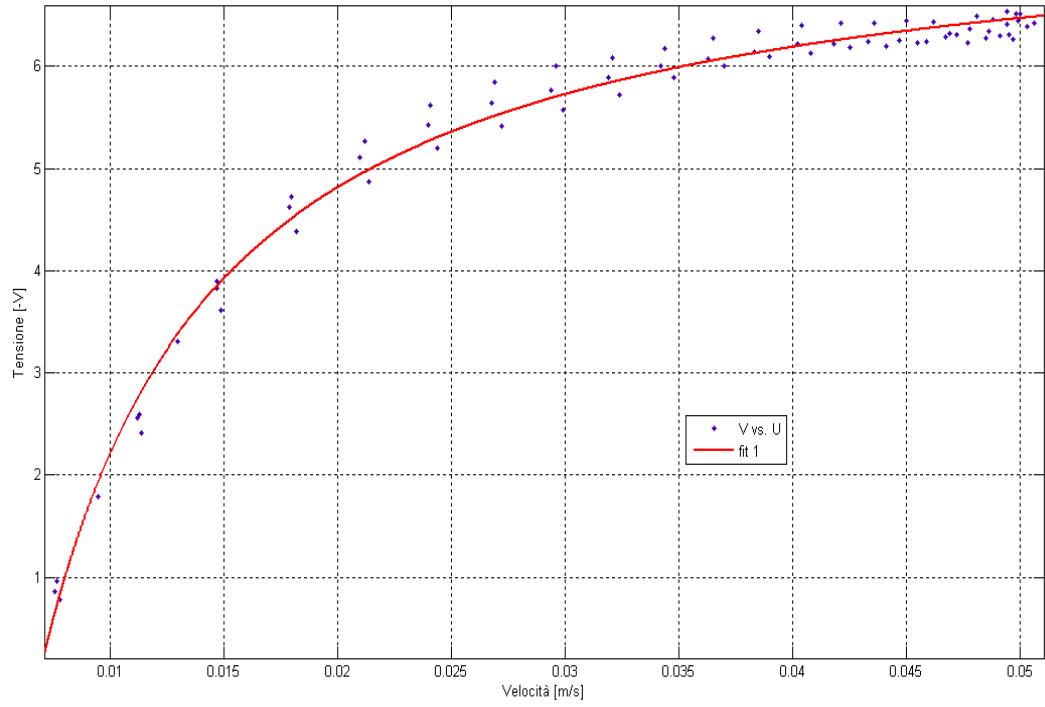


Figura 4.4.1: Esempio di curva di taratura

4.5 Verifica

Una volta determinata quindi la legge di taratura si è proceduto alla verifica del buon funzionamento della legge acquisendo dati e verificando i profili di velocità dati dalla legge di taratura con profili di velocità noti. E' stata realizzata una verifica in regime laminare e una in regime turbolento.

4.6 Ottimizzazione procedura di taratura

Verificato il buon funzionamento della legge proposta, la ripetibilità di tale legge e la robustezza rispetto ai dati in entrata, è stata quindi definita una semplice procedura di taratura da svolgere prima di ogni acquisizione:

- Accensione sistema a filo caldo Aalab, bilanciamento del ponte della sonda e set dell rapporto di surriscaldamento come visto in precedenza
- Acquisizione delle tensioni per una serie di punti corrispondenti ad un profilo di velocità laminare
- Immissione dei dati nella funzione `legge_di_taratura(U,V)`

La funzione `legge_di_taratura.m`, inseriti in entrata i valori di tensioni acquisiti e le corrispondenti velocità calcolate con la soluzione dell'equazione di Poiseuille in base alla portata del flussimetro, dà in uscita i coefficienti a_0 , a_1 , b_0 , della legge di taratura e il grafico della stessa per verificare il buon andamento della funzione nel caso specifico. A seguito di questo si può quindi procedere nella prova:

- Esecuzione della prova con l'acquisizione tensioni della misura da realizzare
- Calcolo delle velocità corrispondenti attraverso la legge di taratura ricavata in precedenza

Così facendo si ricavano i valori di velocità relativi alle tensioni acquisite dal filo caldo. Di seguito i grafici di confronto tra teoria e valori ottenuti con l'utilizzo della legge di taratura per un profilo laminare, figura 4.5.1, e uno turbolento, figura 4.5.2.

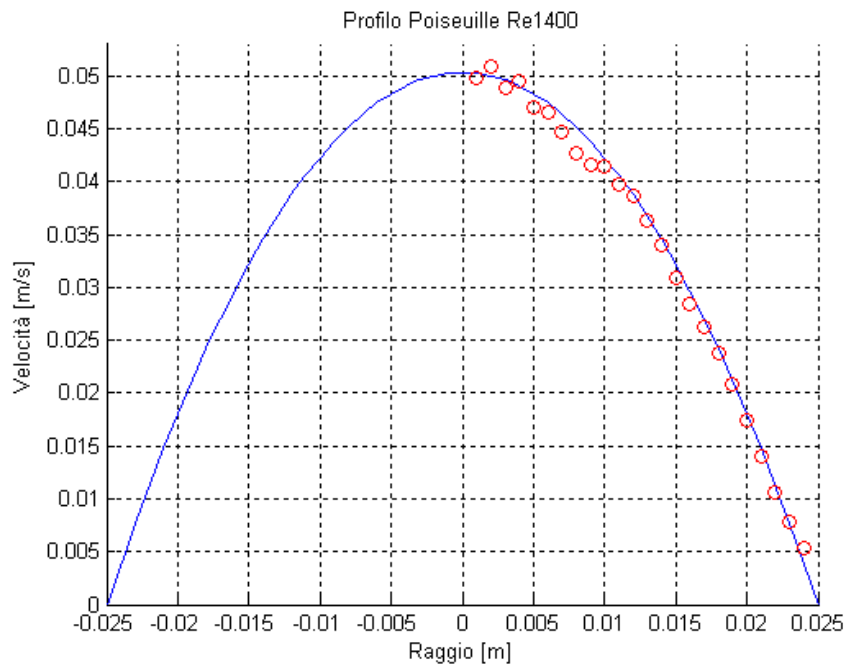


Figura 4.5.1: Confronto profilo di velocità laminare teorica e misurata.

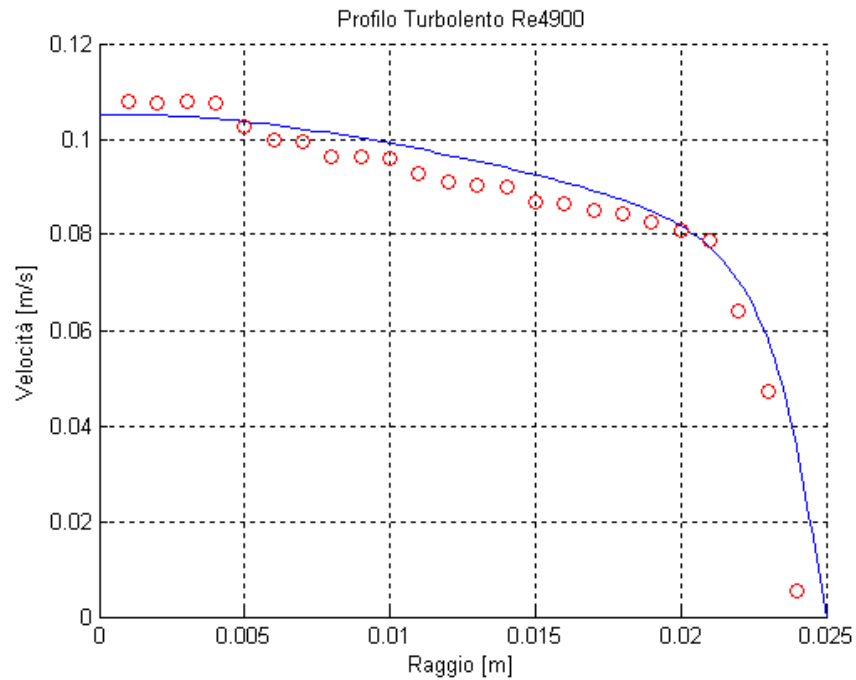


Figura 4.5.2: Confronto profilo di velocità turbolenta teorica e misurata

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

5.1 Conclusioni

E' stata quindi realizzata l'attrezzatura necessaria all'indagine di flussi turbolenti di parete attraverso una sonda a film caldo. Nello sviluppo della progettazione, realizzazione parti, prove di funzionamento e taratura si sono risolte tutte quelle situazioni che si presentavano nell'avanzare del lavoro che sono all'ordine del giorno in un lavoro di questo tipo. Alcuni chiamano queste situazioni problemi, personalmente invece non li definirei tali ma semplicemente normali situazioni da risolvere nell'allestire un sistema complesso. Il lavoro è stato soddisfacente in quanto ha portato a un'attrezzatura funzionale con una movimentazione precisa e una legge di taratura ripetibile e con una buona robustezza.

5.2 Sviluppi futuri

5.2.1 Prove transitorio

Il prossimo passo sarà l'utilizzo dell'attrezzatura per l'indagine del transitorio. L'obiettivo delle prove di misura del transitorio sarà quello di indagare in direzione assiale e radiale il comportamento del flusso all'interno del tubo. Le prove saranno finalizzate alla determinazione del transitorio spaziale analizzando sia in direzione radiale, da centro vena a parete con particolare attenzione alla zona di parete, sia in direzione assiale, partendo dall'ultimo segmento movimentato della camera di prova, il termine della zona attiva, fino a quattro diametri a valle della stessa. In questo modo si vuole identificare il comportamento del flusso nelle due direzioni per comprendere per quanto spazio la zona di strato limite rimane modificata dall'effetto dell'onda viaggiante prima di tornare a un comportamento standard non affetto dall'influenza del fenomeno. Tale indagine risulterà di particolare importanza in quanto non vi sono particolari predizioni numeriche su quello che dovrebbe essere l'andamento del transitorio del fenomeno. Comprendere però tale andamento è necessario all'avanzare della ricerca e dello sviluppo delle tecniche di controllo attivo tramite onda viaggiante. Infatti, volendo portare avanti lo sviluppo di tali metodi, anche variando la geometria, le condizioni al contorno e le tecniche di creazione dell'onda viaggiante diventa molto importante capire quali siano gli estremi di sviluppo del fenomeno da zero a riduzione di resistenza a fenomeno completamente sviluppato. L'indagine del transitorio sarà mirata nella zona della mappa $k-\omega$ ove

è massima la riduzione di resistenza per comprendere l'andamento della riduzione di resistenza nella condizione di ottimo. Tale indagine ha una particolare importanza nella comprensione del fenomeno in quanto sono in atto studi che hanno verificato la possibilità di ottenere effetti di riduzione di resistenza anche a numeri di Reynolds più alti e quindi con un maggior numero di possibili sviluppi e applicazioni future.

5.2.2 Indagine zone alto numero di Reynolds

Fino ad ora sono state indagate zone della mappa k - ω dove fosse predetto il massimo valore di riduzione di resistenza. Questo valore però era sempre correlato a situazioni a basso numero di Reynolds. Grazie agli studi condotti dal professor Maurizio Quadrio e dal professor Davide Gatti [9] sono state indagate differenti zone della mappa k - ω , figura 5.2.2.1. A seguito di tali indagini sono stati osservati interessanti comportamenti della riduzione di resistenza ad alti numeri di Reynolds.

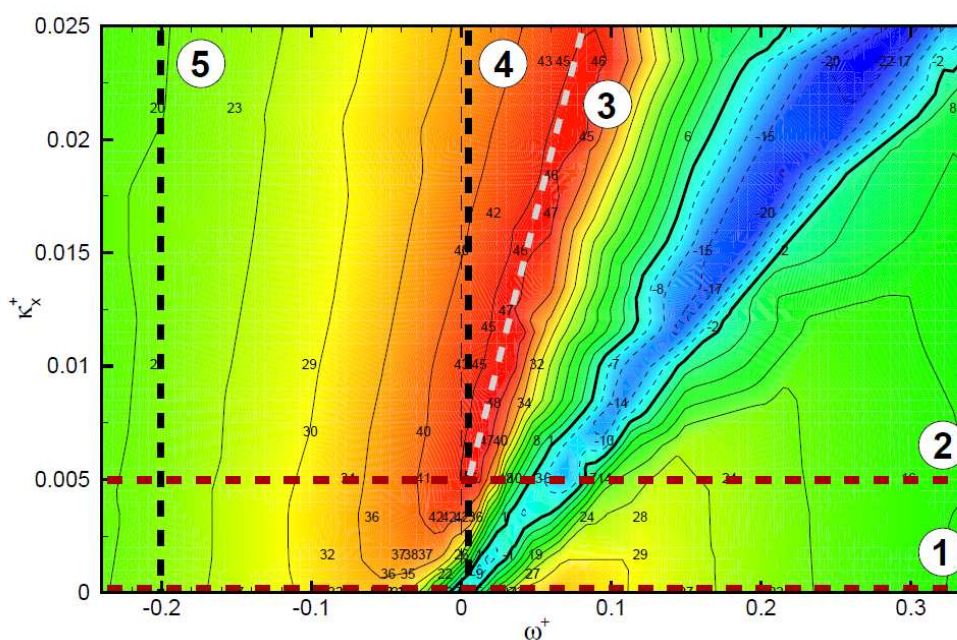


Figura 5.2.2.1: Mappa k - ω con nuove zone d'indagine ad alti Reynolds

L'indagine ha mostrato un veloce decremento della riduzione di resistenza all'aumentare del numero di Reynolds, e del variare dei parametri k - ω della legge forzante. Allo stesso tempo però ha compreso il cambiamento dei parametri ottimali k - ω ad alto numero di Reynolds. Tali valori fanno diminuire

sensibilmente il rateo di decrescita della riduzione di resistenza all'aumentare del numero di Reynolds e spiegano la variazione nel comportamento della riduzione di resistenza al variare del numero di Reynolds già mostrato da differenti studi, [12] - [28], figura 5.2.2.2. Allo stesso tempo hanno scoperto un buon vantaggio rispetto alla condizione di massima riduzione di resistenza in termini di energia risparmiata. Infatti, per creare l'onda viaggiante necessaria alla realizzazione della forzante a parete nella condizione di massima riduzione di resistenza a bassi numeri di Reynolds, è richiesto un alto consumo in termini di energia, mentre per ottenere i parametri ottimali di riduzione di resistenza ad alto numero di Reynolds l'energia richiesta diminuisce sensibilmente, figura 5.2.2.3.

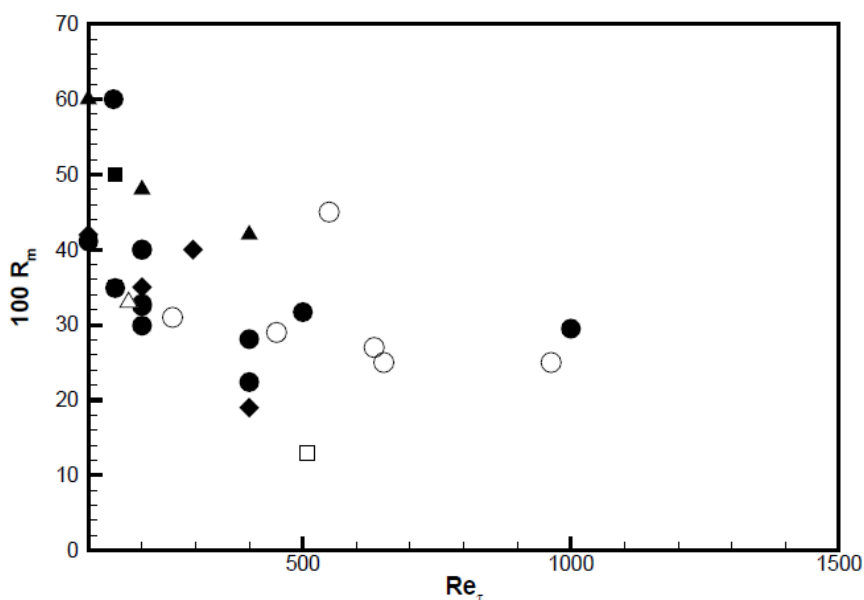


Figura 5.2.2.2: Precedenti studi sulla riduzione di resistenza con tecniche attive all'aumentare del numero di Reynolds, $Re_{\tau} 1000 \approx Re_p 28000$. In bianco valori sperimentali e in nero valori numerici: cerchi: parete oscillante, triangoli bianchi: streamwise traveling wave, quadrati: spanwise traveling wave, triangoli neri: oscillazioni con la forzante di Lorentz

Altro interessante comportamento approfondito dalla loro indagine, dato dal fatto che è stata estesa la regione di analisi del dominio di $k-\omega$, è stato scoprire il comportamento della riduzione di resistenza in funzione di $k-\omega$ ad alti numeri di Reynolds. E' stato evidenziato come, in determinate zone di $k-\omega$, ove si verificava un aumento del coefficiente di attrito, tale comportamento, all'aumentare del numero di Reynolds, cambia, e il fenomeno di aumento di resistenza scompare e si presenta una zona di riduzione di resistenza.

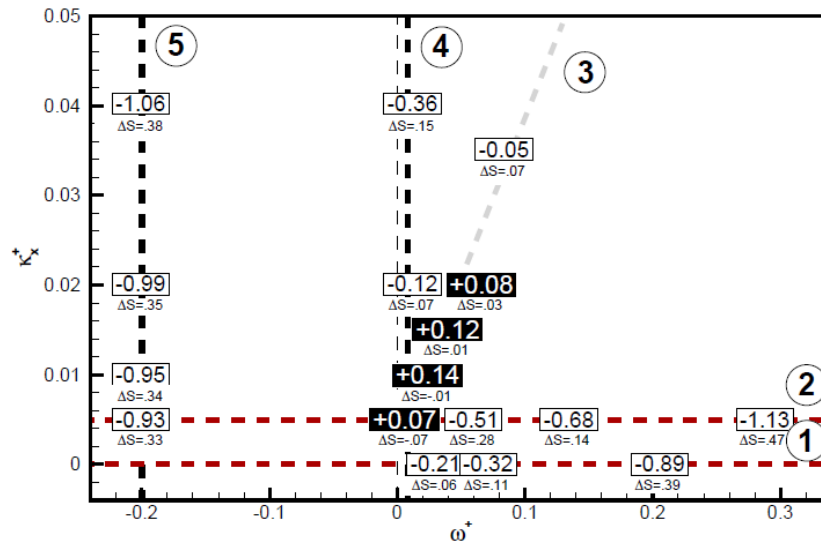


Figura 5.2.2.3: Bilancio di energia netto S (valori nei box con evidenza sui valori positivi) a Re 27000, e sotto i box sono riportati ΔS tra Re 4750 e Re 27000

Analizzando più in profondità questo comportamento, hanno visto come, in zone della mappa $k-\omega$, considerando la migliore condizione di riduzione di resistenza a basso Reynolds, ove non vi erano zone di riduzione di resistenza d'interesse, all'aumentare del numero di Reynolds e al considerare i corretti $k-\omega$, in tali zone cambia il comportamento del fenomeno e si trovavano buoni valori di riduzione di resistenza là dove prima erano di scarso interesse, figura 5.2.2.4, 5.2.2.5. Questi risultati aprono nuove possibilità di sviluppo e applicazione per la ricerca sulle tecniche di controllo attivo attraverso le onde viaggianti. Considerati tali risultati appare chiaro come lo studio del transitorio acquisti un'importanza rilevante nell'approfondimento dello sviluppo della tecnica di riduzione di resistenza attraverso onde viaggianti.

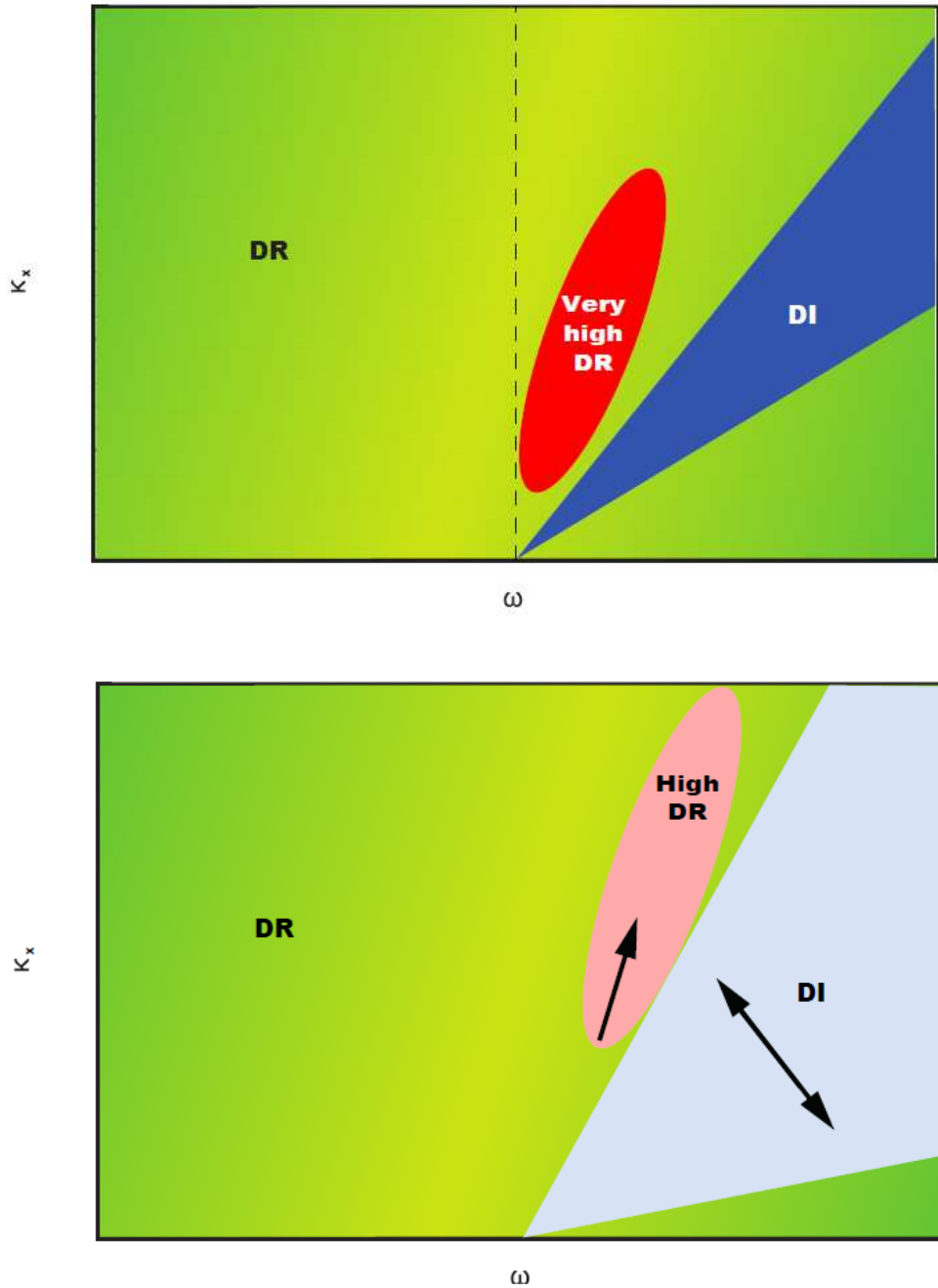


Figure 5.2.2.4 - 5.2.2.5: Le due figure mostrano la differenza delle zone di riduzione e aumento di resistenza in funzione di k - ω a bassi ed alti numeri di Reynolds. Nella figura superiore la mappa k - ω schematizzata per individuare le regioni d'interesse a bassi numeri di Reynolds, nell'immagine inferiore si evidenzia il comportamento all'aumentare del numero di Reynolds.

Bibliografia

- [1] F. Auteri, A. Baron, M. Belan, G. Campanardi, and M. Quadrio - *Experimental assessment of drag reduction by traveling waves in a turbulent pipe flow.* - *Phys. Fluids*, 22(11):115103/14, 2010.
- [2] M.Quadrio, P.Ricco, C.Viotti. - *Streamwise-traveling waves of spanwisewall velocity for turbulent drag reduction.* - *J.Fluid Mech.*,627:161-178, 2009.
- [3] Pierre Ricco, Shengli Wu, - *On the effects of lateral wall oscillations on a turbulent boundary layer,* - *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29 (2004) 41-52.
- [4] Y.Du, G.E. Karniadakis. - *Suppressing Wall Turbulence by Means of a transverseTravelingWave.* - *Science*, 288:1230-1234, 2000.
- [5] Y.Du, V.Symeonidis, G.E. Karniadakis. *Drag reduction in wall-bounded turbulence via a transverse travelling wave.* *J.FluidMech.*, 457:1-34, 2002.
- [6] H.Zhao, J.Z.Wu, J.S. Luo. *Turbulent drag reduction by travelling wave of flexible wall.* *Fluid Dyn. Res.*, 34:175-198,2004.
- [7] M.Quadrio, P.Ricco, C.Viotti. *Streamwise-traveling waves of spanwise wall velocity for turbulent drag reduction* *J.Fluid Mech.*,627:161-178,2009.
- [8] Andrea Bertolucci – *Studio sperimentale di onde viaggianti in flussi turbolenti di parete* – Politecnico di Milano, Ottobre 2010
- [9] M. Quadrio, D. Gatti – *What happens to turbulent skin-friction drag reduction at large values of the Reynolds number?* – Submitted 9 May 2013
- [10] F. Martin - *Collaboration to an existing turbulent drag reduction prototype* – Politecnico di Milano – Luglio 2010
- [11] Handbook of Sitrans FM, Siemens. 2009

- [12] J.-I. Choi, C.-X. Xu, and H. J. Sung. - *Drag reduction by spanwise wall oscillation in wall-bounded turbulent flows*. - *AIAA J.*, 40(5):842–850, 2002.
- [13] K-S. Choi, J.R. DeBisschop, and B.R. Clayton. - *Turbulent boundary-layer control by means of spanwise-wall oscillation*. - *AIAA J.*, 36(7):1157–1162, 1998.
- [14] K-S. Choi and M. Graham. - *Drag reduction of turbulent pipe flows by circular-wall oscillation*. - *Phys. Fluids*, 10(1):7–9, 1998.
- [15] W.J. Jung, N. Mangiavacchi, and R. Akhavan. - *Suppression of turbulence in wall-bounded flows by high-frequency spanwise oscillations*. - *Phys Fluids A*, 4 (8):1605–1607, 1992.
- [16] N. V. Nikitin. - *On the mechanism of turbulence suppression by spanwise surface oscillations*. - *Fluid Dyn.*, 35(2):185–190, 2000
- [17] M. Quadrio and P. Ricco. - *Critical assessment of turbulent drag reduction through spanwise wall oscillation*. - *J. Fluid Mech.*, 521:251–271, 2004.
- [18] M. Quadrio and S. Sibilla. - *Numerical simulation of turbulent flow in a pipe oscillating around its axis*. - *J. Fluid Mech.*, 424:217–241, 2000.
- [19] P. Ricco and M. Quadrio. - *Wall-oscillation conditions for drag reduction in turbulent channel flow*. - *Intl J. Heat Fluid Flow*, 29:601–612, 2008
- [20] P. Ricco and S. Wu. - *On the effects of lateral wall oscillations on a turbulent boundary layer*. - *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 29(1):41–52, 2004.
- [21] S. Tamano and M. Itoh. - *Drag reduction in turbulent boundary layers by spanwise traveling waves with wall deformation*. - *J. Turbulence*, 13:N9, 2012.
- [22] E. Touber and M.A. Leschziner. - *Near-wall streak modification by spanwise oscillatory wall motion and drag-reduction mechanisms*. - *J. Fluid Mech.*, 693:150–200, 2012.
- [23] R. Moarref and M. R. Jovanović. - *Model-based design of transverse wall oscillations for turbulent drag reduction*. - *J. Fluid Mech.*, 707:205–240, 2012.

- [24] S.M. Trujillo, D.G. Bogard, and K.S. Ball. - *Turbulent Boundary Layer Drag Reduction using an Oscillating Wall*. - AIAA Paper 97-1870, 1997.
- [25] Y. Du and G. E. Karniadakis. - *Suppressing wall turbulence by means of a transverse traveling wave*. - *Science*, 288:1230–1234, 2000.
- [26] Y. Du, V. Symeonidis, and G. E. Karniadakis. - *Drag reduction in wall-bounded turbulence via a transverse travelling wave*. - *J. Fluid Mech.*, 457:1–34, 2002.
- [27] T. W. Berger, J. Kim, C. Lee, and J. Lim. - *Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force*. - *Phys. Fluids*, 12(3):631–649, 2000.
- [28] J. Pang and K.-S. Choi. - *Turbulent drag reduction by Lorentz force oscillation*. - *Phys.Fluids*, 16(5):L35–L38, 2004.

Appendice A

```
function legge_di_taratura(U,V)
%LEGGE_DI_TARATURA    Create plot of datasets and fits
%  LEGGE_DI_TARATURA(U,V)
%  Creates a plot, similar to the plot in the main curve fitting
%  window, using the data that you provide as input.  You can
%  apply this function to the same data you used with cftool
%  or with different data.  You may want to edit the function to
%  customize the code and this help message.
%
%  Number of datasets:  1
%  Number of fits:     1

% Data from dataset "V vs. U":
%   X = U:
%   Y = V:
%   Unweighted
%

% Set up figure to receive datasets and fits
f_ = clf;
figure(f_);
set(f_,'Units','Pixels','Position',[1 35 1280 638]);
leg_h_ = []; leg_t_ = {}; % handles and text for legend
xlim_ = [Inf -Inf]; % limits of x axis
ax_ = axes;
set(ax_,'Units','normalized','OuterPosition',[0 0 1 1]);
set(ax_,'Box','on');
grid(ax_,'on');
axes(ax_); hold on;

% --- Plot data originally in dataset "V vs. U"
U = U(:);
V = V(:);
h_ = line(U,V,'Parent',ax_,'Color',[0.333333 0 0.666667],...
          'LineStyle','none','LineWidth',1,...
          'Marker','.', 'MarkerSize',12);
xlim_(1) = min(xlim_(1),min(U));
xlim_(2) = max(xlim_(2),max(U));
leg_h_(end+1) = h_;
leg_t_{end+1} = 'V vs. U';

% Nudge axis limits beyond data limits
if all(isfinite(xlim_))
    xlim_ = xlim_ + [-1 1] * 0.01 * diff(xlim_);
    set(ax_,'XLim',xlim_)
else
    set(ax_,'XLim',[0.0071700000000000002, 0.10999999999999999]);
end

% --- Create fit "fit 1"
ok_ = isfinite(U) & isfinite(V);
if ~all( ok_ )
    warning( 'GenerateMFile:IgnoringNansAndInfs', ...
            'Ignoring NaNs and Infs in data' );
end
```

```

end
st_ = [0.62247508600122747 0.58704470453141677 0.20774229273302847 ];
ft_ = fittype('rat11');

% Fit this model using new data
cf_ = fit(U(ok_),V(ok_),ft_,'Startpoint',st_);

% Or use coefficients from the original fit:
if 0
    cv_ = { 7.6139191177567538, -0.052426626493326349, 0.00074929957943576091};
    cf_ = cfit(ft_,cv_{:});
end

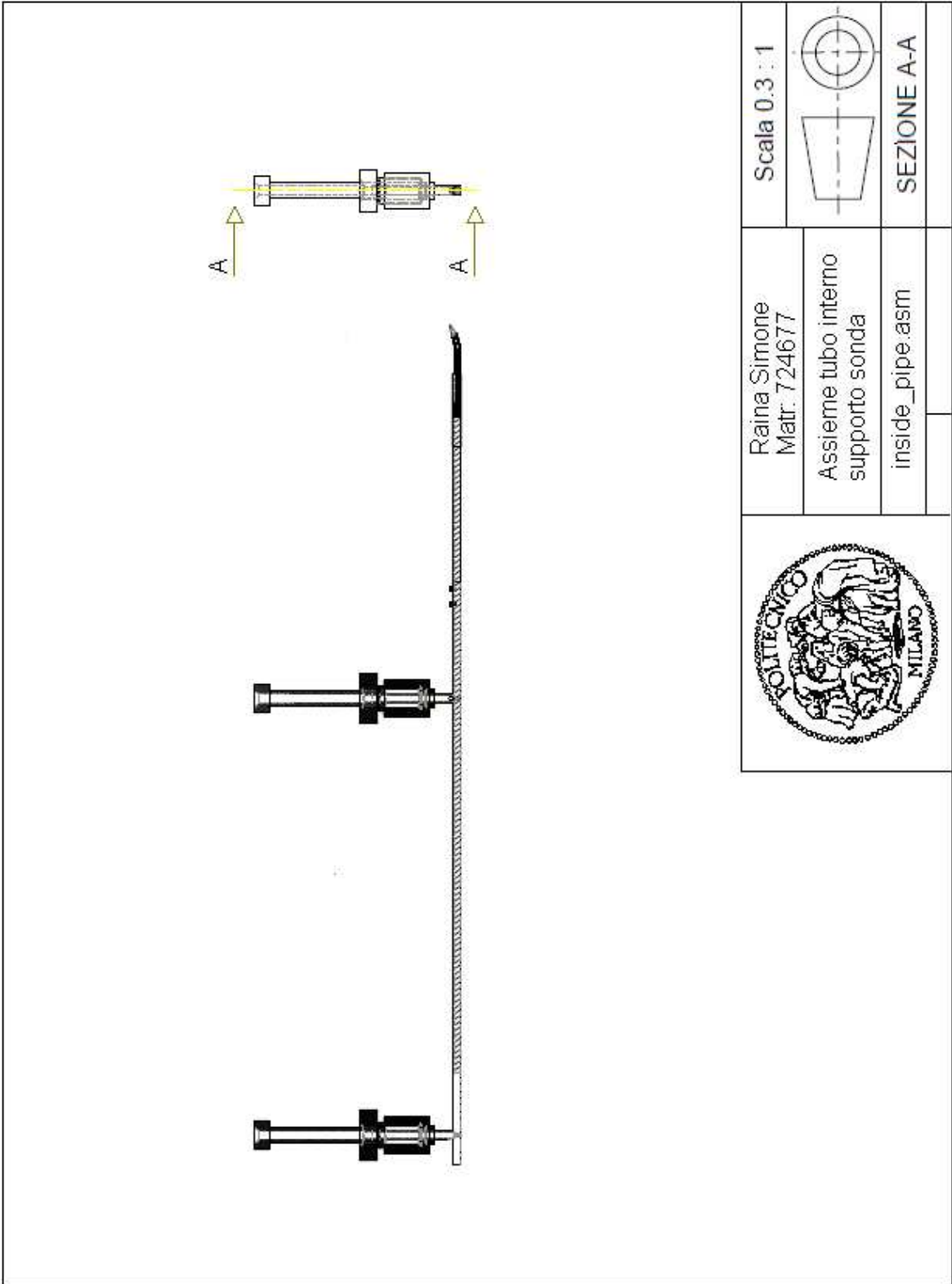
% Plot this fit
h_ = plot(cf_,'fit',0.95);
legend off; % turn off legend from plot method call
set(h_(1),'Color',[1 0 0],...
    'LineStyle','-','LineWidth',2,...
    'Marker','none','MarkerSize',6);
legh_(end+1) = h_(1);
legt_{end+1} = 'fit 1';

% Done plotting data and fits. Now finish up loose ends.
hold off;
leginfo_ = {'Orientation','vertical'};
h_ = legend(ax_,legh_,legt_,leginfo_{:}); % create and reposition legend
set(h_,'Units','normalized');
t_ = get(h_,'Position');
t_(1:2) = [0.765104,0.436437];
set(h_,'Interpreter','none','Position',t_);
xlabel(ax_,''); % remove x label
ylabel(ax_,''); % remove y label

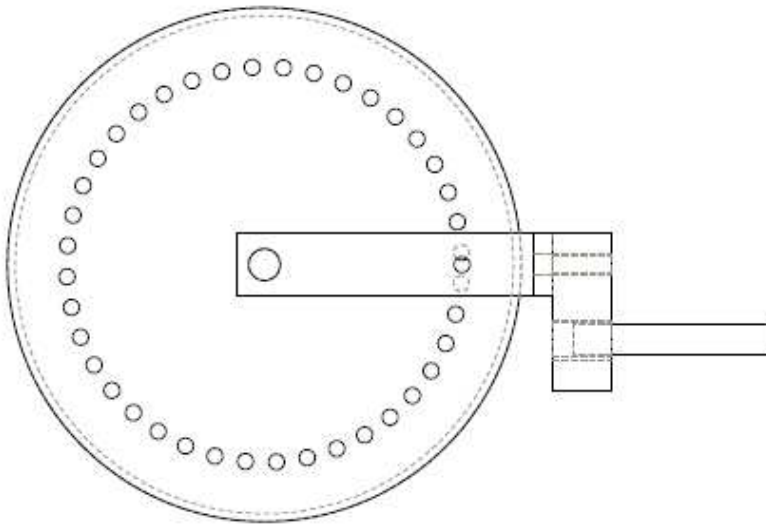
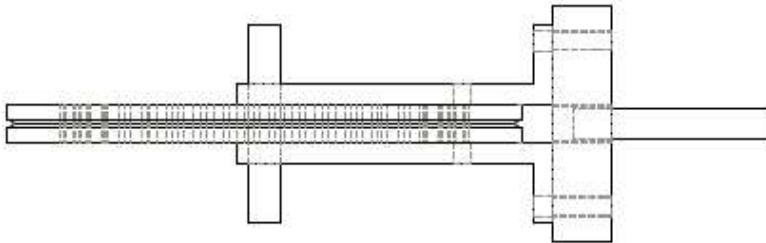
```

Appendice B

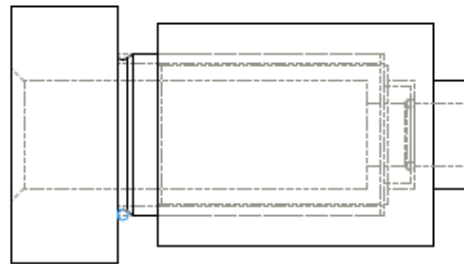
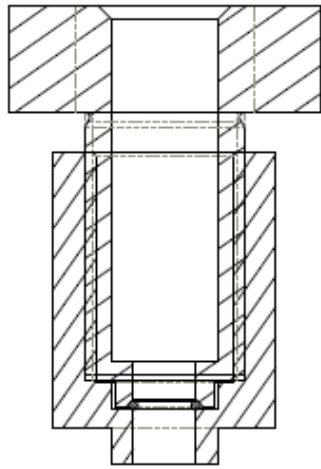
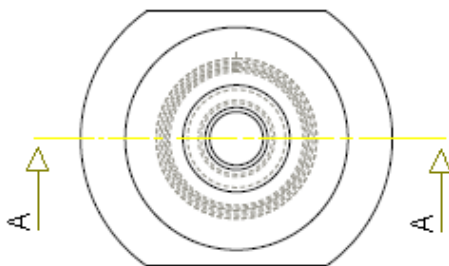
In quest' appendice verranno riportate alcune tavole di assiemi e sezioni dell'attrezzatura al fine di mostrare con maggior chiarezza alcuni dettagli. Tutti i disegni tecnici, il materiale CAD e gli assiemi del lavoro sono stati forniti su supporto disco al relatore.




	Raina Simone Matr. 724677	Scala 0.3 : 1
	Assieme tubo interno supporto sonda inside_pipe.asm	



	Raina Simone Matr. 724677	Scala 0.6 : 1
	Assieme ruota spostamento assiale nuovo_verticale.asm	



	Raina Simone Matr. 724677	Scala 1.5 : 1
	Sistema boccole tubo principale <small>sistema_boccole_premistoppa.asm</small>	