

POLITECNICO DI TORINO

I FACOLTÀ DI INGEGNERIA



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

MANUEL DA SILVA

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà d'Ingegneria

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Confronto delle prestazioni di banchi
sperimentali per la misura delle
caratteristiche di pattini ad aria**



Relatori:

Prof. Guido Belforte

Prof. Terenziano Raparelli

Ing. Federico Colombo

Manuel Da Silva

Ottobre 2012

Da Silva M., Manuel E.

**CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI DI BANCHI SPERIMENTALI
PER LA MISURA DELLE CARATTERISTICHE DI PATTINI AD ARIA**

Relatori: Prof. Guido Belforte, Prof. Terenziano Raparelli ed Ing. Federico Colombo. Torino, Politecnico di Torino. I Facoltà d'Ingegneria. Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica. Anno 2012, 115 pp.

Riassunto. Il presente lavoro si propone di esaminare il comportamento meccanico e fluidodinamico di tali pattini e confrontare le prestazioni di 2 banchi prova della caratteristica pneumostatica, uno residente presso i laboratori DIMEC – Politecnico di Torino, un altro attivo presso la ditta Mager s.r.l., analizzando le differenze delle 2 macchine a livello di impostazione di progetto (architettura, materiali, strumenti di misura, sistemi di generazione del carico, procedure di lavoro, ecc.), e finalmente confrontare le misure di set di pattini pneumostatici, a parità di misurando, le prestazioni rilevate dai 2 banchi. Con tutto questo si vuole identificare le cause che generano le eventuali differenze di misura e quindi ottenere così le modifiche da attuare che consentano di allineare le misure.

Negli ultimi anni sono state studiate diverse soluzioni per migliorare le prestazioni dei cuscinetti ad aria come diversi sistemi di alimentazione, cuscinetti in materiali porosi, cuscinetti a membrana o micro scanalature lavorate sulla superficie del pattino.

Il pattino di sostentamento ad aria o pattino pneumostatici reggispinga è un dispositivo che ha lo scopo di ridurre l'attrito meccanico nei movimenti di traslazione. È costituito da un corpo metallico di forma cilindrica o prismatica in cui, su una delle facce, sono praticati dei fori di piccolo diametro. Esso utilizza come fluido lubrificante l'aria in pressione che, uscendo dai fori, crea un meato di fluido fra la superficie forata e la guida di appoggio. Questo principio fisico garantisce l'assenza di contatto fra le due parti e il ridotto attrito di spostamento. Sulla superficie forata possono essere presenti anche delle scanalature denominate "ragnature" che aiutano a mantenere elevata la pressione e a distribuirla meglio.

Sono stati provati tre pattini di forma prismatica dotati di ragnatura. Il pattino 1 denominato DEA GLB-1H ha una larghezza di 76,2 mm, lunghezza di 115 mm e spessore di 25 mm, è costituito per lega A16082 e sopporta una forza da 3437,44 N. Il pattino 2 denominato PR2.6 ha una larghezza di 40 mm, lunghezza di 90 mm e spessore di 14 mm, è costituito per lega A16082 e sopporta una forza da 1412,16 N. Il pattino 3 denominato DEA R2.1 ha una larghezza di 30 mm, lunghezza di 68 mm e spessore di 12 mm, è costituito per acciaio AISI 420 e sopporta una forza da 800,23 N.

Per prima si è misurata la caratteristica statica, alimentando il pattino a 4 bar e si è notato che il pattino 1 ha una capacità di carico maggiore del pattino 2 per qualsiasi valore di meato e anche che il pattino 2 ha una capacità di carico maggiore del pattino 3 per qualsiasi valore di meato, come detto prima.

Per effettuare le prove descritte si utilizzano due banchi prova, uno presente nel laboratorio IBIS del Dipartimento di Meccanica e l'altro presente nella ditta Mager s.r.l. I banchi sono in grado di svolgere una prova denominata "*caratteristica statica*" che permette di determinare il carico sopportabile, la rigidità statica e il consumo di aria compressa al variare dell'altezza del meato d'aria.

Sono stati provati due metodi, uno di questi due metodi utilizzato per la ditta Mager e l'altro metodo usato per il Politecnico di Torino. L'analisi dei risultati prevede per prima la valutazione dell'efficacia del metodo di prova. Si esaminano poi le prove separandole per pattino scegliendo le prove migliori che verranno utilizzate per determinare le prestazioni e come prove campione per i confronti.

Inoltre, per effettuare le prove si hanno dovuto utilizzare tre posizioni differenti per il comparatore 1 nei due laboratori e così ottenere tutti i dati necessari per fare il confronto tra i due banchi di prova. La prima posizione il comparatore 1 è messo nella parte superiore centrale (molto vicino al puntale) dei pattini, mentre il comparatore 2 è messo nel bordo del pattino, e così ottenere il sollevamento o abbassamento di queste due parti dei pattini dovuto al carico introdotto. Nella seconda posizione di studio il comparatore 1 è messo sopra la piastra superiore, per determinare qualsiasi cambio nella piattaforma (sollevamento o abbassamento della piastra), ma il comparatore è messo vicino al centro della parte più lunga del pattino, mentre il comparatore 2 rimane nella stessa posizione visto nella prima posizione studiata. Per ultimo, nella terza posizione di studio il comparatore 1 e 2 sono messi anche nella piastra superiore come nella seconda posizione, ma in questo caso il comparatore 1 è messo vicino al centro della parte più corta del pattino.

Ottenuti tutti i risultati per ogni pattino e per ogni procedura, si è dovuto realizzare una correzione nella portata per tutte le prove, questo si è dovuto fare già che è stato utilizzato di strumenti di misura non tarati. Queste misure sono state realizzate di forma che la portata possa uscire dai fori dei pattini senza nessun ostacolo e variando la pressione di alimentazione di 1 a 5 bar, facendo questa procedura nella Mager e nel Politecnico di Torino si è stato ottenuto le equazioni caratteristiche della portata in funzione della pressione e finalmente acquisito la differenza di portata necessaria per fare la correzione per ogni pattino utilizzato.

Come si ha potuto vedere nei grafici ottenuti attraverso i dati raggiunti dei laboratori del Politecnico di Torino e della Mager, si ha potuto dire che per ottenere caratteristiche simili si deve utilizzare una unica procedura nei due laboratori; già che a diverse procedure si osserva delle variazioni considerevoli nelle curve ottenute. Inoltre, nella portata si deve fare la correzione necessaria per ottenere il vero valore massimo di portata e così evitare di avere una prestazione non corrispondenti al pattino utilizzato.

Il banco prova presente nel laboratorio IBIS del Dipartimento di Meccanica nel Politecnico di Torino è stata fornita dalla Mager s.r.l., che si è occupata della costruzione.

Come conclusioni sono stati ottenuti: 1) L'uso di procedure diverse nella ditta Mager come nel laboratorio IBIS del Politecnico di Torino, causa uno spostamento nelle curve caratteristiche della forza e portata contro il meato centrale o nel bordo. 2) L'uso di strumenti di misura non tarati inducono le eventuali differenze di misura, come l'abbiamo potuto vedere nei grafici della portata contro i diversi meati. 3) Anche le eventuale aumenti o diminuzioni della pressione di alimentazione durante le prove generano le differenze di misura. 4) Altro errore che causano differenza nelle misure sono quelle fatto per l'operatore al leggere i valori nei strumenti, come per esempio, nel flussimetro a galleggiante. 5) Il banco prova che si trova nel laboratorio del Politecnico di Torino, si rileva della deformazione della base all'applicare un carico crescente, causando variazione nella vera altezza del meato, principalmente nel centro del pattino già che non può essere misurata la vera deformazione della base, mentre nella macchina che si trova nella ditta Mager non presenta questo problema, già che la piastra di appoggio è in acciaio e grossa, evitando così l'origine alle deformazioni. 6) Le prove realizzate nel laboratorio IBIS del Politecnico di torino, non si ha tenuto conto il coefficiente di compensazione dovuto all'inclinazione del tastatore rispetto alla direzione di spostamento del meato, altro indicatore che generano le eventuale differenze nelle misure.

Come raccomandazioni sono stati ottenuti: 1) L'uso di una procedura unica, per consentire di allineare le misure. 2) Verificare che la taratura dei strumenti non sia scaduta (come nella cella di carico, comparatore elettronico, dinamometro, manometri o trasduttore di pressione, flussimetri) e anche l'uso di strumenti più precisi, così si limitano le incertezze nelle misure. 3) Accertarsi che il valore della pressione di alimentazione sia la più prossima possibile al valore di specifica. 4) Automatizzare entrambi sistemi e utilizzare strumenti di misura digitali. 5) Per ottenere caratteristiche ben definite, è opportuno di riprogettare delle piastre di appoggio in modo da eliminare gli errori di planarità, facendole più rigide o robuste. 6) Accertarsi che la leva del tastatore sia il più possibile orizzontale e se non è così, compensare l'inclinazione del tastatore.

RINGRAZIAMENTI

Dio per avermi dato meravigliose opportunità nella vita e mi guida in ogni momento della mia esistenza.

Sue Eccellenze, il Politecnico di Torino e l'“Universidad Central de Venezuela (¡la casa que vence las sombras!)”, ho sperimentato la più grande conoscenza nel settore di ingegneria e umanista. La porterò sempre in alto e La rappresenteó con orgoglio.

Mia madre e mio padre, sono infinitamente orgoglioso di essere suo figlio. Mi hanno fornito l'allevamento e la cura che qualsiasi figlio vorrebbe avere, sempre nell'ambito di regimi di rispetto, l'umiltà, la speranza e la convinzione di eccellere. Mi hanno insegnato che tutto è fatto con amore e lavoro duro; e esempio vivente di questo sono voi.

Mio fratello, zii, zie e cugini, sempre mi hanno aiutato e sostenuto in tutto ciò che hanno potuto e in cui avevo bisogno, vi ringrazio con tutto il cuore.

Il mio tutor aziendale, Giorgio Mang. Grazie per avermi dato l'opportunità di sviluppare questo lavoro, per offrirmi una consulenza brillante e per essere non solo un ottimo ingegnere, ma grande persona e amico.

I miei relatori accademici, Prof. Guido Belforte, Prof. Terenziano Raparelli e Ing. Federico Colombo, grande persone, sempre pronto ad aiutarmi e guidarmi accademicamente. Grazie mille.

Ai miei compagni di classe Pasquale Aversano, Alessandro Bertucci, Bruno de Stasio e Tharek Mohtar, che siamo entrati nel Politecnico di Torino quel mese di ottobre 2010 ed ai miei compagni di classe José Miguel Nava, Daniel Rivera, Rigo Barrios, Guillermo Ochoa e Liber Castro, che siamo entrati nell'“Universidad Central de Venezuela” (UCV), quel mese di ottobre 2006 e fin dall'inizio abbiamo formato senza dubbio i migliori gruppi di studio e lavoro che si possa avere, non abbiamo mai caduto e abbiamo gradualmente acquisito i migliori conoscenze e riempiendo quell'album che è il piano di studio che ci è formato come Ingegneri di Petrolio e Ingegneri Meccanici.

Ai miei amici, che sono molti e, come non vorrei lasciare a nessuno fuori da questa lista, preferisco non nominare alcun. Grazie per essere sempre lì tra alti e bassi, godiamo grandi momenti della nostra vita insieme e quelli che vengono saranno migliori con il favore di Dio.

Manuel Da Silva.

INDICE

ELENCO DELLE FIGURE.....	x
ELENCO DELLE TABELLE	xiii
INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO I: APPROCCIO DEL PROBLEMA.....	2
CAPITOLO II: RICHIAMI TEORICI.....	4
2.1. IL PATTINO PNEUMOSTATICO REGGISPINTA.....	4
2.1.1. Caratteristiche generali	4
2.1.2. Caratteristiche funzionali	6
2.1.3. Soluzioni costruttive e di montaggio.....	10
2.1.4. Progettazione e realizzazione	11
2.1.5. Applicazioni.....	11
2.2. TEORIA DELL'UGELLO	13
2.2.1. Ugello semplicemente convergente	13
2.2.2. Ugello De Laval (convergente-divergente).....	14
2.3. FORMULA DELLA PORTATA ISO E COEFFICIENTE DI EFFLUSSO	17
2.4. STATO DELL'ARTE.....	19
2.4.1. Giulio Lanza, Studio dell'efflusso di aria compressa attraverso ugelli per pattini pneumostatici piani.....	19
2.4.2. Massimo Filippa, Studio teorico e sperimentale di supporti ad aria	20
2.4.4. H. Mori, Y. Miyamatsu, Theoretical flow-models for externally pressurized gas bearings.....	21
2.4.6. D.A. Boffey, P. M. Wilson, An experimental investigation of the pressures at the edge of a gas bearing pocket	35
2.4.7. F. Al-Bender, H. Van Brussel, Symmetric radial laminar channel flow with particular reference to aerostatic bearings.....	37

2.4.8. Sadek Z. Kassab, Elsayed M. Noureldeen, Medhat A. Shawky, Effects of operating conditions and supply hole diameter on the performance of a rectangular aerostatic bearing	38
2.4.9. Air bearings with a damping function for metal-cutting machine tools, New Way Air Bearings	42
2.4.10. Air Bearing Technology, Westwind Air Bearings	43
2.4.11. G. Belforte, T. Raparelli, V. Viktorov, Theoretical investigation of fluid inertia effects and stability of self-acting gas journal bearings, October 1999	45
2.4.12. G. Belforte, T. Raparelli, V. Viktorov, A. Trivella, Discharge coefficients of orifice-type restrictor for aerostatic bearings, July 2006.....	47
2.4.13. G. Belforte, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, C. Visconte, Numerical analysis on the supply hole discharge coefficients in aerostatic bearings, AITC-AIT September 2006	49
2.4.14. G. Belforte, F. Colombo, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, Study of a gas thrust bearing with supply grooves, Toyama September 2008.....	51
2.4.15. F. Colombo, A. Trivella, Air bearing testing, November 2008	53
2.4.16. G. Belforte, F. Colombo, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, Aerostatic thrust bearings: experimental comparison between grooved and plane pads, June 2009.....	58
2.4.17. G. Belforte, F. Colombo, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, Aerostatic thrust bearings: experimental comparison between different feeding solutions, June 2009.....	59
CAPITOLO III: BANCHI PROVA E METODI DI MISURA	60
3.1. STRUTTURE	60
3.2. CIRCUITI DELL'ARIA	63
3.3. STRUMENTAZIONE	64
3.3.1. Misurazione della forza.....	65
3.3.2. Misurazione del meato	66
3.3.3. Misurazione della portata.....	70
3.3.4. Misurazione della pressione.....	72
3.3.5. Scheda di acquisizione	73
3.4. SOFTWARE DI ACQUISIZIONE.....	73

3.4.1. Interfaccia grafica	73
3.5. USO DEL BANCO CON METODI DI PROVA	75
3.5.1. Caratterizzazione statica	76
3.5.2. Caratteristica di pressione	78
3.5.3. Caratterizzazione statica con azzeramento mediante flussimetro	78
3.5.4. Caratteristica di pressione con azzeramento mediante flussimetro.....	81
3.5.5. Caratteristica statica a valori di meato prefissati.....	83
CAPITOLO IV: METODOLOGIA	85
CAPITOLO V: PATTINI	89
5.1. Caratteristiche	89
CAPITOLO VI: ANALISI DELLE RILEVAZIONI	91
6.1. SIGNIFICATO DELLE RILEVAZIONI	91
6.1.1. Analisi della curva di forza e di rigidezza.....	91
6.1.2. Analisi della curva di portata	92
6.2. ANALISI PRELIMINARE DELLE DIFFERENZE DELLE 2 MACCHINE A LIVELLO DI IMPOSTAZIONE DI PROGETTO (ARCHITETTURA, MATERIALI, STRUMENTI DI MISURA, SISTEMI DI GENERAZIONE DEL CARICO, ECC.) .	93
6.3. CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI RILEVATE DAI 2 BANCHI	95
CONCLUSIONI	110
RACCOMANDAZIONI.....	111
B I B L I O G R A F I A	112
NOMENCLATURA	114
Elenco dei Simboli.....	114
Simboli Matematici.....	115

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Pattino pneumostatico elementare.....	5
Figura 2: Modello pneumatico.....	6
Figura 3: Esempio di andamento della forza	7
Figura 4: Esempio di andamento della rigidezza	7
Figura 5: Esempio di andamento della portata.....	8
Figura 6: Esempi di pattini pneumostatici	9
Figura 7: Schema di un ugello semplicemente convergente	13
Figura 8: Legge della portata per un ugello semplicemente convergente	14
Figura 9: Andamenti di pressione nell'ugello De Laval nelle varie condizioni di funzionamento.....	15
Figura 10: Flusso turbolento all'interno del meato	22
Figura 11: Flusso con crescita degli strati limite all'interno del meato	23
Figura 12: Flusso laminare all'interno del meato	24
Figura 13: Salto di pressione per aumento della velocità da un punto di ristagno	24
Figura 14: Salto di pressione per riduzione della sezione di flusso	26
Figura 15: Salto di pressione per aumento della quantità di moto	26
Figura 16: Salto di pressione attraverso un'onda d'urto	27
Figura 17: Profili di pressione principali.....	28
Figura 18: Modello A di flusso per pattini autocompensati	29
Figura 19: Modello B di flusso per pattini autocompensati.....	29
Figura 20: Modello C1 di flusso per pattini autocompensati.....	30
Figura 21: Modello C2 di flusso per pattini autocompensati.....	30
Figura 22: Modello D di flusso per pattini autocompensati	31
Figura 23: Modello F di flusso per pattini autocompensati.....	32
Figura 24: Modelli di flusso per pattini autocompensati: Modello G	32

Figura 25: Banco prova	36
Figura 26: Forma del meato e andamento delle presioni.....	37
Figura 27: Impianto e sistema di misura del banco prova	40
Figura 28: Struttura del banco prova	41
Figura 29: Cuscinetto in esame	45
Figura 30: Pattini in esame.....	48
Figura 31: Cuscinetto reggispinta	52
Figura 32: Banco prova per cuscinetti pneumostatici	54
Figura 33: Cuscinetto per movimenti lineari	55
Figura 34: Pistone senza guarnizioni: tre diverse geometrie.....	56
Figura 35: Banco prova presso nel laboratorio IBIS del Politecnico di Torino	62
Figura 36: Banco prova presso nella ditta Mager s.r.l.	62
Figura 37: Circuito dell'aria compressa presso il Politecnico di Torino	63
Figura 38: Circuito dell'aria compressa presso la ditta Mager	64
Figura 39: Cella di carico FUTEK LRF300	66
Figura 40: Cella di carico DS EUROPE 546QDT*	66
Figura 41: Comparatore LVDT.....	68
Figura 42: Montaggio dei comparatori su base magnetica	69
Figura 43: Flussimetro L6.3/250	70
Figura 44: Flussimetro L627	71
Figura 45: Principio di funzionamento di un flussimetro.....	72
Figura 46: Interfaccia grafica del programma ACQUISIZIONE.VI	74
Figura 47: Interfaccia grafica utilizzata nella ditta Mager.....	75
Figura 48: Procedura utilizzata nel Laboratorio IBIS del Politecnico di Torino	85
Figura 49: Procedura utilizzata nella ditta Mager s.r.l.	86
Figura 50: Prima posizione dei comparatori 1 e 2	87

Figura 51: Seconda posizione dei comparatori 1 e 2	88
Figura 52: Terza posizione dei comparatori 1 e 2	88
Figura 53: Pattino DEA GLB-1H	89
Figura 54: Pattino PR2.6.....	89
Figura 55: Pattino DEA R2.1	89
Figure 56: Caratteristiche peculiari della curva di forza e di rigidezza	92
Figura 57: Caratteristiche peculiari della curva di portata	93
Figura 58: Correzione della portata per il pattino DEA GLB-1H.....	100
Figura 59: Correzione della portata per il pattino PR2.6	101
Figura 60: Correzione della portata per il pattino DEA R2.1.....	102
Figura 61: Curve di forze contro meato centrale per il pattino GLB-1H	103
Figura 62: Curve di forze contro meato nel bordo per il pattino DEA GLB-1H	104
Figura 63: Curve di portate contro meato centrale per il pattino DEA GLB-1H.....	104
Figura 64: Curve di portate contro meato nel bordo per il pattino DEA GLB-1H	105
Figura 65: Curve di forze contro meato centrale per il pattino PR2.6	105
Figura 66: Curve di forze contro meato nel bordo per il pattino PR2.6	106
Figura 67: Curve di portate contro meato centrale per il pattino PR2.6	106
Figura 68: Curve di portate contro meato nel bordo per il pattino PR2.6.....	107
Figura 69: Curve di forze contro meato centrale per il pattino DEA R2.1	107
Figura 70: Curve di forze contro meato nel bordo per il pattino DEA R2.1	108
Figura 71: Curve di portate contro meato centrale per il pattino DEA R2.1	108
Figura 72: Curve di portate contro meato nel bordo per il pattino DEA R2.1	109

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1: Vantaggi e svantaggi dei vari metodi di calcolo	35
Tabella 2: Caratteristiche dei pattini.....	90
Tabella 3: Differenze fra le due macchine a livello di impostazione di progetto	93
Tabella 4: Risultati ottenuto nella Mager	95
Tabella 5: Risultati ottenuto nel Politecnico di Torino con la procedura Mager	96
Tabella 6: Risultati ottenuto nel Politecnico con la procedura del Politecnico	96
Tabella 7: Risultati ottenuto nella Mager	97
Tabella 8: Risultati ottenuto nel Politecnico di Torino con la procedura Mager	97
Tabella 9: Risultati ottenuto nel Politecnico con la procedura del Politecnico	98
Tabella 10: Risultati ottenuto nella Mager	98
Tabella 11: Risultati ottenuto nel Politecnico di Torino con la procedura Mager	99
Tabella 12: Risultati ottenuto nel Politecnico con la procedura del Politecnico	99
Tabella 13: Correzione della portata per il pattino DEA GLB-1H	100
Tabella 14: Correzione della portata per il pattino PR2.6.....	101
Tabella 15: Correzione della portata per il pattino DEA R2.1	102

INTRODUZIONE

Con lo sviluppo delle tecnologie nascono nuove esigenze di movimentazione a basso attrito, elevata velocità, precisione e ripetibilità di posizionamento. L'uso di elementi volventi certamente riduce l'attrito, ma non garantisce elevate precisioni di posizionamento a causa del contatto fra le parti. Da queste necessità nasce l'impiego dei pattini a lubrificazione statica, in particolare si usano quelli pneumostatici dove la presenza di olio interferisce con l'ambito di applicazione.

Il pattino di sostentamento ad aria o pattino pneumostatici reggispinta è un dispositivo che ha lo scopo di ridurre l'attrito meccanico nei movimenti di traslazione. È costituito da un corpo metallico di forma cilindrica o prismatica in cui, su una delle facce, sono praticati dei fori di piccolo diametro. Esso utilizza come fluido lubrificante l'aria in pressione che, uscendo dai fori, crea un meato di fluido fra la superficie forata e la guida di appoggio. Questo principio fisico garantisce l'assenza di contatto fra le due parti e il ridotto attrito di spostamento. Sulla superficie forata possono essere presenti anche delle scanalature denominate "ragnature" che aiutano a mantenere elevata la pressione e a distribuirla meglio.

Fissate a priori le dimensioni esterne del pattino, l'obiettivo del progettista è massimizzare il carico sopportabile e la rigidità, cercando al contempo di ridurre il più possibile il consumo di aria. Solitamente il meato di lavoro del pattino si ha quando la rigidità è massima (nel campo $8 \div 12 \mu\text{m}$). Gli elementi su cui si può agire sono i fori (dimensione, numero e disposizione) e la ragnatura (presenza / assenza, dimensione e forma).

CAPITOLO I

APPROCCIO DEL PROBLEMA

Prendendo in considerazione il lavoro svolto da ricercatori di questa ed altre Università, da aziende del settore e da precedenti tesisti, si vuole esaminare il comportamento meccanico e fluidodinamico di tali pattini e confrontare le prestazioni di 2 banchi prova della caratteristica pneumostatica, uno residente presso il laboratorio DIMEC – Politecnico di Torino, un altro attivo presso la Mager s.r.l. Questa analisi è messa in atto mediante la rilevazione di misure per determinare il carico sopportabile e il consumo di aria.

Si sono esaminati pattini di forma prismatica dotati di ragnatura.

Per effettuare le prove descritte si utilizzano due banchi prova, uno presente nel laboratorio IBIS del Dipartimento di Meccanica e l'altro presente nella ditta Mager s.r.l. I banchi sono in grado di svolgere una prova denominata "*caratteristica statica*" che permette di determinare il carico sopportabile, la rigidità statica e il consumo di aria compressa al variare dell'altezza del meato d'aria.

Sono stati provati due metodi, uno di questi due metodi utilizzato per la ditta Mager e l'altro metodo usato per il Politecnico di Torino. L'analisi dei risultati prevede per prima la valutazione dell'efficacia del metodo di prova. Si esaminano poi le prove separandole per pattino scegliendo le prove migliori che verranno utilizzate per determinare le prestazioni e come prove campione per i confronti.

Il banco prova presente nel laboratorio IBIS del Dipartimento di Meccanica nel Politecnico di Torino è stata fornita dalla Mager s.r.l., che si è occupata della costruzione.

OBIETTIVO GENERALE

- Confrontare le prestazioni di 2 banchi prova della caratteristica pneumostatica, uno residente presso i laboratori DIMEC – Politecnico di Torino, un altro attivo presso la ditta Mager s.r.l.

OBIETTIVI SPECIFICI

- Analizzare le differenze delle 2 macchine a livello di impostazione di progetto (architettura, materiali, strumenti di misura, sistemi di generazione del carico, procedure di lavoro, ecc.).
- Confrontare la misura di set di pattini pneumostatici, a parità di misurando, le prestazioni rilevate dai 2 banchi e quindi le differenze.
- Identificare le cause che generano le eventuali differenze di misura.
- Identificare le modifiche da attuare e che consentano di allineare le misure.

CAPITOLO II

RICHIAMI TEORICI

In questo capitolo si vuole illustrare una breve rassegna sulle caratteristiche dei pattini pneumostatici piani; come il principio di funzionamento, geometrie e dimensioni e applicazioni.

2.1. IL PATTINO PNEUMOSTATICO REGGISPINTA

Fra tutti i cuscinetti esistenti, si studiano in questa tesi i pattini piani pneumostatici reggispinta.

Il continuo sviluppo della tecnica ha reso necessario, per talune applicazioni, movimento con scarso attrito, elevata velocità, precisione e ripetibilità di posizionamento. L'uso di elementi volventi certamente riduce l'attrito, ma non garantisce elevate precisioni di posizionamento per via dell'aderenza di primo distacco. Nei casi di moto alternato, aumentano notevolmente gli istanti di aderenza e di conseguenza la coppia richiesta per il movimento. Per questi motivi occorre che non vi sia contatto fra le superfici affacciate.

Da queste necessità nasce l'impiego dei pattini a lubrificazione statica, in cui un fluido in pressione è interposto fra le due superfici affacciate per creare il sostentamento. Si utilizzano quelli pneumostatici dove l'uso dell'olio lubrificante interferisce con l'applicazione per cui sono adottati (es. tessile, alimentare e chimico). È poi da considerarsi un vantaggio il fatto che l'aria sia disponibile gratuitamente ovunque e non sono quindi necessari circuiti di ricircolo per recuperare il fluido. Nel caso dei supporti rotanti l'uso dell'aria permette di raggiungere velocità elevatissime, un ordine di grandezza in più rispetto ai cuscinetti volventi.

2.1.1. Caratteristiche generali

Esistono numerose tipologie costruttive di pattini pneumostatici reggispinta. Tutte le soluzioni presentano uno o più fori per l'ingresso dell'aria di diametro $0,2 \div 0,3$ mm, questi sono pattini di vecchio tipo o di dimensioni minori per pattini di nuova

concezione, anche meno di 0,1 mm. I fori sono dotati di una strozzatura per garantire un flusso d'aria ridotto e mantenere elevata la pressione nel meato.

Per aumentare la capacità di carico sono presenti delle tasche per distribuire la pressione su una superficie più ampia, però se tale volume non è sufficientemente piccolo si possono generare vibrazioni di risonanza (*air hammer*). Per avere insieme portanza e stabilità, si possono usare più fori di alimentazione distribuiti sulla superficie di spinta. Solitamente i fori sono contornati da un piccolo pozzetto che enfatizza ulteriormente la capacità portante. Se non si è ancora soddisfatti del sostentamento, si creano delle sottili scanalature (*microragnature*) distribuite sulla superficie del pattino che collegano i vari fori di alimentazione. La distribuzione di pressione è molto migliorata senza aumentare di molto la massa d'aria sotto il pattino.

Nei pattini pneumostatici si presenta l'effetto *squeeze* quando si applica un carico in direzione normale alle superfici di spinta. All'interno del meato si genera una forza che si oppone allo spostamento. Tale effetto è meno sentito, quanto sono più estese tasche e ragnature.

In figura 1 è mostrato lo schema di un pattino pneumostatico elementare, in cui si possono distinguere gli elementi principali.

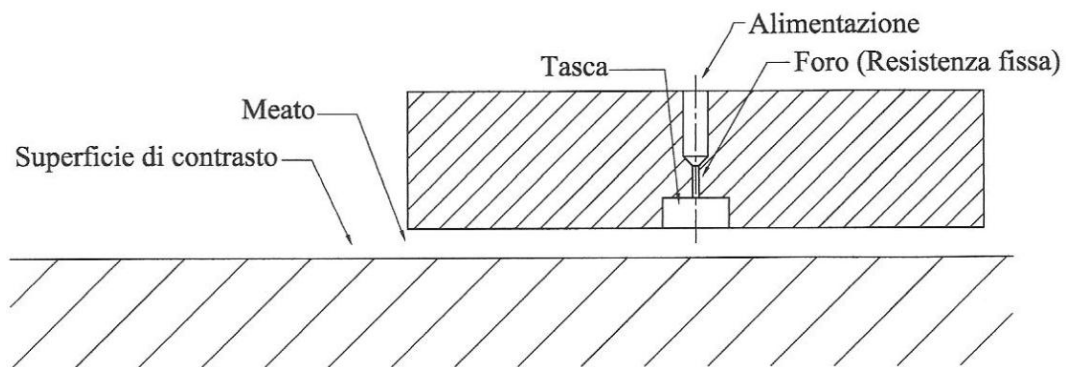


Figura 1: Pattino pneumostatico elementare

In figura 2 è mostrato un modello circuitale pneumatico del pattino. Il foro di alimentazione è modellizzato come una resistenza fissa, essendo costanti le sue dimensioni; il meato è una resistenza variabile, in quanto modifica le sue dimensioni al variare del carico.

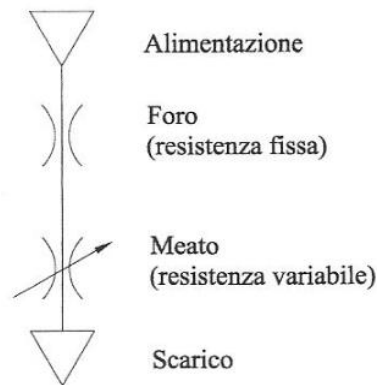


Figura 2: Modello pneumatico

2.1.2. Caratteristiche funzionali

La pressione di alimentazione varia fra 3 e 6 bar. Il pattino pneumostatico è caratterizzato da due grandezze principali: la *portanza* e la *rigidezza*. La portanza è la capacità di carico del pattino, è proporzionale alla pressione di alimentazione e alla superficie di appoggio. La rigidezza è la caratteristica di non variare il meato di lavoro al variare della forza applicata, si calcola come la derivata della forza rispetto al meato; molto richiesta in applicazioni metrologiche e scientifiche. L'aria è un gas comprimibile, quindi il meato si comporta come una molla, a rigidezza variabile, con un suo carico minimo e massimo. Lo spessore del meato influenza enormemente la rigidezza e la dinamica del pattino. Il meato ideale dipende anche dalla accuratezza costruttiva del pattino, in particolare la planarità della superficie e la sua rugosità. Il *consumo* definisce la portata d'aria che passa per il pattino.

Tutte le grandezze caratteristiche del pattino sono tracciate in funzione del meato. La forza sopportabile diminuisce con l'aumentare del meato; sulla curva si presenta un flesso in corrispondenza del meato di progetto; questo è il punto di rigidezza massima, come si mostra nella figura 3. L'andamento della rigidezza avrà quindi un massimo in corrispondenza del flesso per poi essere minore agli altri meati, come si osserva nella figura 4. Il massimo della rigidezza è funzione del numero e della dimensione dei fori, in particolare si sposta verso i meati maggiori all'aumentare la sezione di efflusso. Esaminando nuovamente la curva della forza si possono notare tre carichi caratteristici: il punto di rigidezza massima che, è il carico di progetto, il punto di meato nullo che corrisponde al carico massimo applicabile prima di avere la compressione del pattino ed il punto di massimo applicabile prima di avere la compressione del pattino ed il punto di massimo meato, dove il pattino è soggetto unicamente al peso proprio. Si può notare che il consumo di aria cresce con l'aumento del meato, come si può vedere nella figura 5.

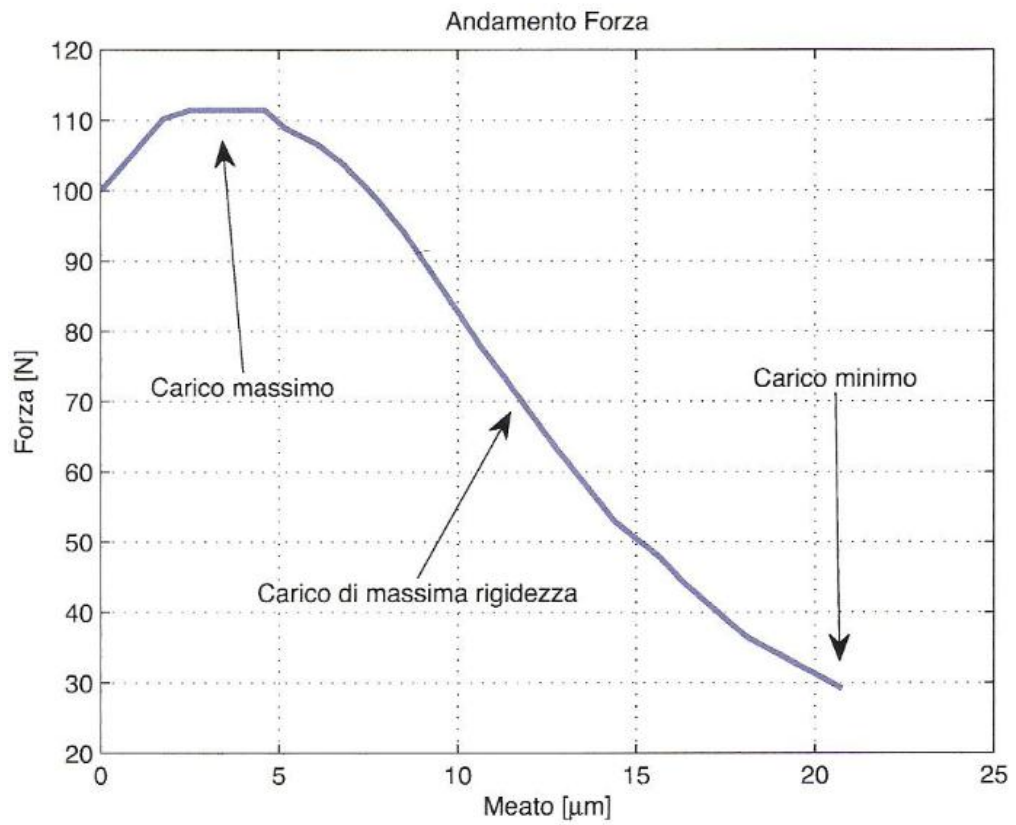


Figura 3: Esempio di andamento della forza

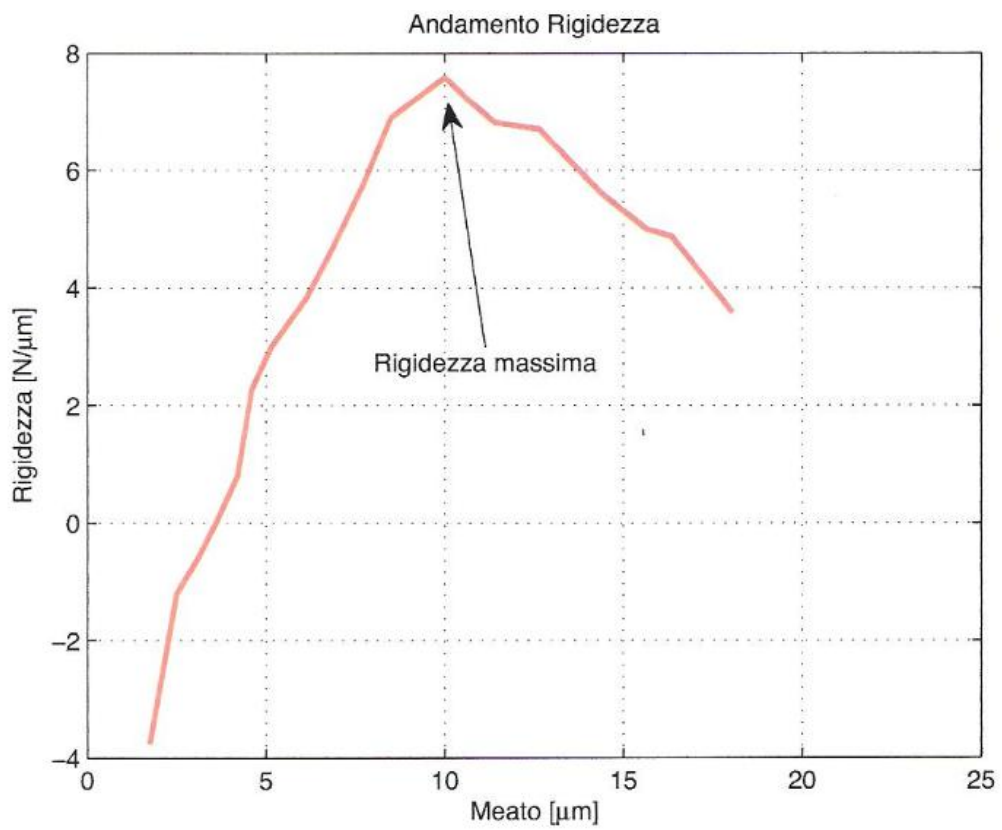


Figura 4: Esempio di andamento della rigidità

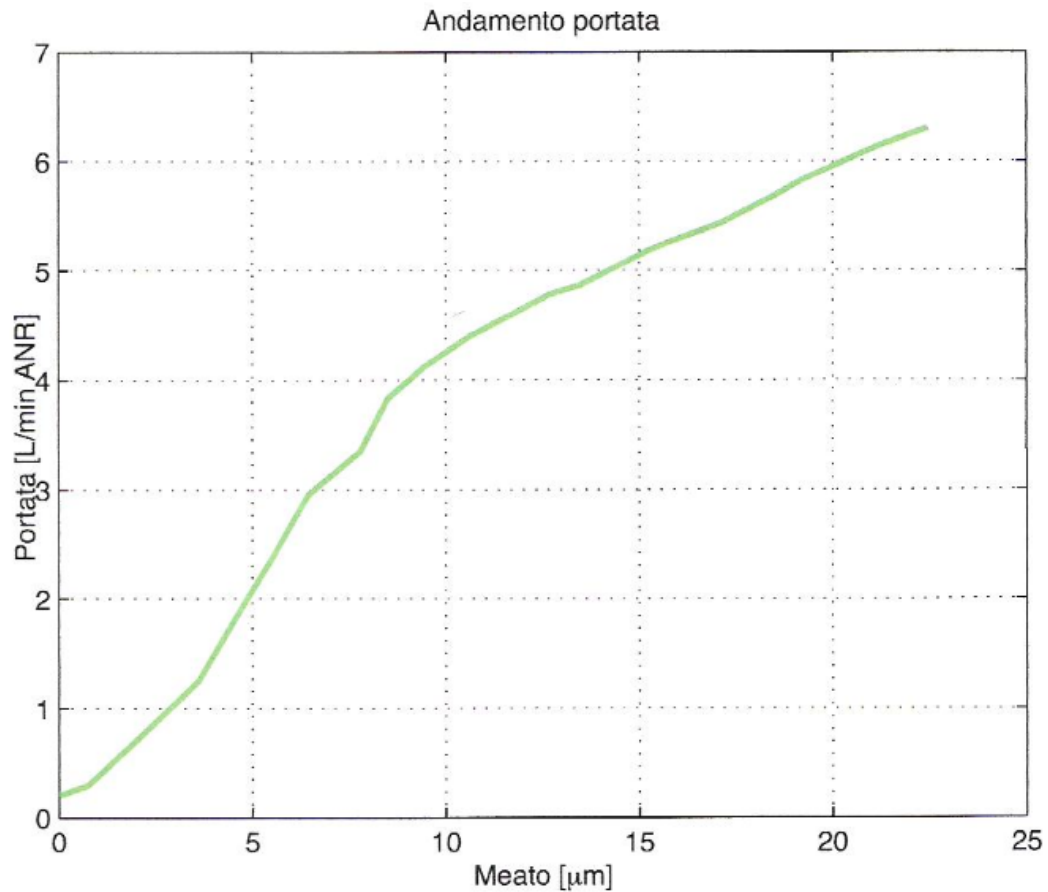


Figura 5: Esempio di andamento della portata

I carichi specifici a 4 bar di alimentazione possono raggiungere i 3 daN/cm^2 . Le portanze variano da decine di daN fino a 1000 daN, con meati variabili fra 5 e 20 μm .

La geometria del pattino, il numero e il diametro dei fori, la forma e le dimensioni della microragnatura e la pressione di alimentazione sono i parametri che caratterizzano staticamente e, insieme alle masse in movimento, dinamicamente il pattino. In figura 6 sono mostrati alcuni esempi costruttivi. La risonanza del sistema deve essere analizzata per ogni singolo caso perché dipende sia dai fattori appena citati, ma anche dalle oscillazioni del flusso di aria all'alimentazione. A tale problema si può ovviare applicando degli strozzatori che stabilizzino la portata.

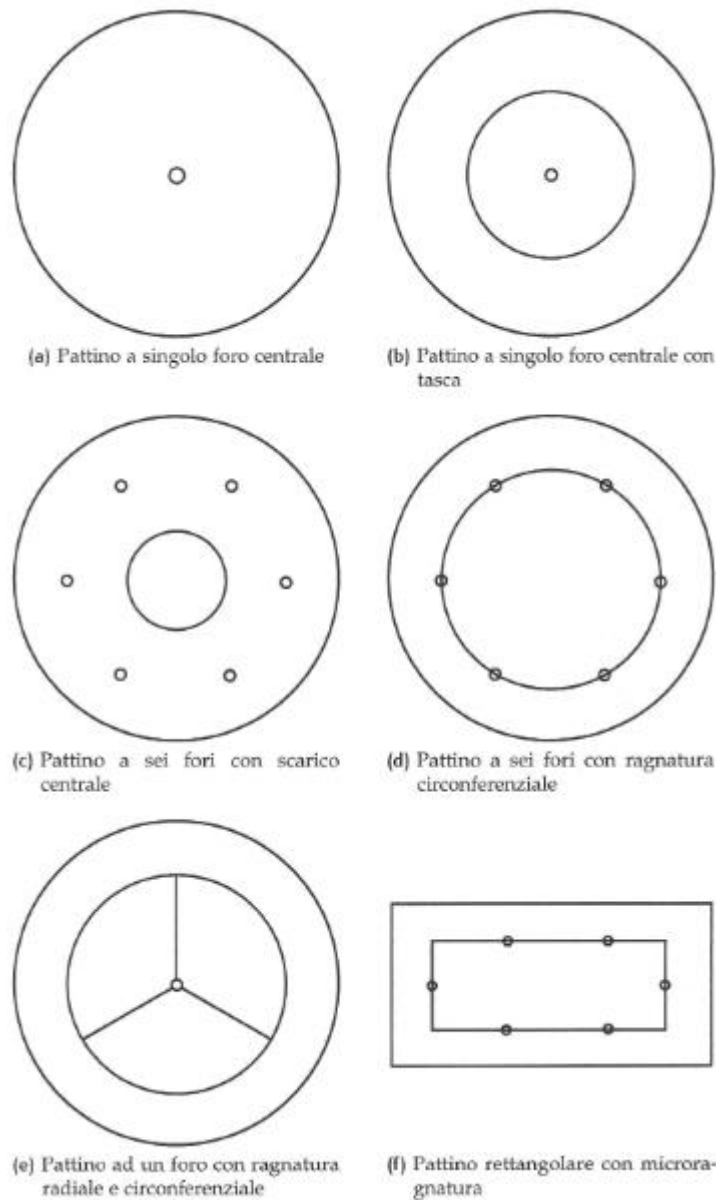


Figura 6: Esempi di pattini pneumostatici

Un pattino pneumostatico perfetto dovrebbe avere uno spessore di meato tendente a zero per avere massima portanza, massima rigidità e minore consumo possibili. Tali caratteristiche sono naturalmente limitate dalla finitura della superficie e dal filtraggio non corretto dell'aria di alimentazione. I filtri applicati hanno capacità filtrante inferiore a $1\ \mu\text{m}$ e devono filtrare l'olio e la condensa; naturalmente l'aria in ingresso dovrebbe possedere già queste caratteristiche. La raccorderia deve essere in materiale non ossidabile e le guarnizioni non devono rilasciare delle particelle.

La rugosità del pattino deve essere la più contenuta possibile e normalmente pari a $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, mentre gli errori di forma devono essere contenuti entro il 10 ÷ 20 % dell'altezza di meato, per favorire il flusso di aria.

Le guide di scorrimento sono costruite di solito di materiale non ossidabile. In applicazioni critiche si realizzano riporti di resine autolubrificanti per prevenire le superfici da possibili danni (es. *Turcite*). Per sicurezza è utile prevedere un pressostato che blocchi il movimento se si ha un calo della pressione di alimentazione.

2.1.3. Soluzioni costruttive e di montaggio

I pattini pneumostatici possono essere di acciaio inossidabile, per privilegiare la rigidità o in alluminio anodizzato, per la leggerezza. Sono previsti indurimenti superficiali per le applicazioni gravose.

La forma è del tipo circolare o rettangolare con fissaggio rigido o pivottante, o costruzione integrata. Il fissaggio rigido si ottiene collegando meccanicamente il pattino alla sua slitta mediante viti. Il fissaggio pivottante è realizzato mediante un perno filettato con testa sferica che si inserisce in una cava del pattino. Il perno filettato consente anche la regolazione del meato. Il fissaggio della sfera avviene mediante un anello elastico per i pattini più piccoli e mediante una piastrina ausiliaria per quelli più grandi. La costruzione integrata è realizzata lavorando direttamente il pattino all'interno del corpo che deve essere sostenuto.

Il fissaggio pivottante è il più utilizzato perchè permette l'autoallineamento del pattino. Quando ci sono due pattini contrapposti, conviene mettere uno dei due pattini in versione pivottante ammortizzata da una serie di molle a tazza. I sistemi elastici permettono di compensare le piccole irregolarità della guida evitando costose lavorazioni. Il fissaggio rigido, o addirittura integrato, permette d'altra parte di ridurre masse ed ingombri. Il perfetto accoppiamento fra perno e pattino è fondamentale per la precisione di lavoro, per cui la superficie dello snodo sferico deve essere lappata e controllata dimensionalmente.

La superficie di lavoro del pattino deve essere lappata per assicurare la minore rugosità possibile. Se la costruzione è pivottante occorre rendere concava la superficie per evitare impuntamenti e compensare la flessione dovuta al carico. La concavità è di 1 ÷ 10 μm secondo la dimensione del pattino.

Per evitare la rotazione dei pattini pivottanti attorno all'asse verticale, si adotta un perno antirotazione.

Vista l'alta versatilità dei pattini, si possono realizzare sistema di sostentamento di varie forme. L'uso dei pattini pivottanti è sempre consigliato nelle guide di forma non elementare, per compensare errori geometrici. Quando il pattino è usato come guida, se ne montano sempre due contrapposti per bloccare gli spostamenti laterali. In quest'ultimo caso, la compensazione degli errori geometrici avviene con il contrasto a molla. Esistono, poi ancora, soluzioni ibride dove la funzione portante è affidata ai pattini pneumostatici, mentre il contrasto laterale è affidato a guide volventi. Con l'uso di sistemi magnetici, si può usare una sola guida di contrasto laterale.

2.1.4. Progettazione e realizzazione

Valutate le esigenze dell'utente si possono usare pattini standard reperibili in commercio oppure progettarli da l'inizio; in ogni caso si effettuano i calcoli di progetto della parte pneumostatica e della parte strutturale della guida. Il dimensionamento non contempla il calcolo di durata della vita del pattino, che si presume infinita non essendoci parti in contatto diretto.

Si passa in seguito al disegno costruttivo mediante CAD tridimensionale e alla definizione del ciclo produttivo e del listato CN.

I materiali maggiormente impiegati sono le leghe di alluminio, per via della loro leggerezza, lavorabilità all'utensile e per l'attitudine ai trattamenti d'indurimento superficiale. Possono essere utilizzati anche acciaio temprato, bronzo e ottone.

Particolare attenzione deve essere posta nel processo di finitura. Visto che i sistemi pneumostatici funzionano con meati dell'ordine dei micron, occorre che questi siano mantenuti costanti. Si rende necessario quindi che le tolleranze dimensionali e geometriche dell'accoppiamento sferico e delle superfici di spinta siano molto strette.

L'ultima fase è il collaudo in camera climatizzata per rilevare le prestazioni pneumostatiche, le precisioni geometriche e le precisioni di posizionamento.

2.1.5. Applicazioni

L'applicazione principale dei pattini pneumostatici è in campo metrologico. Si realizzano strumenti di misura tridimensionali, comunemente adottati nell'industria dell'autoveicolo e spaziale, in dove le guide di scorrimento si utilizzano tali pattini. Simili a questi sono le macchine di misura a coordinate, qui

i pattini hanno il difficile compito di garantire la precisione di misura. Nel campo dei sistemi rotanti si impiegano tavole girevoli a sostentamento pneumostatico.

Un campo promettente riguarda l'uso dei pattini in abbinamento ad azionamenti diretti (*direct drive*). Tale abbinamento permette di migliorare le già ottime prestazioni in termini di velocità, accelerazione e precisione di posizionamento, grazie all'eliminazione del contatto diretto. L'uso dei motori lineari trova applicazione nelle macchine e nei robot per elettronica, laboratorio, manipolazione di campioni e comunque in tutte le applicazioni dove sono richiesti movimenti brevi, precisi e molto veloci. Esistono versioni rotanti di tali sistemi in cui è utilizzato il motore coppia ed encoder di precisione per garantire un'elevata risoluzione angolare.

Nell'uso dei truschini di precisione abbiamo la difficoltà a spostare tale strumento per via della notevole massa, l'uso dei pattini pneumostatici ci facilita la movimentazione evitando sforzi per l'operatore.

Esistono poi applicazioni meno comuni, come:

- sistemi di posizionamento a più assi per macchine utensili;
- attrezzature di collaudo per le sospensioni dei treni ad alta velocità;
- apparecchiature per il controllo della durezza Rockwell;
- generatori di vibrazioni per gli studi di risonanza;
- mandrini e turbomandrini per microfresatura e microforatura con velocità fino a 300000 giri / min;
- sistema di bilanciamento a contrappeso senza contatto;
- misuratori di forze e di coppie.

2.2. TEORIA DELL'UGELLO

2.2.1. Ugello semplicemente convergente

L'ugello è un condotto il cui scopo è espandere un fluido dalle condizioni a monte p_1 (pressione), ρ_1 (densità) e c_1 (velocità) fino alla pressione p_u di uscita, come si mostra nella figura 7.

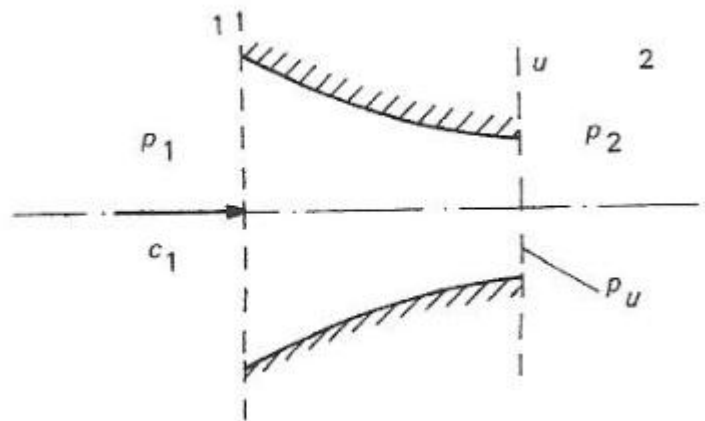


Figura 7: Schema di un ugello semplicemente convergente

Se la pressione di uscita coincide con la pressione a valle p_2 l'ugello si dice *adattato* e la portata vale:

$$\dot{m} = A_u \frac{p^\circ}{\sqrt{p^\circ/\rho^\circ}} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p^\circ} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p^\circ} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2.1)$$

in cui:

- \dot{m} : portata in massa;
- A_u : sezione di uscita;
- p° : pressione in condizioni totali a monte;
- ρ° : densità in condizioni totali a monte;
- p_2 : pressione a valle;
- k : costante dei gas.

Al diminuire di p_2 la portata in massa aumenta secondo l'equazione 2.1 fino a raggiungere, per $p_2 = p_c = p^\circ \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$, il valore massimo in corrispondenza

quando si ha la velocità del suono c_s alla sezione di uscita. Si definisce p_c / p^o *rapporto critico delle pressioni*, che nel caso dell'aria vale 0,528.

Se la pressione p_2 scende al di sotto di p_c la portata rimane costante ed è determinata da:

$$\dot{m} = A_u \frac{p^o}{\sqrt{p^o/\rho^o}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.2)$$

In figura 8 si mostra l'andamento della portata corretta.

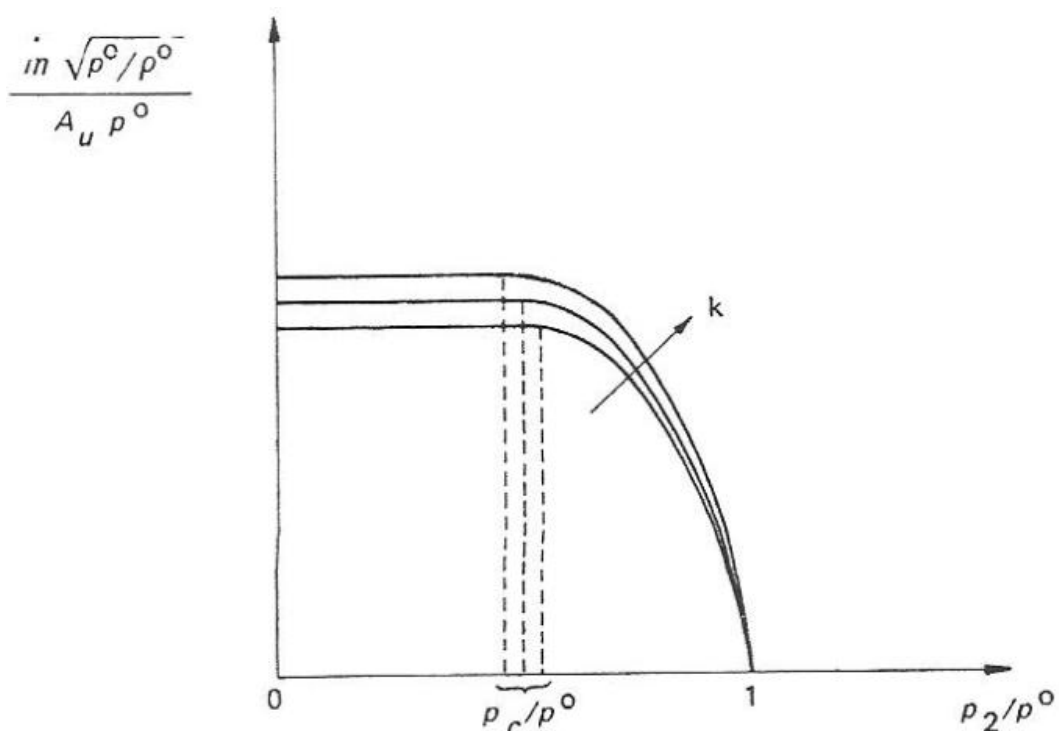


Figura 8: Legge della portata per un ugello semplicemente convergente

2.2.2. Ugello De Laval (convergente-divergente)

In figura 9 si mostra la sezione longitudinale di questo tipo di ugello e i vari andamenti di pressione.

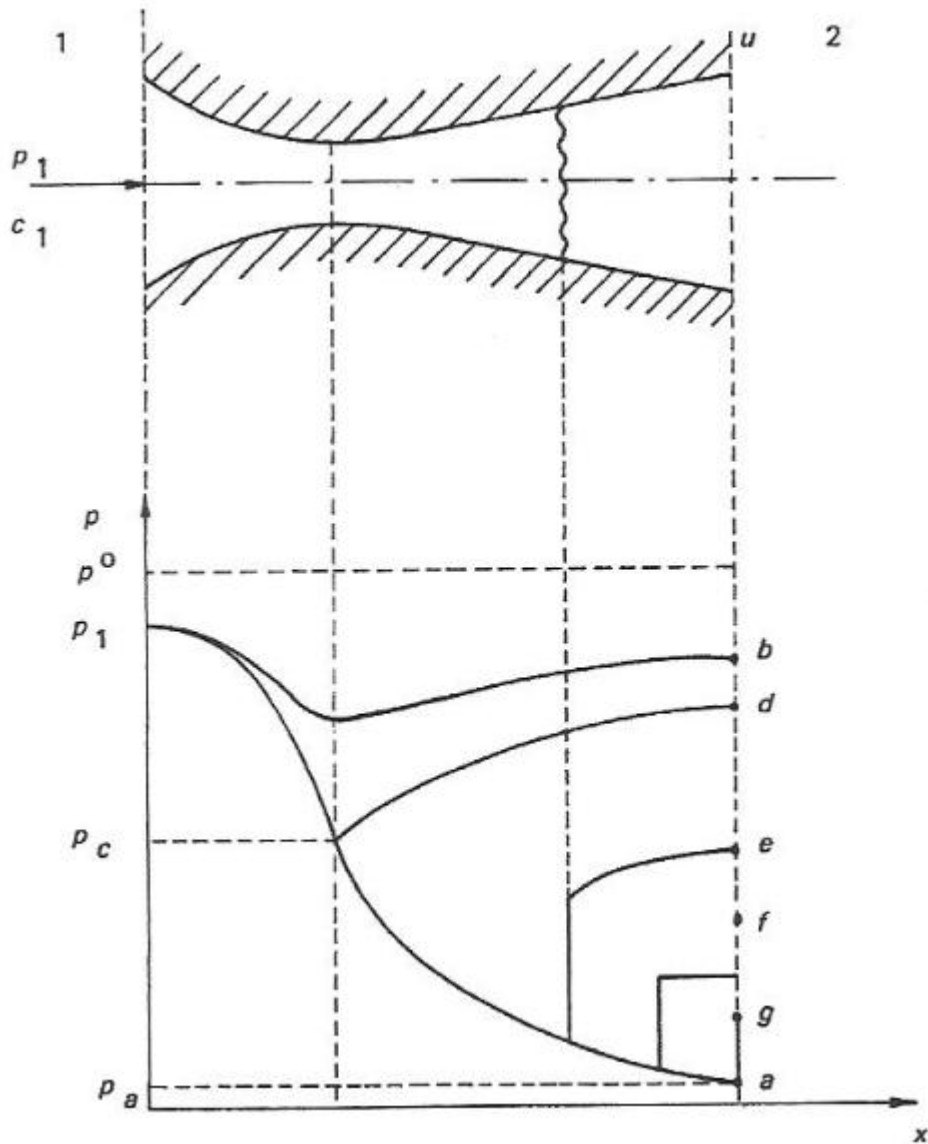


Figura 9: Andamenti di pressione nell'ugello De Laval nelle varie condizioni di funzionamento

In condizioni di progetto il fluido si espande da p_1 a $p_2 = p_a$. Il profilo di pressione ha l'andamento **a** in modo che la velocità del suono si raggiunga all'uscita del condotto. In queste condizioni l'ugello si dice *adattato*.

Quando la pressione p_2 a valle è superiore and un certo valore discriminante p_d , il flusso è ovunque *subsonico*. L'ugello si comporta seguendo l'andamento **b**. La

portata subsonica ha la stessa espressione dell'ugello semplicemente convergente, come si può osservare adesso:

$$\dot{m} = A_u \frac{p^o}{\sqrt{p^o/\rho^o}} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p^o} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p^o} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2.3)$$

Quando $p_2 = p_d$ la pressione nella sezione ristretta raggiunge il valore critico e la velocità il valore sonico; successivamente l'efflusso è subsonico, come si può vedere con la curva **d**.

Per p_2 minore di p_d il flusso è supersonico anche oltre la sezione ristretta, seguito da una discontinuità della pressione (*urto retto o onda d'urto*) in corrispondenza della quale la velocità diventa subsonica, come ci mostra la curva **e**. Diminuendo la pressione ulteriormente, la sezione d'urto si sposta a valle. Alla pressione p_f l'urto retto è in corrispondenza della sezione d'uscita.

Al di sotto di p_f la corrente o vena fluida si stacca dal condotto e causa un urto obliquo dissipativo prima della sezione di sbocco. La pressione p_g corrisponde al distacco della vena fluida alla fine del condotto.

La portata per l'ugello critico e per l'ugello critico adattato, è la seguente:

$$\dot{m} = A_c \frac{p^o}{\sqrt{p^o/\rho^o}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.4)$$

dove A_c è la sezione ristretta.

2.3. FORMULA DELLA PORTATA ISO E COEFFICIENTE DI EFFLUSSO

La norma ISO 6358 definisce il modo di determinare le caratteristiche di efflusso di un componente pneumatico. La formula ISO fornisce un'espressione della portata in massa G del componente, in base a due parametri sperimentali: la *conduttanza* C e il *rapporto critico* b (che non è quello ideale 0,528). La formula utilizzata è:

$$G = CP_1K_T \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2} \quad (2.5)$$

dove P_1 è la pressione assoluta a monte del componente, $K_T = \sqrt{T_0/T_1}$ è un fattore correttivo che tiene conto della temperatura, T_0 è la temperatura, assoluta a monte in condizioni standard, T_1 la temperatura assoluta a monte. Il *rapporto critico delle pressioni* b e il *rapporto delle pressioni* r sono definiti come:

$$b = \frac{P_2^*}{P_1}, \quad r = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.6)$$

dove P_2^* è la pressione a valle in condizioni critiche e P_2 la pressione a valle in condizioni di lavoro.

La conduttanza C si può ricavare dalla formula 2.5 ponendo $r=b$ e misurando la portata massima G_C che passa ad una data pressione di alimentazione P_1 :

$$C = G_C / P_1 K_T \quad (2.7)$$

Il rapporto critico b può essere determinato mediante una misura di portata $G' < G_C$ ad una data pressione di valle P_2 e ponendoli nell'espressione:

$$b = 1 - \frac{\Delta P}{P_1 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{G'}{G_C}\right)^2} \right]} \quad (2.8)$$

dove $\Delta P = P_1 - P_2$ è la differenza di pressione che produce la portata G' .

Come secondo passo la formula ISO può essere adattata per il calcolo della portata teorica attraverso i fori di alimentazione del pattino, assumendo che la temperatura di prova sia 20°C (e di conseguenza $K_T = 1$) e $C = 0,686 C_d S / \sqrt{RT_0}$

$$G_{th} = CP_1 K_T \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2} \quad (2.9)$$

donde $R = 287,6 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$ è la costante dei gas e S è la *sezione circolare di passaggio*. Il *coefficiente di efflusso* C_d è definito come il rapporto fra la portata reale G e quella teorica G_{th} , quindi $C_d = G / G_{th}$; rappresenta quindi un parametro per quantificare le perdite del componente. Il rapporto critico b è in questo caso quello teorico, pari a 0,528; ottenendo in questo modo una formula monoparametrica.

2.4. STATO DELL'ARTE

2.4.1. Giulio Lanza, Studio dell'efflusso di aria compressa attraverso ugelli per pattini pneumostatici piani

Giulio Lanza nella sua tesi ha affrontato lo studio dei pattini pneumostatici finalizzato alla determinazione del coefficiente di efflusso.

È stato installato un banco prova per pattini pneumostatici fornito dalla Ditta Mager, che poi il tesista ha dotato con:

- un trasduttore di pressione, per la misura della pressione nel meato;
- un flussimetro, per misurare la portata dell'aria di alimentazione;
- un circuito di alimentazione, per fornire l'aria al pattino;
- tre comparatori meccanici, per fornire la lettura del meato;
- una cella di carico, per misurare la forza applicata;
- un trasduttore lineare di posizione, per misurare lo spostamento radiale del trasduttore di pressione.

È stata provata poi una serie di pattini pneumostatici piani a foro centrale con e senza tasca, di cui si sono ricavate le caratteristiche di portanza e consumo. Di questa procedura si è rilevata ed analizzata successivamente la distribuzione di pressione, con un particolare studio dei fenomeni dinamici in prossimità del foro di alimentazione.

Nell'ultima parte si sono elaborati i dati sperimentali per determinare l'ugello equivalente del pattino e calcolare il coefficiente di efflusso.

Dalle sue conclusioni si può comprendere come il pattino sia costituito da tre resistenze: la resistenza dell'ugello, la resistenza dell'imbocco del meato, la resistenza del meato. È stata discussa l'influenza della presenza / assenza della tasca sull'andamento del profilo di pressione.

2.4.2. Massimo Filippa, Studio teorico e sperimentale di supporti ad aria

Massimo Filippa nella sua tesi si è occupato dello studio di pattini pneumostatici finalizzato ad elaborare un modello numerico a parametri concentrati per simulare l'andamento delle pressioni. I pattini utilizzati hanno tre fori con e senza microragnatura.

I pattini senza microragnatura sono stati provati per studiare l'andamento radiale e circonferenziale delle pressioni e valutarne la simmetria rispetto all'asse del foro, per equiparare il comportamento ad un pattino a singolo foro. Si è elaborato un modello numerico iterativo per calcolare la portanza del cuscinetto mediante MATLAB suddividendo la superficie del pattino in 2 aree. Sulla base delle stesse considerazioni si sono creati anche un modello analitico non iterativo e modello a 21 aree per perfezionare i risultati.

Sono stati provati anche i pattini con microragnatura, seguendo lo stesso procedimento precedentemente visti. Per questi ultimi pattini si è sviluppato solo il modello a 2 areole, perchè a 21 diventa molto complesso. Considerando l'effetto della ragnatura, si è assunto per semplicità che la pressione al suo interno vari solo nella direzione della ragnatura.

Sulla base del modello a 2 areole si è anche sviluppato un modello per prevedere il comportamento dinamico di un pattino, che riesce a prevedere bene la stabilità o instabilità del pattino.

2.4.3. Fabrizio Zanovello, Studio di cuscinetti reggispinta assiale a gas

Lo studio di Fabrizio Zanovello è finalizzato alla misura delle distribuzioni di pressione radiali e circonferenziali dei pattini pneumostatici, delle caratteristiche di rigidità e di portata. Si è svolto successivamente uno studio su un rotore verticale a sostentamento pneumostatico, misurando la rigidità statica del cuscinetto reggispinta assiale con spinta dal basso e dall'alto.

In seguito è stato utilizzato un software, già preparato presso il dipartimento di meccanica, per simulare le prestazioni dei pattini, in particolare la distribuzione di pressione e il comportamento all'apertura dell'aria. Il software è stato poi usato per stimare gli stessi comportamenti nel rotore.

Sono poi stati sostituiti i tre comparatori meccanici con tre sensori induttivi di cui si è fatta la taratura ed il confronto con misuratori precedenti.

2.4.4. H. Mori, Y. Miyamatsu, Theoretical flow-models for externally pressurized gas bearings

Per poter conoscere la capacità di carico, la rigidità e la caratteristica del flusso occorre studiare la distribuzione di pressione nella zona al di sotto del pattino, usando modelli adatti a caratterizzare il flusso di aria.

Il modello di flusso è composto da un flusso turbolento nella zona di ingresso, da un'onda d'urto con crescita di pressione e da un flusso laminare nella zona di uscita. In secondo momento si è aggiunto un quarto flusso con crescita degli strati limite, fra l'onda d'urto e il flusso laminare. Assumendo un flusso unicamente laminare, si sono comunque ottenute soluzioni coerenti con i risultati sperimentali.

Flussi e salti di pressione fondamentali

Verranno qui di seguito descritti i flussi e i cambiamenti di pressione elementari, che poi assemblati si usano per i modelli di flusso.

- *Flusso turbolento (Flusso inerziale)*

Si assume che il profilo di velocità sia uniforme e che il flusso sia isentropico. La distribuzione di pressione può essere descritta dall'equazione seguente:

$$\left(\frac{r_i}{r}\right)^2 = \frac{2}{(k-1)M_i^2} \left[\left(1 + \frac{k-1}{2}M_i^2\right) \left(\frac{p}{p_i}\right)^{2/k} - \left(\frac{p}{p_i}\right)^{(k+1)/k} \right] \quad (2.10)$$

dove:

- ..._i: condizioni iniziali
- ..._j: condizioni finali
- ...*: condizioni critiche
- M_i : numero di Mach
- r_i : raggio iniziale
- r_j : raggio finale
- r : raggio generico
- p_i : pressione iniziale

p_j : pressione finale
 p : pressione generica
 k : costante dei gas
 m_j : velocità normalizzata rispetto alla velocità del suono in condizioni critiche
 u_j : velocità nel punto finale
 ρ_j : densità nel punto finale

Nella figura 10 si può vedere l'andamento delle pressioni nel caso subsonico e supersonico.

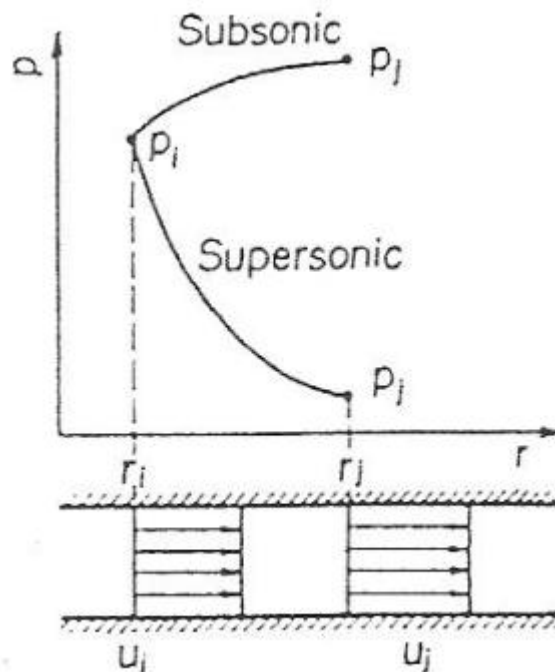


Figura 10: Flusso turbolento all'interno del meato

- **Flusso con crescita degli strati limite**

Si usa quando la viscosità del fluido non può essere trascurata e quindi la velocità non ha più profilo costante. Gli strati limite crescono e il flusso passa da turbolento a laminare. Quando i due strati limite occupano l'intero meato il flusso è completamente laminare. Nella figura 11 è indicato il tipico andamento delle pressioni durante la transizione.

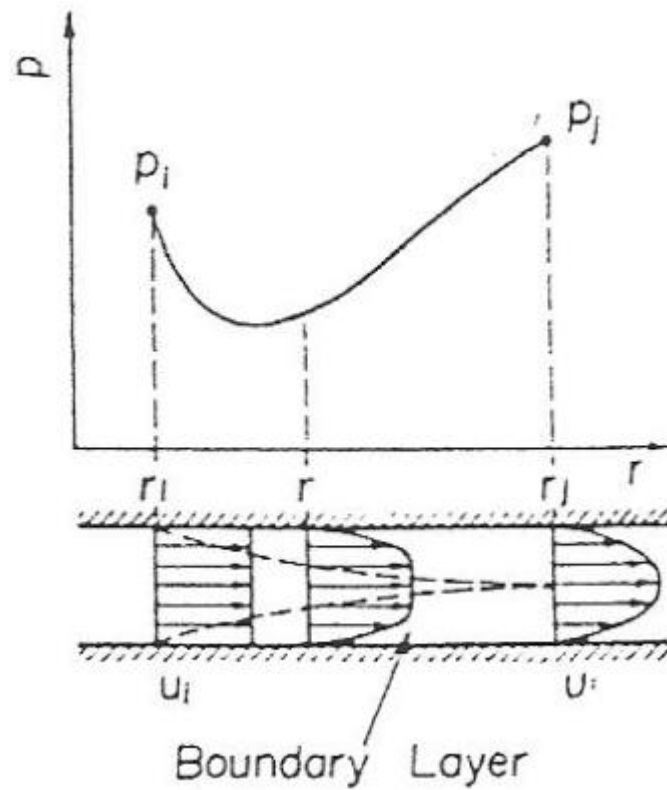


Figura 11: Flusso con crescita degli strati limite all'interno del meato

- **Flusso laminare (Flusso viscoso)**

Si ha quando gli strati limite hanno occupato l'intero meato. È il flusso che si presenta per ultimo, si usa facilmente per le analisi in condizione di basso meato. Assumendo che la trasformazione sia isoterma, le equazioni diventano semplici:

$$\frac{p}{p_i} = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{p_j}{p_i} \right)^2 \right] \frac{\ln(r/r_i)}{\ln(r_j/r_i)} \right\}^{1/2} \quad (2.11)$$

In figura 12 è mostrato l'andamento delle pressioni e del profilo di velocità.

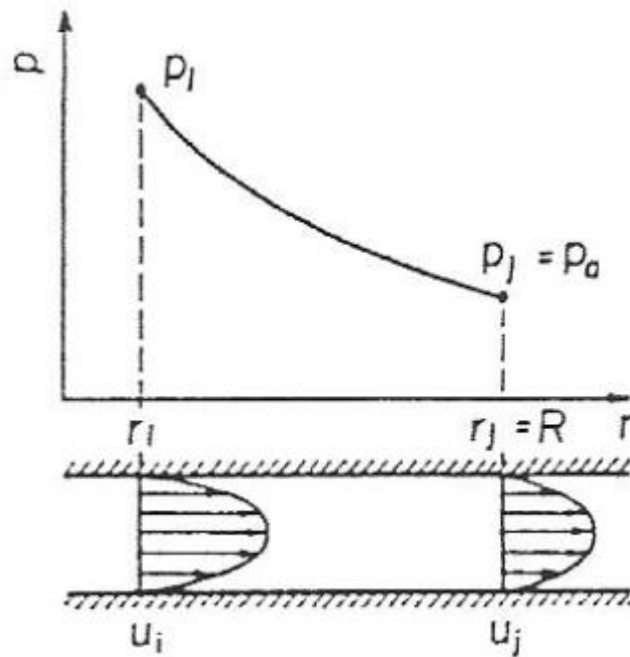


Figura 12: Flusso laminare all'interno del meato

- *Caduta di pressione per aumento della velocità da un punto di ristagno*

Il gas ha pressione iniziale $p_i = p_a$ (pressione di alimentazione) e velocità $u = 0$, è poi accelerato alla velocità u_j costante e la pressione scende a p_j , come è mostrato in figura 13.

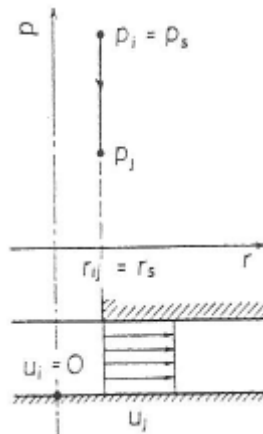


Figura 13: Salto di pressione per aumento della velocità da un punto di ristagno

Assumendo che il flusso sia incompressibile, la caduta di pressione è regolata dal teorema di Bernoulli:

$$p_i - p_j = \frac{1}{2} \rho_j u_j^2 \quad (2.12)$$

e considerando una trasformazione adiabatica:

$$\frac{p_j}{p_i} = 1 - \frac{k}{k+1} m_j^2 \quad (2.13)$$

Se il flusso è da considerarsi compressibile e con trasformazione politropica:

$$\frac{p_j}{p_i} = \left(1 - \frac{k}{k+1} m_j^2 \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (2.14)$$

- ***Caduta di pressione in condizione critiche***

Quando le condizioni critiche si verificano nella sezione più stretta, la pressione scende fino al valore critico:

$$p_j = p_i^* = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{1+k}} p_i \quad (2.15)$$

La velocità critica vale:

$$u_j = a_i^* = \sqrt{k p_i^* / \rho_i^*} \quad (2.16)$$

- ***Caduta di pressione per riduzione della sezione di flusso***

Quando è presente una tasca, l'ingresso dell'aria nel meato provoca una accelerazione del flusso e quindi una caduta di pressione che vale:

$$p_i - p_j = \frac{1}{2} \rho_i (u_j^2 - u_i^2) \quad (2.17)$$

assumendo un flusso incompressibile. L'andamento è mostrato in figura 14.

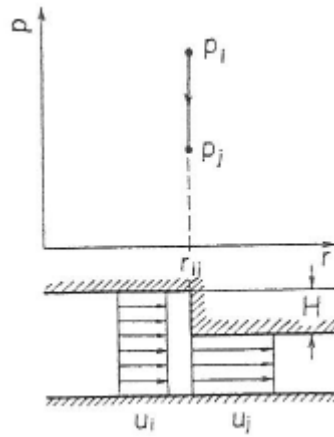


Figura 14: Salto di pressione per riduzione della sezione di flusso

- *Caduta di pressione per aumento della quantità di moto*

Il flusso inerziale, a causa dell'ingresso nel meato o a causa dell'onda d'urto, si trasforma in un flusso viscoso. Se il meato è così piccolo che la distanza in cui si ha la crescita degli strati limite diventa trascurabile, il flusso si riduce ad una semplice caduta di pressione dovuta all'aumento della quantità di moto. La caduta di pressione vale:

$$p_i - p_j = \frac{1}{5} \rho_i u_i^2 \quad (2.18)$$

come si mostra in figura 15.

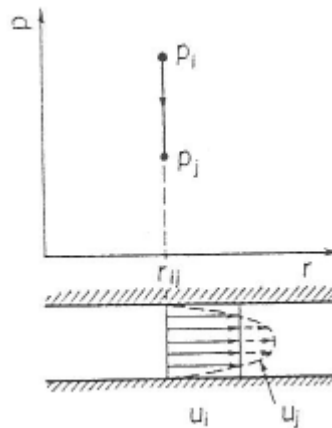


Figura 15: Salto di pressione per aumento della quantità di moto

- *Aumento di pressione attraverso un'onda d'urto*

Quando si manifesta un'onda d'urto, la velocità passa da supersonica a subsonica e la pressione presenta un salto, come è mostrato in figura 16.

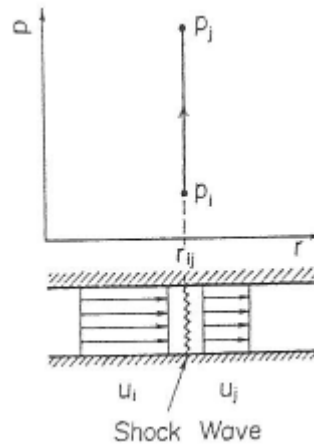


Figura 16: Salto di pressione attraverso un'onda d'urto

Modelli di flusso per pattini con foro semplice

Esaminati i modelli elementari di flusso e di salto di pressione, si combinano in base alla geometria del pattino e al meato per ottenere dei modelli più complessi. Per avere una corretta connessione dei modelli si impone la continuità degli andamenti, cioè le condizioni finali di un modello si assumono come le iniziali del successivo.

I profili di pressione ottenibili sono (vedi figura 17):

- A: profilo per un flusso completamente laminare (meati bassi);
- B: profilo per un flusso con crescita degli strati limite (meati intermedi);
- C: profilo per un flusso supersonico con onda d'urto subsonica (meati alti).

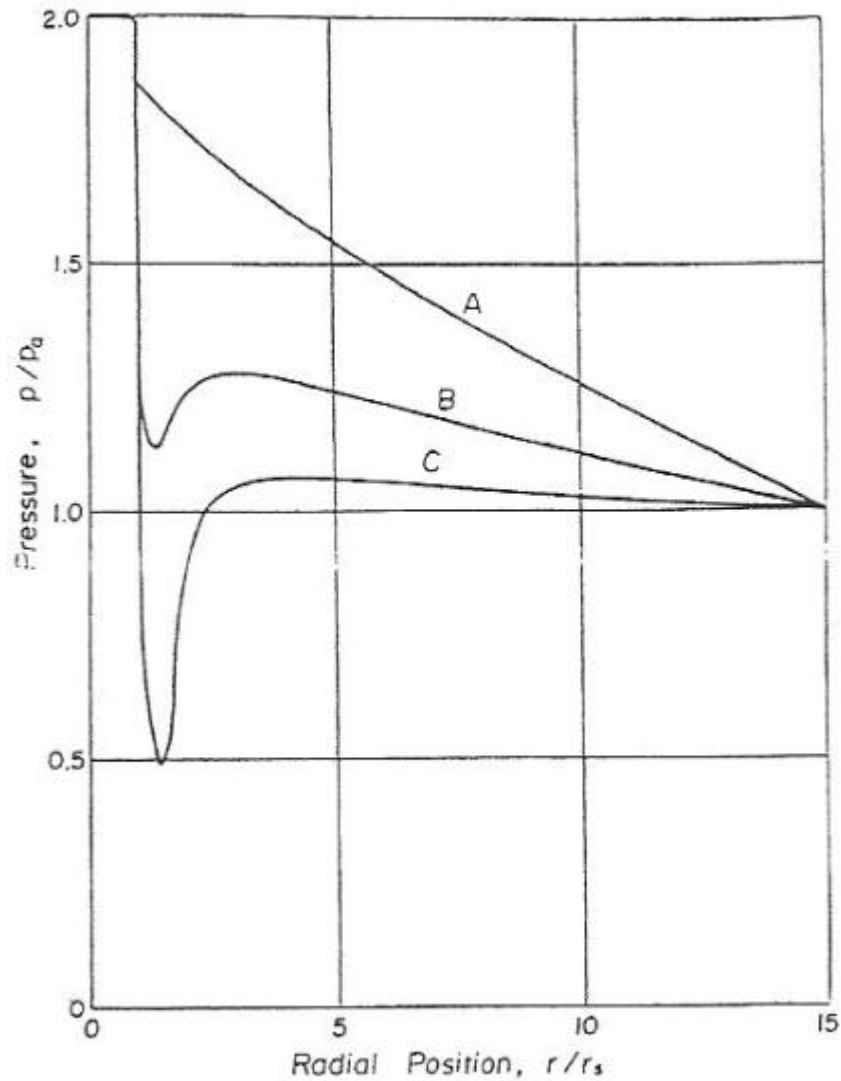


Figura 17: Profili di pressione principali

Verranno di seguito elencati i modelli di flusso specifici, risultanti dalla combinazione dei modelli elementari:

- **Modello A:**

Corrisponde al profilo di pressione A di figura 17. È composto da una caduta di pressione per accelerazione del fluido e da un flusso laminare all'interno del meato. L'andamento è mostrato nella figura 18.

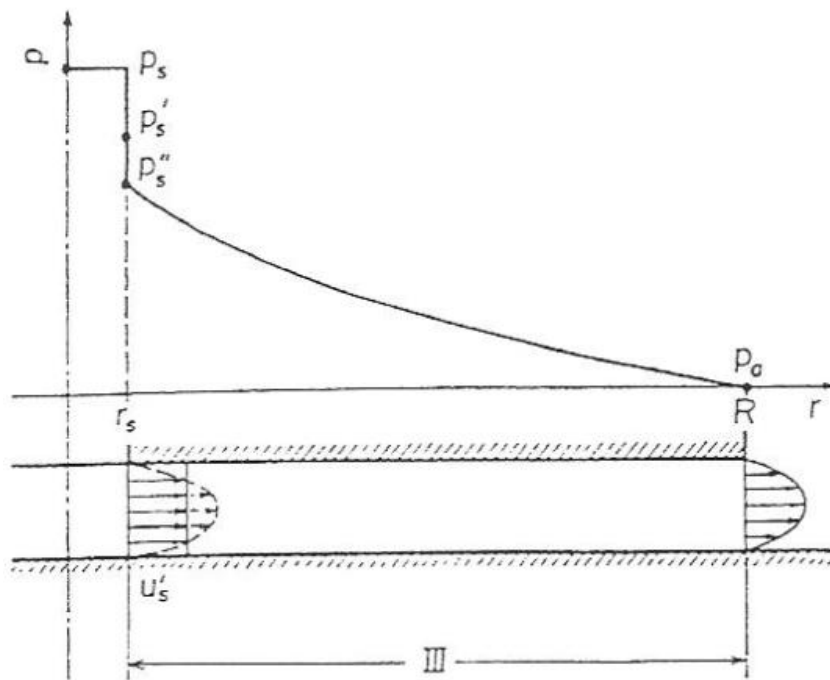


Figura 18: Modello A di flusso per pattini autocompensati

- **Modello B:**

Corrisponde al profilo di pressione B. Il fluido ha una caduta di pressione dovuta all'accelerazione del flusso, una crescita degli strati limite e un flusso laminare successivo. Vedi figura 19.

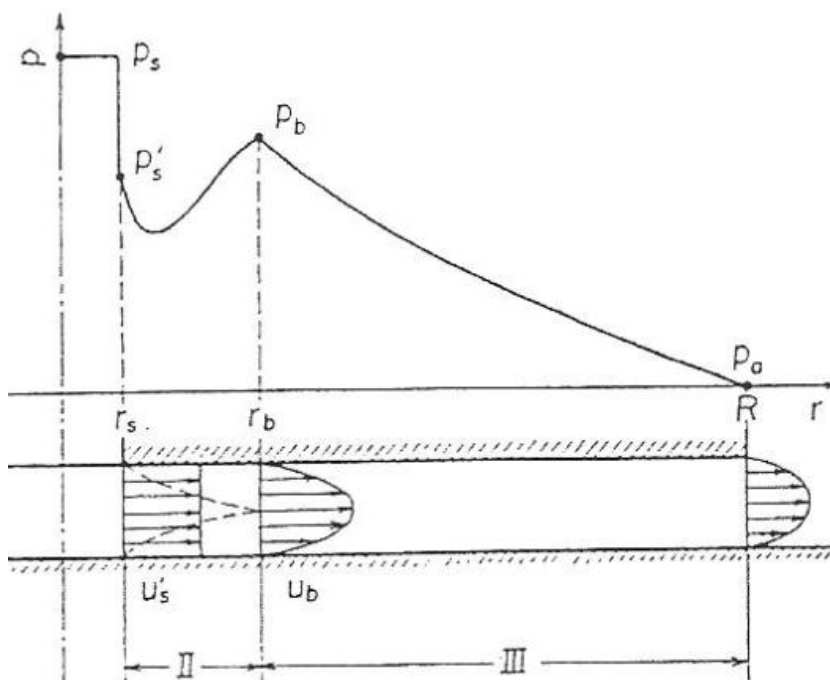


Figura 19: Modello B di flusso per pattini autocompensati

- **Modello C:**

Describe el profilo di pressione C. All'ingresso del meato la pressione scende fino al livello critico, cioè con flusso turbolento; si ha poi l'onda d'urto. A questo punto ci sono due possibilità: il flusso procede con semplice caduta di pressione per aumento della velocità (modello C1, figura 20) o con crescita degli strati limite (modello C2, figura 21), prosegue poi con un flusso laminare.

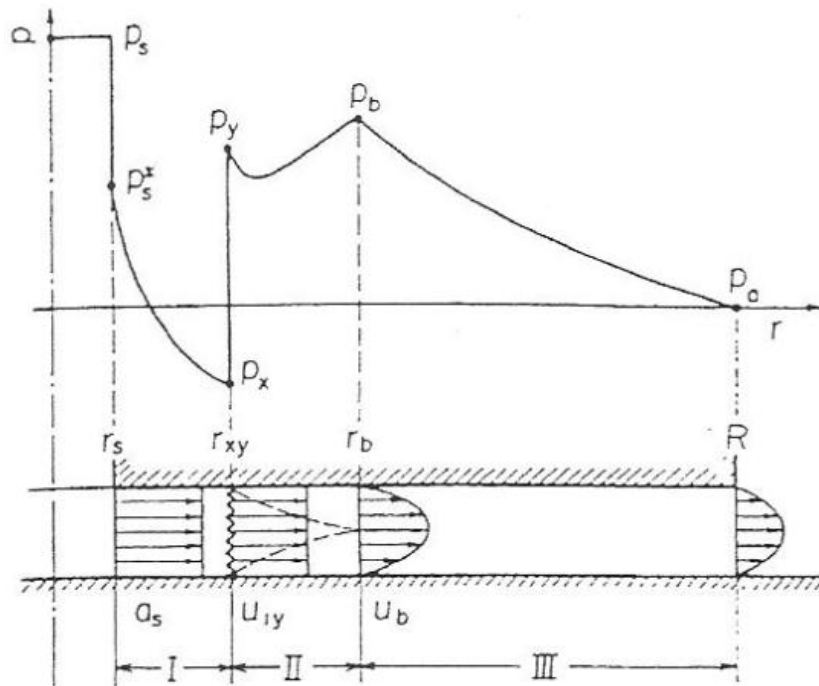


Figura 20: Modello C1 di flusso per pattini autocompensati

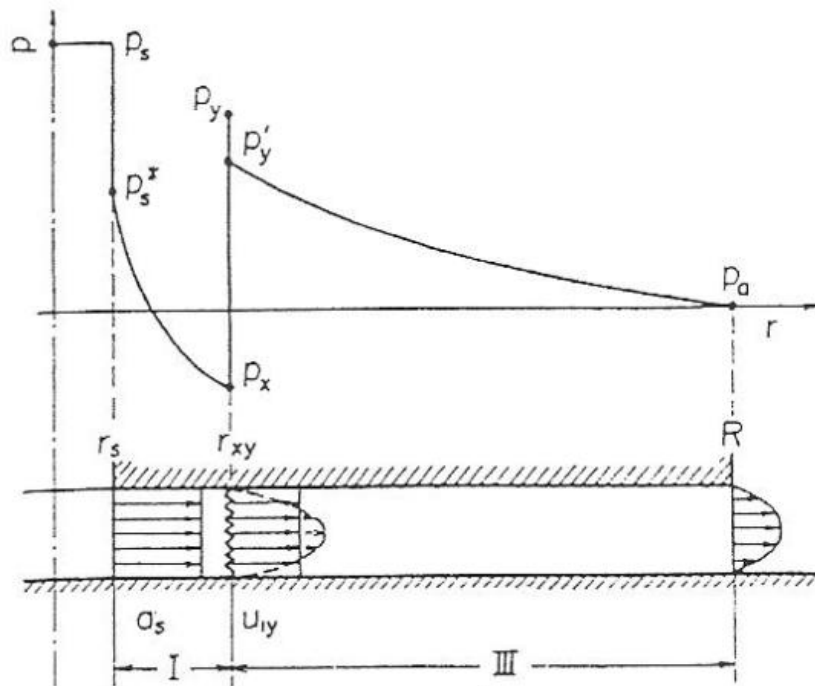


Figura 21: Modello C2 di flusso per pattini autocompensati

Modelli di flusso per pattini compensati con tasca

La compensazione delle oscillazioni si ottiene introducendo una resistenza nel foro di alimentazione. Anche per questi pattini esistono dei modelli di flusso.

- **Modello D:**

Sono due cadute di pressione per aumento della velocità prima e dopo la resistenza, c'è poi un'ulteriore caduta per aumento della quantità di moto e poi un flusso viscoso. Andamento è mostrato in figura 22.

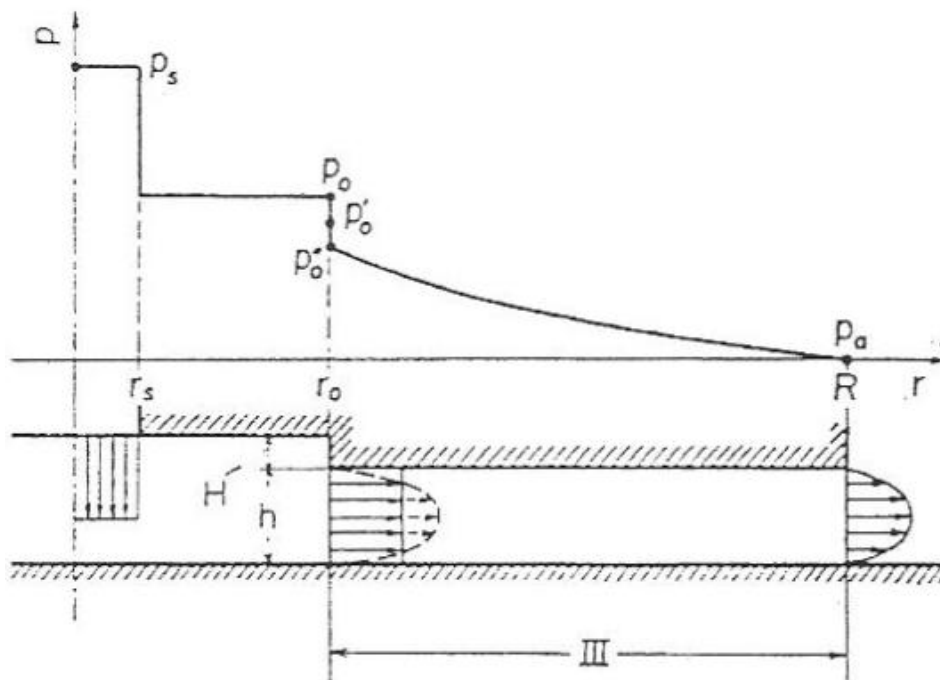


Figura 22: Modello D di flusso per pattini autocompensati

- **Modello E:**

È una caduta di pressione per aumento della velocità e poi un flusso laminare. Il grafico del flusso si presenta come il modello D nella figura 22 senza la seconda caduta di pressione.

- **Modello F:**

Nel caso di meati ridotti si possono verificare condizioni critiche al bordo della resistenza. Il modello è illustrato nella figura 23 ed è costituito da una caduta di pressione per raggiungimento delle condizioni critiche e da un successivo flusso puramente laminare.

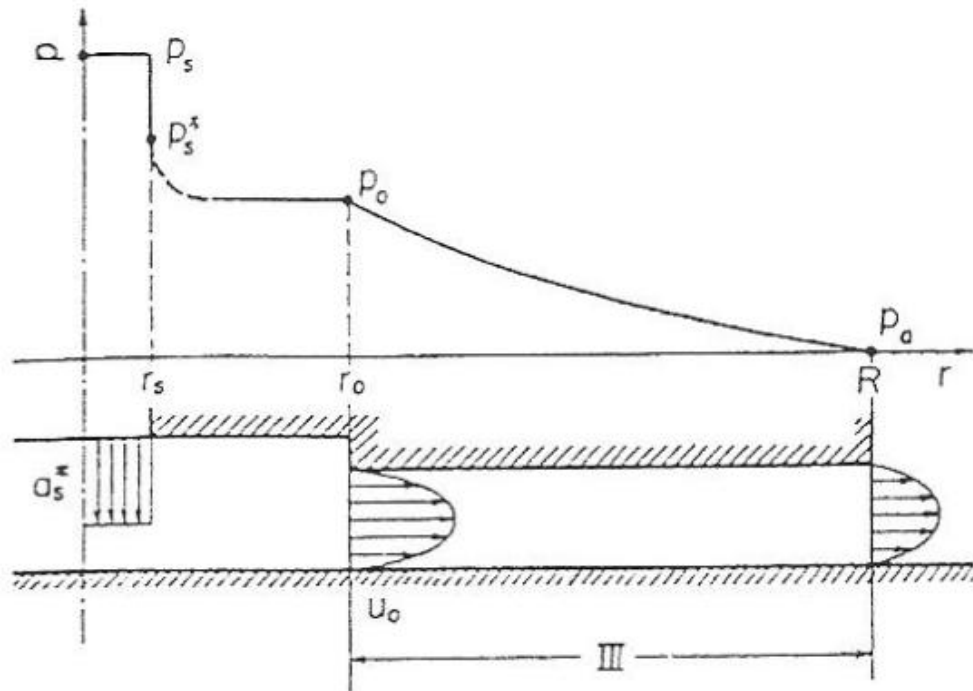


Figura 23: Modello F di flusso per pattini autocompensati

- **Modello G:**

Si usa nei casi di grande meato e grande diametro delle tasche. È un modello complesso costituito da: una caduta di pressione per raggiungimento delle condizioni critiche, un flusso turbolento, un salto di pressione per onda d'urto, un ulteriore flusso turbolento, un aumento di velocità all'ingresso del meato per riduzione del flusso e aumento della quantità di moto ed infine un flusso puramente laminare. L'andamento è mostrato in figura 24.

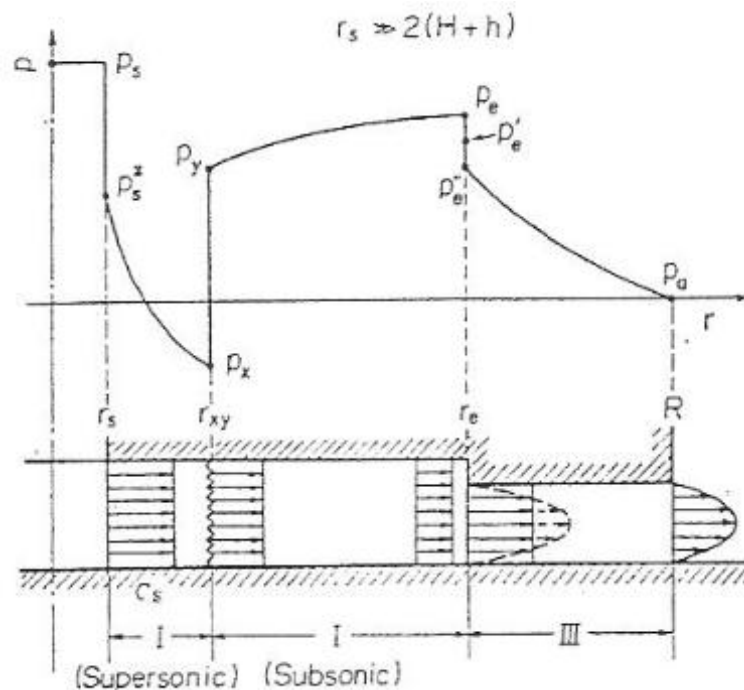


Figura 24: Modelli di flusso per pattini autocompensati: Modello G

Confronto con i dati sperimentali e conclusioni

È ovvio che la distribuzione di pressione cambia con l'aumentare del meato. I modelli C non riescono a spiegare perché la pressione abbia un minimo arrotondato, invece di avere il tipico salto di pressione dell'onda d'urto. Il modello B è ben adattato per elevate pressioni di alimentazione e grande diametro dei fori, dimostra minore coerenza con i risultati quando diminuiscono le pressioni. I modelli D, E ed F sono leggermente diversi dai risultati, ma giustificano pienamente i dati sperimentali. Per grandi tasche i modelli D e G sono adatti rispettivamente per piccoli e grandi meati.

Si capisce dai confronti che la rigidezza ottenuta nei pattini compensati da resistenza è maggiore che nei pattini autocompensati.

La curva di portata ha un comportamento parabolico per bassi meati, per poi diventare lineare in condizioni critiche.

Con questi modelli di flusso, si descrivono i fenomeni dell'autocompensazione e della compensazione con resistenze, della crescita degli strati limite e dell'onda d'urto. L'adeguato uso dei modelli di flusso è efficace per spiegare il cambiamento dei profili di pressione in base alle resistenze, alle tasche, al meato o alla pressione di alimentazione.

2.4.5. B.C. Majumdar, Externally pressurized gas bearings: a review

In è stata fatta una rassegna dei vari tipi di pattini pneumostatici presenti in commercio; si sono poi analizzate le prove statiche e dinamiche effettuate in varie pubblicazioni; si sono infine esaminati alcuni aspetti secondari.

I pattini ad aria possono essere distinti in pneumostatici e pneumodinamici. L'alimentazione esterna può ridurre l'attrito alla partenza e all'arresto di un albero, garantendo il sostentamento anche in assenza di rotazione, in quanto in alcune applicazioni occorre tale caratteristica. Non si possono quindi usare i pattini pneumodinamici e sono necessari quelli pneumostatici.

Un componente importante del pattino è la resistenza. Se non ci fosse, il pattino non avrebbe la possibilità di variare il meato; al variare del carico e quindi il funzionamento non sarebbe corretto.

Comportamento in condizioni statiche

Le procedure di progettazione dei pattini pneumostatici e idrostatici sono molto simili, ma nel pattino ad aria occorre tenere conto della compressibilità dell'aria. Se si tenta di aumentare la rigidità dei pattini, incorrono problemi di stabilità. Si stabiliscono prima i parametri di forza, rigidità e portata richiesti, poi si verifica la stabilità.

Sono stati elaborati modelli semplificati per calcolare la capacità di carico usando la teoria del flusso assiale. I risultati sperimentali si differano molto perché sono stati trascurati gli effetti del flusso circonferenziale. È stato poi elaborato un metodo per compensare tale scostamento.

Nel caso di boccole pneumostatiche, sono stati studiati cuscinetti ad una e due file di fori di alimentazione con direzione assiale. È stata trovata una soluzione in forma chiusa per la capacità di carico, adottando al posto dei fori di alimentazione, una sorgente lineare di pressione. È stato sviluppato un metodo per la soluzione dell'equazione di Reynolds per una boccola completa. La capacità di carico misurata sperimentalmente è la metà di quella calcolata con la teoria del flusso assiale; occorre tenere conto anche del flusso circonferenziale.

Sono stati sviluppati nuovi metodi di progettazione mediante l'adozione di un pattino equivalente. La boccola pneumostatica si trasforma in un pattino di forma rettangolare, per analizzare il carico, la portata e la rigidità. L'uso della linea di alimentazione al posto dei fori, porta a migliori risultati.

Analisi sperimentali e teoriche sono state rivolte alla determinazione delle caratteristiche delle boccole a velocità nulla. Gli studi hanno riguardato la capacità di carico e l'eccentricità.

Comportamento in condizioni dinamiche

Sono stati analizzati i problemi di instabilità autoeccitata delle boccole ed instabilità pneumatica dei pattini piani. Nelle boccole è stato trovato che la precessione autoeccitata avviene ad una velocità di rotazione doppia di quella calcolata. Per i pattini, l'instabilità pneumatica è stata studiata in funzione della profondità della tasca.

È stato proposto un nuovo tipo di pattino in cui il flusso d'aria è veicolato attraverso scanalature ricavate sulla superficie per ridurre il rischio di instabilità.

Conclusioni

Si intuisce che le caratteristiche statiche possono essere previste con ragionevole precisione. Nel caso delle boccole pneumostatiche la teoria del flusso assiale sovrastima sempre la capacità di carico. Non sempre è possibile sostituire la fila di fori di alimentazione con una linea equivalente. In tabella 1 sono mostrati i vantaggi e gli svantaggi dei vari metodi di calcolo.

Metodo	Vantaggi	Svantaggi
Numero discreto di fori di alimentazione	Nessuna supposizione preliminare	Stabilità e convergenza della soluzione difficili da raggiungere
Linea di alimentazione	Piuttosto semplice	Non adatto per elevate eccentricità e pochi fori di alimentazione
Teoria del flusso assiale	Il più semplice	Nessuna giustificazione preliminare

Tabella 1: Vantaggi e svantaggi dei vari metodi di calcolo

2.4.6. D.A. Boffey, P. M. Wilson, An experimental investigation of the pressures at the edge of a gas bearing pocket

In questo articolo è stata effettuata un'indagine sui profili di pressione fra il meato e la tasca. I pattini in prova sono stati fatti oscillare per simulare l'instabilità. Come risultato si è ottenuto che le perturbazioni di pressione sono maggiori nella tasca che nel meato.

La previsione precisa della stabilità dipende dalle pressioni locali in prossimità della tasca. Lavori precedenti dimostrano che la teoria sottostima le perturbazioni di pressione presenti nella tasca durante l'instabilità pneumatica; fenomeno chiamato "martello pneumatico". Lo scopo di questo lavoro era di migliorare la comprensione dei fenomeni dinamici nella zona della tasca, attraverso prove sperimentali.

I pattini analizzati sono tutti circolari del tipo a singolo foro centrale, con resistenza e tasca. Dapprima è stata effettuata una caratterizzazione statica del pattino rilevando la pressione in funzione del raggio mantenendo costanti la pressione di alimentazione, il meato e la profondità della tasca. Sono stati poi effettuati test dinamici a 60 e 100 Hz. La vibrazione è imposta da un sistema di risonanza, la cui frequenza può essere variata cambiando la massa montata su di esso, come si può osservare in figura 25.

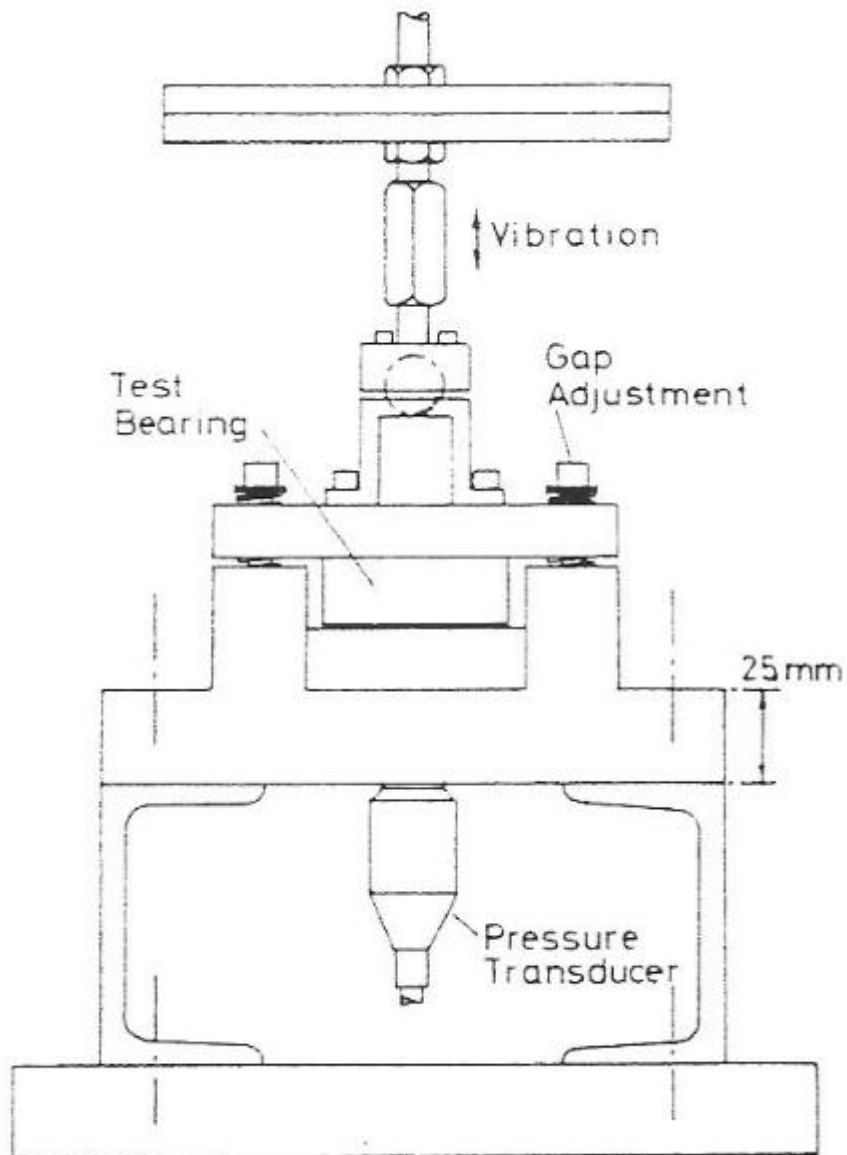


Figura 25: Banco prova

Il trasduttore di pressione misura la variazione di pressione nel meato; è stato aggiunto un filtro per registrare solo la componente dinamica della pressione. La teoria sovrastima la pressione misurata staticamente, in coerenza con quanto visto per la forza.

La teoria semplificata non tiene conto delle variazioni di pressione sul bordo della tasca. Un miglior studio dell'onda d'urto è la chiave per affinare il modello di stabilità.

2.4.7. F. Al-Bender, H. Van Brussel, Symmetric radial laminar channel flow with particular reference to aerostatic bearings

Dopo aver analizzato la teoria per determinare la distribuzione di pressione in un flusso radiale fra due dischi paralleli, si applica il *metodo della separazione delle variabili* (specificato in: Al-Bender, Van Brussel, A method of "separation of variables" for the solution of laminar boundary-layer equations of narrow channel flows, Journal of Tribology, July 1992, pp. 623-629) a tale problema, specialmente per il caso di pattini con foro di alimentazione centrale. Sono stati confrontati i risultati teorici con i dati sperimentali e si è trovata una buona coerenza, notando che il flusso laminare è sufficiente a caratterizzare il comportamento.

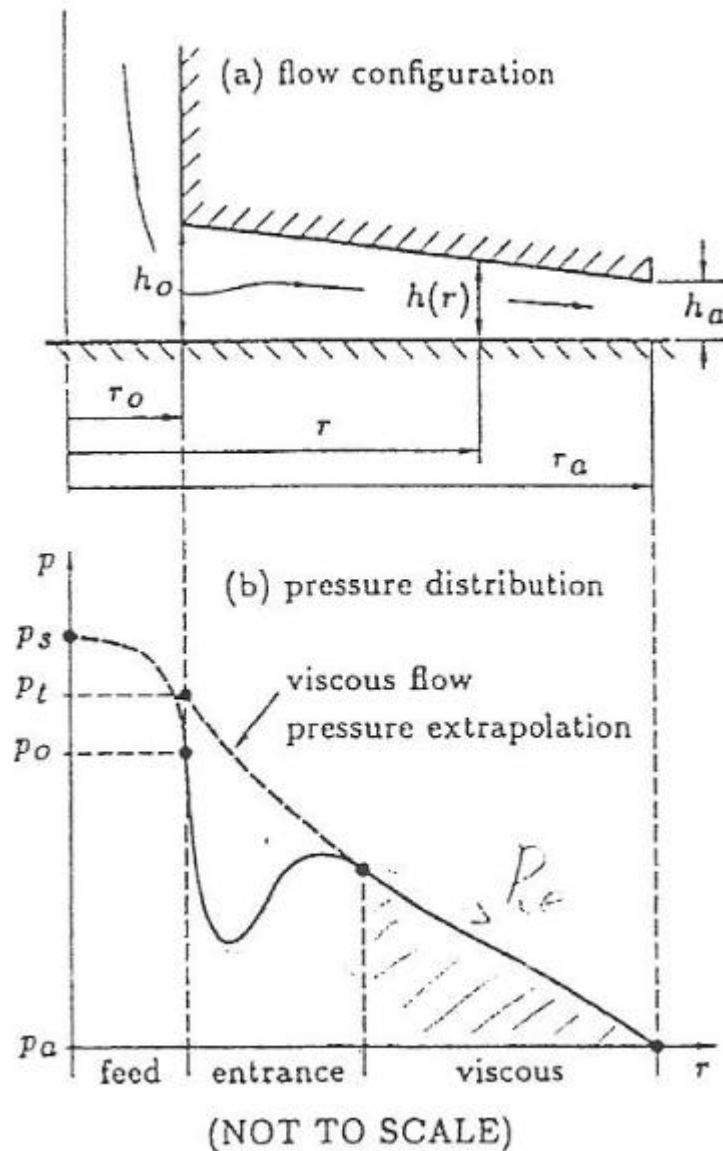


Figura 26: Forma del meato e andamento delle pressioni

La geometria usata è quella a *meato convergente* che presenta migliori caratteristiche rispetto alla geometria tradizionale. In figura 26 si mostra l'andamento delle pressioni, si possono distinguere tre zone:

- La zona del foro in cui il flusso accelera per raggiungere il meato;
- La zona di ingresso, in cui il flusso è misto turbolento-laminare;
- Il meato, in cui è presente un flusso laminare.

Per calcolare la capacità di carico è sufficiente supporre un flusso laminare sotto tutto il pattino, commettendo un piccolo errore; è però necessario conoscere molto bene la pressione a monte del flusso laminare per poter risolvere le equazioni.

In questo articolo si è dimostrata la validità del modello di flusso laminare per descrivere un'ampia gamma di problemi, la cui soluzione è effettuata mediante il metodo di separazione delle variabili. Si è capito che è superiore agli altri metodi, sia in termini di precisione che efficienza ed è l'unico che possa portare ad una soluzione dell'intero problema del flusso. Infine, si è capito che può essere facilmente valutato il flusso laminare radiale in un pattino con ugello incorporato.

2.4.8. Sadek Z. Kassab, Elsayed M. Noureldeen, Medhat A. Shawky, Effects of operating conditions and supply hole diameter on the performance of a rectangular aerostatic bearing

Il presente articolo è uno studio sperimentale sui pattini pneumostatici di forma rettangolare. Esso comprende la misura della pressione, della capacità di carico e della portata d'aria. Le prove hanno ricoperto un ampio range di meati e di pressioni di alimentazione. Sono stati studiati pattini con fori di alimentazione di diverso diametro. Aumentare il rapporto diametro dei fori su lunghezza del pattino ha l'effetto di aumentare la pressione nel meato, la capacità di carico, ma nel contemporaneamente aumentare il consumo di aria.

Per misurare la distribuzione di pressione, la capacità di carico e la portata, è stato progettato e costruito un banco prova. Per misurare la pressione nel pattino sono stati montati dei tubi piezometrici nei fori del contropattino. Per misurare la pressione di alimentazione si è usato un manometro di Bourdon. Lo spessore del meato è stato misurato mediante 3 comparatori con divisioni di 1 μm . Un anello calibrato di acciaio per molle è usato per misurare la forza applicata. La misura della portata è effettuata mediante un flussimetro.

Le prove sono state eseguite prima a pressione di alimentazione costante e variando il meato (10, 20, 30, 40 e 50 μm), poi è stata ripetuta la procedura variando la pressione di alimentazione (1,5 – 2 – 2,5 – 3 bar assoluti). Dopo si sostituisce il pattino con un altro e si ripete l'intera procedura. Sono stati provati pattini con rapporto larghezza/lunghezza di 2/3 e 5/6 con diverse dimensioni di fori. I confronti sono effettuati variando un parametro e mantenendo costanti tutti gli altri.

Caratteristica di pressione

La caratteristica di pressione è tracciata in forma adimensionata in funzione della distanza adimensionale dal centro al bordo, in modo da poter sovrapporre caratteristiche di pattini di dimensioni diverse e con pressioni di alimentazione diverse.

Per un certo meato, la pressione al centro del pattino ha una caduta rispetto al valore di alimentazione per via della resistenza. La pressione poi ha una discesa, un aumento e una definitiva discesa fino al valore ambiente.

All'aumento del meato la pressione adimensionale diminuisce; gli effetti del flusso turbolento aumentano e quindi c'è una maggiore caduta di pressione. Aumentando la pressione di alimentazione, la pressione adimensionale decresce per via della maggiore caduta nella resistenza fissa. L'aumento del rapporto diametro dei fori/lunghezza del pattino, aumenta la pressione nel meato e anche le prestazioni generali del pattino.

Capacità di carico

La capacità di carico è tracciata in funzione del meato.

All'aumentare il meato, la forza diminuisce. Questo è d'accordo con quanto sia verificato per la pressione, dovendo essere coerenti il carico applicato superiormente e la spinta del flusso d'aria inferiormente. Il tasso di caduta della forza è maggiore per carichi elevati.

All'aumentare del rapporto diametro dei fori/lunghezza del pattino, la capacità di carico aumenta.

Portata d'aria

La portata d'aria in massa (espressa in kg/s) è rappresentata al variare del meato e del diametro dei fori.

L'effetto di aumentare il meato si traduce in un aumento della portata causato dalla minore resistenza imposta. Tale effetto si presenta anche aumentando il diametro dei fori. La portata sale se viene aumentata la pressione di alimentazione.

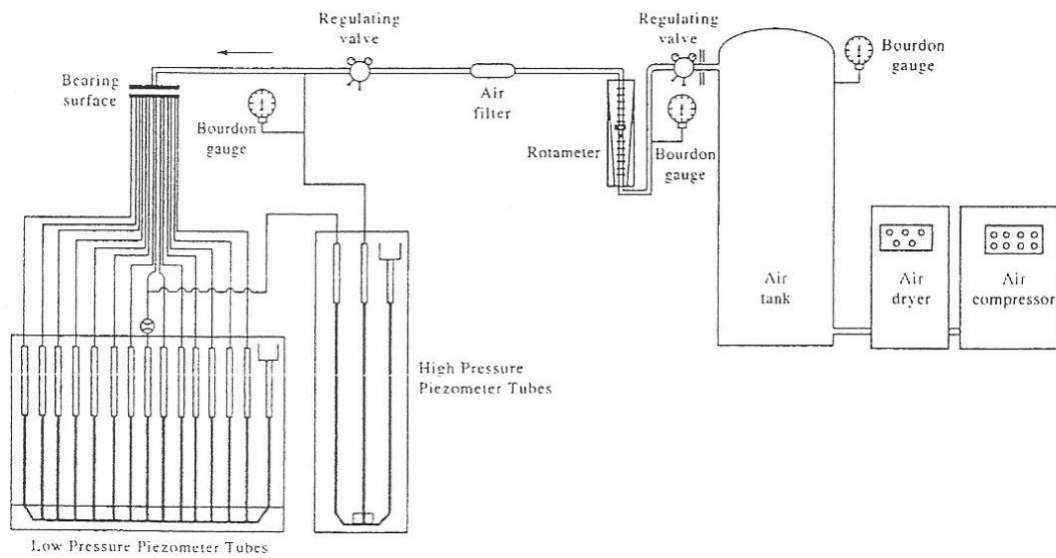
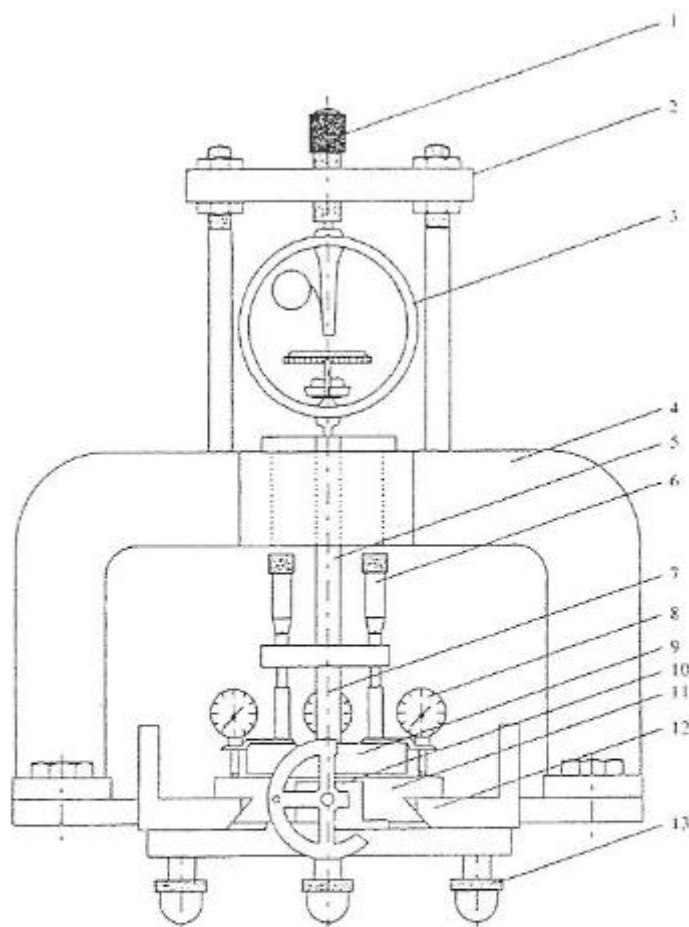


Figura 27: Impianto e sistema di misura del banco prova



- | | |
|----------------------------------|-------------------------|
| 1 - Calibrated Ring Holder | 8 - 3 Dial gauges |
| 2 - Steel Supporting Beam | 9 - Steel Pad |
| 3 - Calibrated Ring | 10 - Bed Driving Wheel |
| 4 - Aluminum Frame | 11 - Steel Bed |
| 5 - Load Transmitting Shaft | 12 - Cast Iron Base |
| 6 - 3 Adjusting Micrometer Heads | 13 - 3 Levelling Screws |
| 7 - Centering Steel Bolt | |

Figura 28: Struttura del banco prova

Conclusioni

Dai risultati sperimentali si possono ottenere le seguenti conclusioni:

- La pressione adimensionale scende per aumento del meato o della pressione di alimentazione;
- La capacità di carico aumenta con la diminuzione del meato o con l'aumento della pressione di alimentazione;

- La portata di aria aumenta con l'aumento del meato o con la pressione di alimentazione;
- L'aumento del rapporto diametro dei fori/lunghezza del pattino permette di aumentare la capacità di carico e quindi l'intero profilo di pressione, aumenta anche la portata d'aria.

2.4.9. Air bearings with a damping function for metal-cutting machine tools, New Way Air Bearings

In questo articolo sono presentati i vantaggi dei cuscinetti pneumostatici per le macchine utensili prodotti dall'azienda New Way.

In passato, il passaggio dalle guide a contatto diretto ai sistemi volenti ha permesso di ridurre l'attrito di un ordine di grandezza. L'ulteriore evoluzione è l'uso della tecnologia del film fluido, che significa assenza di contatto diretto e quindi nessun attrito, nessuna usura e migliore precisione. Lo smorzamento delle vibrazioni è importante per la qualità della finitura, la vita dell'utensile e la riduzione dei micro urti nella lavorazione delle ceramiche.

I problemi nella produzione dei pattini pneumostatici riguardano la finitura della superficie e il controllo del flusso d'aria attraverso il pattino. Si può controllare il flusso attraverso fori calibrati e ragnature per distribuire l'aria pressurizzata sotto la superficie del pattino. Un altro modo è quello di garantire il flusso uguale in tutto il meato attraverso una superficie porosa; a tale scopo si usa il carbonio poroso.

Vantaggi del carbonio poroso:

- **Stabilità;** i passaggi tortuosi del materiale permettono un flusso maggiormente smorzato, evitando il fenomeno del “martello pneumatico”;
- **Rigidità;** l'alimentazione su tutta la faccia garantisce l'uniformità del profilo di pressione nel meato;
- **Sicurezza;** le proprietà lubrificanti naturali della grafite prevengono il danneggiamento delle guide in caso di contatto;
- **Semplicità;** non ci sono ugelli da regolare.

Il montaggio può essere effettuato mediante accoppiamento oscillante o rigido. L'accoppiamento oscillante permette al pattino di autoadattarsi e, se il tutto è montato su un albero filettato, si può anche regolare il precarico. Questo sistema ha comunque svantaggi legati ai maggiori ingombri, alla maggiore complicazione e alla minore rigidità. L'accoppiamento rigido elimina i problemi menzionati, ma richiede maggiore attenzione nella produzione. Occorre mantenere precise le tolleranze geometriche e gli accoppiamenti.

Il processo di riempimento sotto vuoto permette di montare i pattini in modo semplice ed economico. I pattini sono alimentati con il vuoto e posizionati sulla guida; si posiziona poi il supporto. Si ha un piccolo gioco fra supporto e il retro dei pattini, questo è riempito con una resina epossidica. Dopo l'indurimento il pattino è alimentato con aria, che sollevandosi crea il meato d'aria e deforma la struttura.

La rigidità statica è determinata applicando un carico al pattino e misurandolo con una cella di carico; lo spostamento è misurato con un trasduttore capacitivo. La rigidità statica misurata è di $50 \text{ N}/\mu\text{m}$ per il pattino pneumostatico contro i $6 \text{ N}/\mu\text{m}$ dei pattini volventi.

La risposta dinamica in frequenza è stata determinata mediante un generatore di vibrazioni applicato alla guida, i movimenti sono stati rilevati mediante un accelerometro. Si è trovato che per i pattini pneumostatici la frequenza di taglio cade fra 1 e 3 kHz, mentre per i pattini volventi si ha un campo più esteso fra 4 e 500 Hz.

In conclusione, il pattino pneumostatico è una tecnologia che permette di migliorare la precisione, la dolcezza e la risposta dinamica rispetto ai pattini volventi.

2.4.10. Air Bearing Technology, Westwind Air Bearings

In questo articolo sono presentati i prodotti dell'azienda Westwind, in particolare i mandrini con supporti ad aria per macchine utensili.

Un cuscinetto ad aria è un sistema senza contatto, dove l'aria agisce da lubrificante per separare le parti in moto relativo. Sono utilizzati dove è richiesta precisione, accuratezza e ripetibilità. I parametri offerti da questi sistemi, dichiarati dal costruttore, sono maggiori dei cuscinetti convenzionali: velocità da 0 a 300000 giri/min, capacità di carico fino a 150 kg radiali e 500 kg assiali, rigidità fino a $12 \text{ kg}/\mu\text{m}$ radiali e $50 \text{ kg}/\mu\text{m}$ assiali.

Esistono due tipi di cuscinetti: aerostatici e aerodinamici. Il primo tipo ha un'alimentazione che mantiene in pressione le due superfici affacciate. Nel secondo tipo la separazione delle superfici è garantita dal moto relativo.

Dal confronto con le altre tecnologie si può dedurre che i cuscinetti ad aria godono di alcuni benefici:

- **Precisione;** i cuscinetti ad aria hanno elevata precisione di posizionamento. Per il fatto che non c'è contatto diretto, l'usura è minima, mantenendosi costante nel tempo.
- **Alta velocità;** le basse forze di attrito permettono velocità elevatissime (anche oltre 300000 giri/min) con la minima perdita di potenza e bassissima generazione di calore.
- **Durata degli utensili;** l'assenza di vibrazioni e l'alta precisione di rotazione, consentono una vita maggiore agli utensili montati sui mandrini. Solo i mandrini ad aria riescono a ruotare ad una velocità sufficientemente alta a garantire una vita soddisfacente ai microutensili.
- **Migliore finitura;** il movimento accurato e ripetibile garantisce una finitura superiore. Al contrario dei cuscinetti a sfere, il cuscinetto ad aria ha una rigidità costante, prevenendo il danneggiamento dello strato sottostante durante la rettifica dei materiali duri.
- **Durata del cuscinetto;** l'assenza di contatto meccanico assicura una vita illimitata, ammesso che sia fornita aria pulita. Grazie alla natura del sistema, si ha una barriera naturale all'ingresso delle impurità.
- **Dilatazione termica;** molti fattori intrinseci (basso attrito, flusso di aria costante, trasmissione efficiente), uniti a un raffreddamento interno a liquido permettono di ridurre al minimo la dilatazione termica dei mandrini.
- **Assenza di manutenzione;** la normale manutenzione consiste nel verificare che aria e acqua raggiungano puliti e con le corrette specifiche. I filtri per l'aria devono avere capacità filtrante inferiore al micron.
- **Capacità di carico;** si possono progettare cuscinetti con alta capacità di carico e/o elevata rigidità. I valori massimi sono 500 kg per i carichi radiali e 1000 kg per i carichi assiali.

- **Ridotte vibrazioni;** grazie all'elevato bilanciamento ottenuto ed all'assenza di contatto meccanico, si ottengono ridotte vibrazioni e basso rumore.
- **Pulizia;** l'aria è il solo lubrificante utilizzato, quindi è la tecnologia ideale quando non ci può essere contaminazione dell'ambiente. Si possono usare per le applicazioni in camera bianca, come la produzione dei piatti per gli hard disk o dei wafer di silicio per semiconduttori.

2.4.11. G. Belforte, T. Raparelli, V. Viktorov, Theoretical investigation of fluid inertia effects and stability of self-acting gas journal bearings, October 1999

Il presente articolo è uno studio sulla stabilità e sull'effetto dell'inerzia del fluido nelle boccole a aria, come si vede nella figura 29. Mediante un programma di integrazione numerica si è risolta l'equazione del moto e l'equazione di Reynolds. Si è poi fatto un confronto fra i risultati teorici e i dati sperimentali rilevati. Attraverso l'uso del programma si sono determinate le traiettorie dell'asse e l'effetto dell'inerzia del fluido.

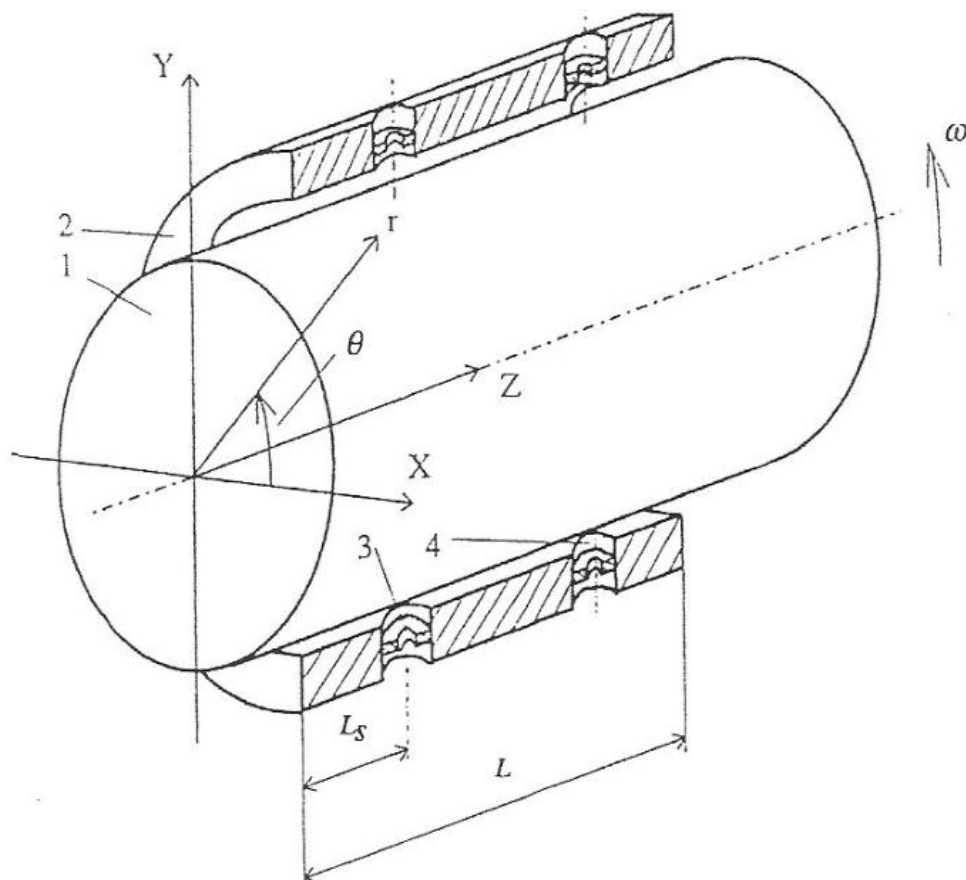


Figura 29: Cuscinetto in esame

Le equazioni del momento della quantità di moto per un fluido lubrificante in un film sottile sono ben conosciute. Per risolvere le equazioni occorre assumere che il profilo di velocità sia la somma di una componente parabolica, dovuta al gradiente di pressione e una componente lineare, dovuta al moto rotativo.

Per verificare la validità dell'approccio teorico si sono confrontati i risultati calcolati con i dati sperimentali. L'indagine ha rilevato che l'effetto dell'attrito è trascurabile. È stato trovato che una mesh con pochi punti o step di tempo troppo ampi produce: instabilità della soluzione numerica, autooscillazione dei valori di pressione e velocità, distorsione della traiettoria, errore statico dei risultati. Simulazioni accurate si sono ottenute usando una mesh di 48×24 , invece di 24×12 e step di tempo fra $1 \cdot 10^{-7}$ e $2 \cdot 10^{-7}$ s; naturalmente la dimensione della mesh dipende anche dalle dimensioni del cuscinetto. Mesh e step di tempo più fini non portano a miglioramenti.

Gli effetti dei termini inerziali sono trascurabili se $Re^* < 1$ e sono rilevanti per valori maggiori. I termini riducono l'orbita dell'asse di rotazione ed il tempo per l'assestamento.

L'orbita al variare del tempo manifesta tre possibili comportamenti:

1. Se la traiettoria dell'asse di rotazione raggiunge un punto e rimane, si è raggiunto un punto di stabilità;
2. Se la traiettoria si riduce formando un percorso stabile, si è raggiunta una stabilità orbitale;
3. Se la traiettoria continua ad aumentare e supera il cerchio della boccola, si ha un'instabilità.

Conclusioni:

- Dai risultati si può rilevare che è possibile risolvere completamente l'equazione di Reynolds per rilevare le caratteristiche statiche e dinamiche di un cuscinetto;
- I termini che descrivono l'inerzia del fluido sono trascurabili se $Re^* < 1$;
- Si propone un parametro di stabilità M_{fs} per determinare il comportamento dinamico dei cuscinetti;

- In alcuni casi gli effetti di sbilanciamento del rotore rendono il cuscinetto maggiormente stabile.

2.4.12. G. Belforte, T. Raparelli, V. Viktorov, A. Trivella, Discharge coefficients of orifice-type restrictor for aerostatic bearings, July 2006

Questo articolo presenta uno studio sperimentale atto a determinare il coefficiente di efflusso dei fori di alimentazione nei pattini pneumostatici. I test sono stati effettuati su pattini con fori anulari o con fori centrali e tasca. Si è misurata la pressione nel meato ed il consumo d'aria al variare di pressione di alimentazione e del meato. Il coefficiente di efflusso è calcolato mediante una formula sperimentale basata sul numero di Reynolds e sulla geometria.

L'approccio base di questo studio è considerare che il foro di alimentazione si comporti come un ugello. La portata in massa attraverso il foro vale:

$$G = C_d G_t \quad (2.19)$$

dove G_t è la portata ideale teorica, C_d è il coefficiente di efflusso. La difficoltà sta nel determinare il valore del coefficiente di efflusso, che varia sia con la geometria che con i parametri di flusso.

È stato costruito un banco che permette di misurare la capacità di carico statica, la distribuzione di pressione, il consumo di aria dei pattini in funzione del meato.

I pattini analizzati sono mostrati in figura 30. Il tipo **a** è a singolo foro centrale, ne sono stati costruiti 7 con diverso diametro dei fori e diversa lunghezza. Il tipo **b** ha il foro centrale e la tasca, mentre il tipo **c** ha una corona di fori con relative tasche, ne sono stati costruiti 1 per tipo, con inserti e con diverso diametro dei fori.

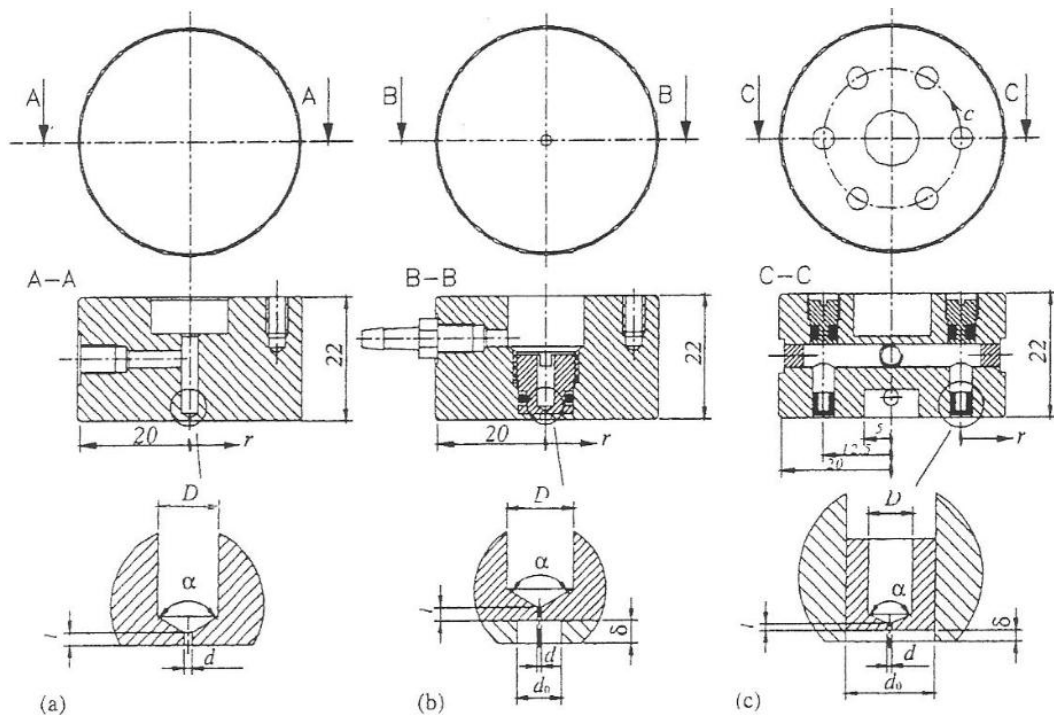


Figura 30: Pattini in esame

È stato misurato il consumo d'aria e la pressione nel meato. Si sono mantenute costanti le altezze di meato h pari a 9, 11 e 14 μm per tutte le geometrie di pattini. Per ogni altezza si sono ottenute cinque distribuzioni di pressione, con le rispettive pressioni di alimentazione pari a 3, 4, 5, 6 e 7 bar. Si è notato che il comportamento della pressione nella tasca dipende fortemente dalla sua altezza δ : se $\delta \geq h$ la pressione nella tasca raggiunge un valore costante, altrimenti se $\delta < h$ l'effetto resistivo della tasca prevale su quello capacitivo e c'è una piccola caduta di pressione.

Per valutare il coefficiente di efflusso, si possono approssimare i pattini come un semplice circuito pneumatico costituito da alcune resistenze in serie: il foro, l'imbocco del meato, la resistenza viscosa del meato. Se l'altezza della tasca è ridotta ($\delta < 20 \mu\text{m}$), si può trascurare l'effetto della resistenza di imbocco nel meato.

Il flusso d'aria teorico attraverso ciascuna resistenza vale:

$$G_t = SP_u \sqrt{\frac{k}{k+1} \left[\left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{(k+1)/k} \right]} \frac{2}{RT} \quad \text{se} \quad \frac{P_d}{P_u} \geq 0,528 \quad (2.20)$$

$$G_t = SP_u \sqrt{\left[\left(\frac{2}{k+1} \right)^{2/(k-1)} \left(\frac{k}{k+1} \right) \right] \frac{2}{RT}} \quad \text{se} \quad \frac{P_d}{P_u} < 0,528 \quad (2.21)$$

dove P_u e P_d sono le pressioni a monte e a valle della resistenza.

Per poter considerare l'effetto delle dimensioni sui coefficienti di efflusso $C_{d,c}$ (orifizio) e $C_{d,a}$ (meato), questi si esprimono in funzione del numero di Reynolds:

$$Re_c = \frac{\rho u d}{\mu}, \quad Re_a = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (2.22)$$

dove h è l'altezza del meato e d il diametro dell'orifizio.

Per il pattino **a**, si è notato che $C_{d,c}$ non è influenzato dalla lunghezza l dell'orifizio, mentre cresce con h e diminuisce con il diametro dell'orifizio d . Per bassi meati, $C_{d,c}$ aumenta con Re_c e tende ad essere costante per alti valori di Re_c . Per i pattini **b** e **c**, se l'altezza della tasca δ è piccola (10, 20 μm), $C_{d,c}$ è molto influenzato da h , d e δ ; se δ è elevato $C_{d,c}$ non è influenzato dalla geometria. Per $Re_c \rightarrow \infty$, le curve si assestano su un valore massimo $C_{d,c \max} = 0,85$.

$C_{d,a}$ al contrario non varia molto con h e d , ma dipende significativamente solo da Re_a e tende al valore 1.

Per avere una stima empirica di $C_{d,c}$ si è sviluppata una formula composta da due termini, il primo che prende in considerazione la dipendenza dalla geometria (f_1), il secondo la dipendenza da Re_c (f_2):

$$C_{d,c} = f_1 f_2 = 0,85 \left(1 - e^{-8,2(h+\delta)/d} \right) \left(1 - e^{-0,001 Re_c (h+\delta)/(h+4\delta)} \right) \quad (2.23)$$

La funzione di approssimazione di $C_{d,a}$ è un esponenziale che dipende solo da Re_a :

$$C_{d,a} = 1,05 \left(1 - e^{-0,005 Re_a} \right) \quad (2.24)$$

2.4.13. G. Belforte, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, C. Visconte, Numerical analysis on the supply hole discharge coefficients in aerostatic bearings, AITC-AIT September 2006

In questo articolo è descritto uno studio di pattino pneumostatico mediante analisi numerica, per correggere la formula teorica della portata mediante un coefficiente

di efflusso. È stato usato un pattino con singolo foro centrale anulare. Per mezzo di modelli a due e tre dimensioni (codice di simulazione fluidica FLUENT), è stata studiata la distribuzione di pressione e calcolata la portata. Le simulazioni sono state fatte provando pattini con diversi diametri di foro, a diverse pressioni di alimentazione e diversi meati.

Un approccio comune consiste nel considerare il sistema di alimentazione come una resistenza concentrata, così la portata in massa è calcolata come:

$$G = C_d G_t \quad (2.25)$$

dove G_t è la portata teorica e C_d è il coefficiente di efflusso.

Sono stati studiati tre pattini cilindrici con dimensioni esterne uguali (diametro 40 mm e altezza 22 mm), ma con differente diametro del foro di alimentazione (0,2; 0,3 e 0,4 mm). Tutti i fori di alimentazione hanno lunghezza di 0,3 mm. Per ogni pattino sono state effettuate prove con 9, 11 e 14 μm di meato e pressioni di alimentazione di 4, 5 e 6 bar relativi.

Supposizioni iniziali per la risoluzione dei modelli:

- l'aria è ideale;
- la viscosità dipende dalla temperatura;
- la pressione a monte è costante;
- la pressione a valle è quella atmosferica;
- il flusso di aria è adiabatico.

Per determinare quale modello aderisce meglio ai risultati sperimentali, ne sono stati provati tre:

- modello laminare;
- modello turbolento ad un'equazione Spalart-Allmaras;
- modello turbolento a due equazioni $k-\epsilon$.

Dai confronti si comprende che il modello laminare e il modello Spalart-Allmaras hanno buona congruenza con i risultati sperimentali, mentre il modello $k-\epsilon$ no.

Sono state elaborate simulazioni tridimensionali per comprendere l'influenza della presa di pressione statica presente nel contropattino. L'influenza è significativa solo quando il foro si trova molto vicino agli ugelli; in questo caso si misura non solo la pressione statica, ma anche una parte della pressione dinamica.

Si è anche studiata l'influenza della geometria del bordo dell'ugello sulla distribuzione di pressione. La distribuzione di pressione non risente della differenza fra uno smusso o una raggiatura, mentre uno spigolo vivo causa una maggiore caduta di pressione dovuta alla netta riduzione della sezione di efflusso.

Visto che la differenza fra numerico e sperimentale è concentrata nella zona del foro, mentre c'è congruenza nelle altre parti, si ha conferma dell'efficacia della simulazione. Si conferma anche l'affidabilità dell'approccio numerico, che può essere usato per studi rapidi e poco costosi su pattini di altre geometrie.

2.4.14. G. Belforte, F. Colombo, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, Study of a gas thrust bearing with supply grooves, Toyama September 2008

In questo articolo sono studiati i cuscinetti ad aria per rotori ad alta velocità. Lo studio è stato effettuato sia sperimentalmente che numericamente, accoppiando l'equazione dell'efflusso con l'equazione di Reynolds. La portata è calcolata mediante un coefficiente di efflusso. Lo studio ha anche riguardato l'influenza delle dimensioni dei fori e della scanalatura sul comportamento del cuscinetto.

I cuscinetti studiati sono affacciati fra di loro e agiscono da reggispinta sulla flangia del rotore, come si mostra in figura 31. Sono stati studiati due tipi di geometrie: la prima è formata da un anello di fori equispaziati, l'altra è identica con una scanalatura circolare in corrispondenza dei fori.

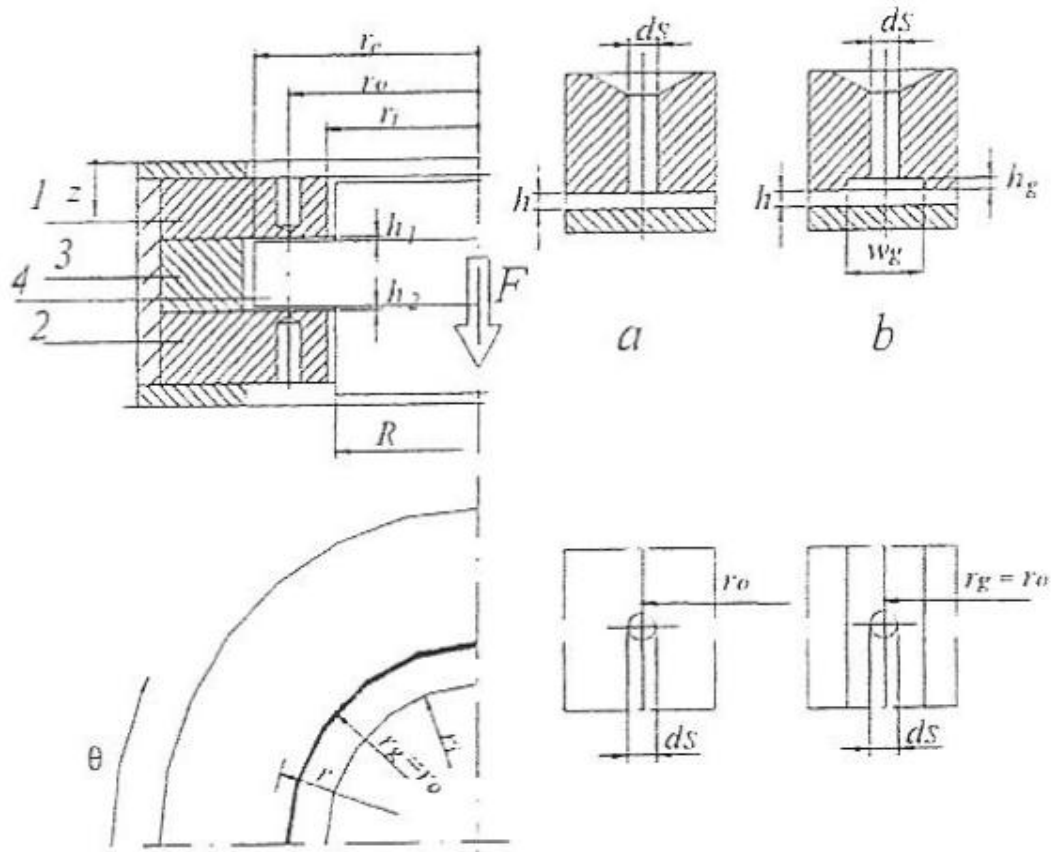


Figura 31: Cuscinetto reggispinta

Il flusso nel meato si presume che abbia espansione isoterma, con profilo laminare delle velocità. Per determinare la portata in massa G , si è risolta l'equazione di Reynolds in coordinate polari con il metodo delle differenze finite.

Sono state effettuate simulazioni per ottenere la distribuzione di pressione nel cuscinetto a differenti meati h_0 . Il programma risolve le equazioni nel tempo dalla pressione iniziale $P = P_a$ fino al raggiungimento delle condizioni stazionarie. Per analizzare la risposta dinamica, si applica una forzante a gradino e si studia l'equilibrio dinamico fra l'inerzia del rotore, spinta dell'aria e forzante.

Il rotore è stato posizionato con l'asse in verticale. Per simulare la presenza di azioni esterne, sono previsti due sistemi di applicazione del carico formati ciascuno da un cilindro cavo e una sfera che scorre all'interno; uno applica carichi radiali, l'altro assiali. La forza verticale può essere applicata solo verso l'alto, il rotore è caricato verso il basso mediante pesi calibrati. La misurazione dello spostamento assiale è effettuata per mezzo di un traduttore capacitivo con risoluzione di $0,1 \mu\text{m}$. La posizione di spostamento nullo è mantenuta applicando una forza verso l'alto pari al peso del rotore.

Dai diagrammi delle prove statiche è chiaro che la presenza della scanalatura aumenta la rigidità e migliora la linearità della caratteristica. La prova dinamica della risposta al gradino mostra che l'aumento della profondità della scanalatura migliora la rigidità, ma al contempo le oscillazioni generate sono meno smorzate fino all'instabilità.

Il confronto fra dati sperimentali e simulati mostra che il modello numerico è adatto a simulare un cuscinetto con scanalatura.

2.4.15. F. Colombo, A. Trivella, Air bearing testing, November 2008

Nel mondo accademico sono stati condotti molti studi attraverso l'approccio sperimentale, numerico o analitico. Occorre ancora lavorare sui pattini pneumostatici per migliorarne la rigidità, la capacità di carico e la stabilità.

Il gruppo di ricerca composto da G. Belforte, F. Colombo, T. Raparelli, A. Trivella e V. Viktorov studia sistemi con cuscinetti ad aria al Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino. Questo articolo presenta i progetti di ricerca del gruppo ed in particolare i banchi prova progettati ed usati per l'attività sperimentale.

Pattini pneumostatici

La capacità di carico e la rigidità di un pattino piano sono fortemente influenzate dalla geometria del sistema di alimentazione. Per capire tali fenomeni, sono stati costruiti alcuni pattini uguali nelle dimensioni esterne, ma differenti in dimensioni e geometria del sistema di alimentazione. Il sistema di prova per i pattini pneumostatici è raffigurato in figura 32, questo sistema di prova è in grado di misurare la capacità di carico, la rigidità, la distribuzione di pressione e il consumo di aria. La distribuzione di pressione e la portata rilevate sono state usate per calcolare il coefficiente di efflusso C_d .

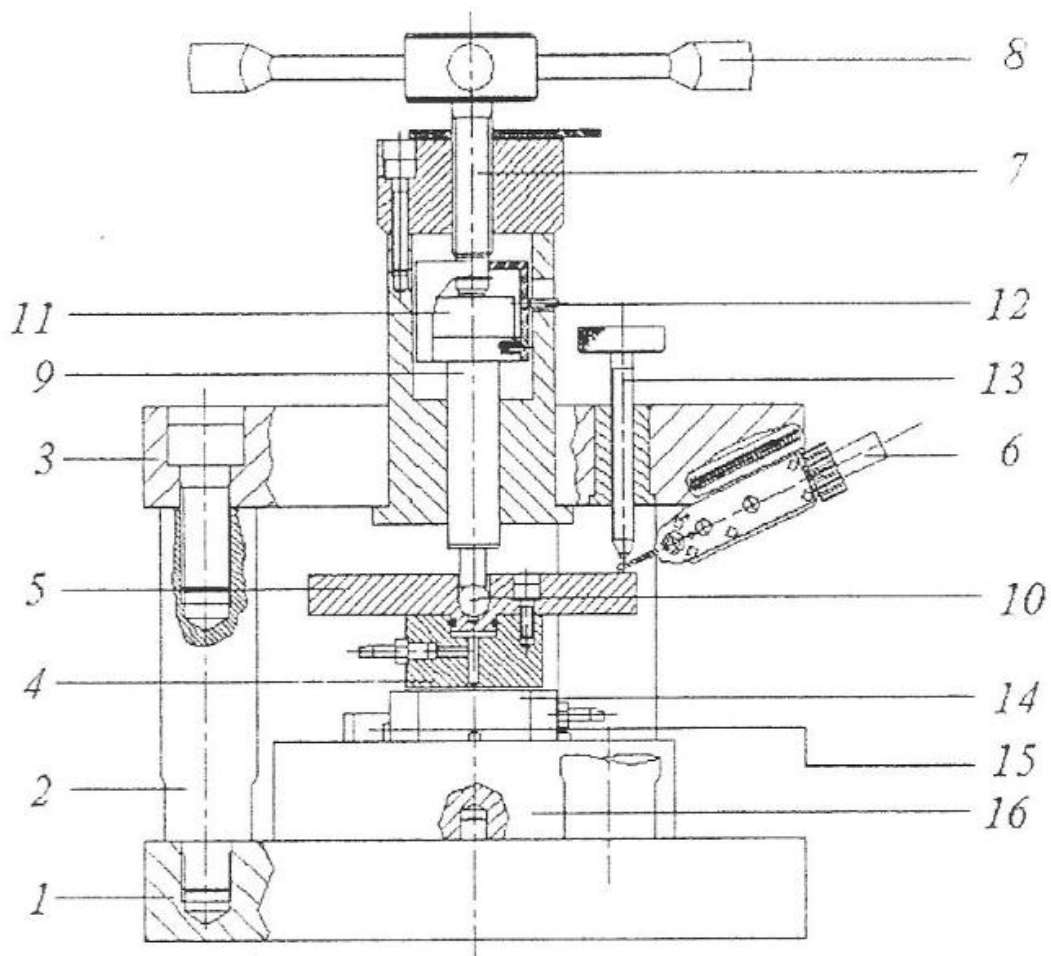


Figura 32: Banco prova per cuscinetti pneumostatici

È stato costruito un cuscinetto a boccia per movimenti lineari, come si osserva in figura 33, fornito di quattro fori di alimentazione equamente spazati, da testare su un banco prova per determinarne la rigidità. Il cuscinetto è accoppiato con il suo perno e quest'ultimo è fissato al telaio del banco prova. La rotazione è impedita da una guida parallela al perno. Al cuscinetto è collegato un piattello che permette di applicare un carico determinato; l'accoppiamento è effettuato per mezzo di un giunto sferico che impedisce l'applicazione di forze longitudinali.

Per aumentare la rigidità del cuscinetto a boccia descritto prima, si sono sviluppati sistemi di controllo del meato che variano la pressione di alimentazione. Un primo tipo di controllo è costruito con logica elettronica. Il foro superiore e quello inferiore sono collegati con l'alimentazione e lo scarico mediante quattro valvole digitali PWM. Il sistema di controllo confronta la posizione di riferimento impostata con la posizione rilevata da un trasduttore induttivo. Il secondo tipo di controllo è pneumatico. È costituito da due valvole proporzionali collegate ai due fori e da un trasduttore di posizione pneumatico. Dalle prove di applicazione del carico effettuate, si nota che il sistema di controllo

elettronico compensa lo spostamento verticale anche per carichi maggiori rispetto a quello pneumatico.

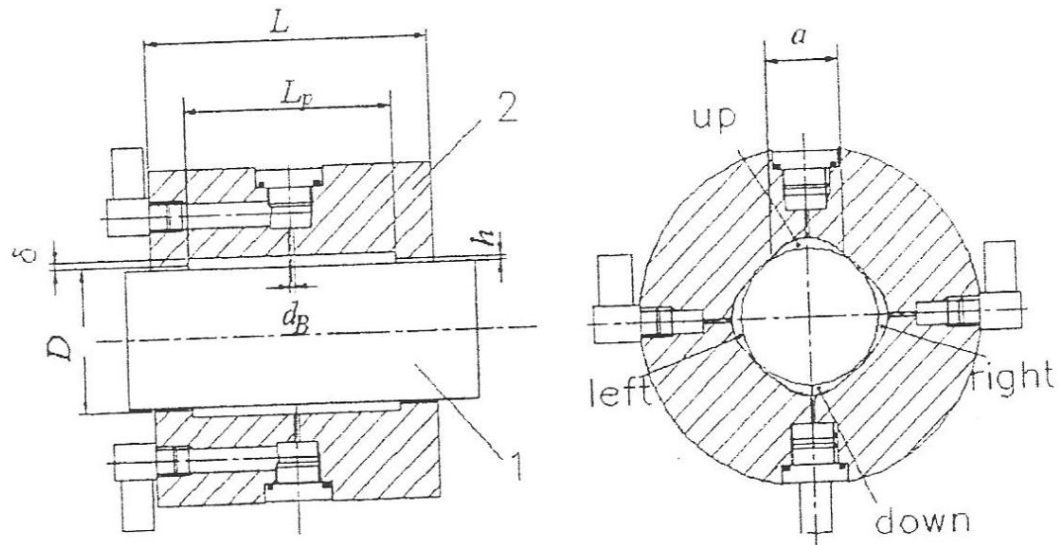


Figura 33: Cuscinetto per movimenti lineari

Guide lineari a profilo variabile

Anche i cilindri pneumatici possono essere adattati al funzionamento senza attrito, eliminando le guarnizioni e usando un profilo particolare per l'elemento mobile. Il principio di funzionamento è il medesimo dei pattini pneumostatici. Un piccolo flusso di aria passa fra la camera in pressione ad una camera di scarico. La speciale geometria del pistone permette la generazione di una forza autocentrante che evita lo stick-slip fra le parti in moto relativo, anche quando il pistone è fermo. In figura 34 sono mostrati tre diversi tipi di geometria: **a** conico, **b** a gradino, **c** con tasca.

Per validare la teoria applicata ai pistoni senza guarnizioni, si sono costruiti dei prototipi con le geometrie descritte. Si è anche assemblato un banco prova dove si possono misurare le distribuzioni di pressione assiale e circonferenziale e la portata di aria variando l'eccentricità.

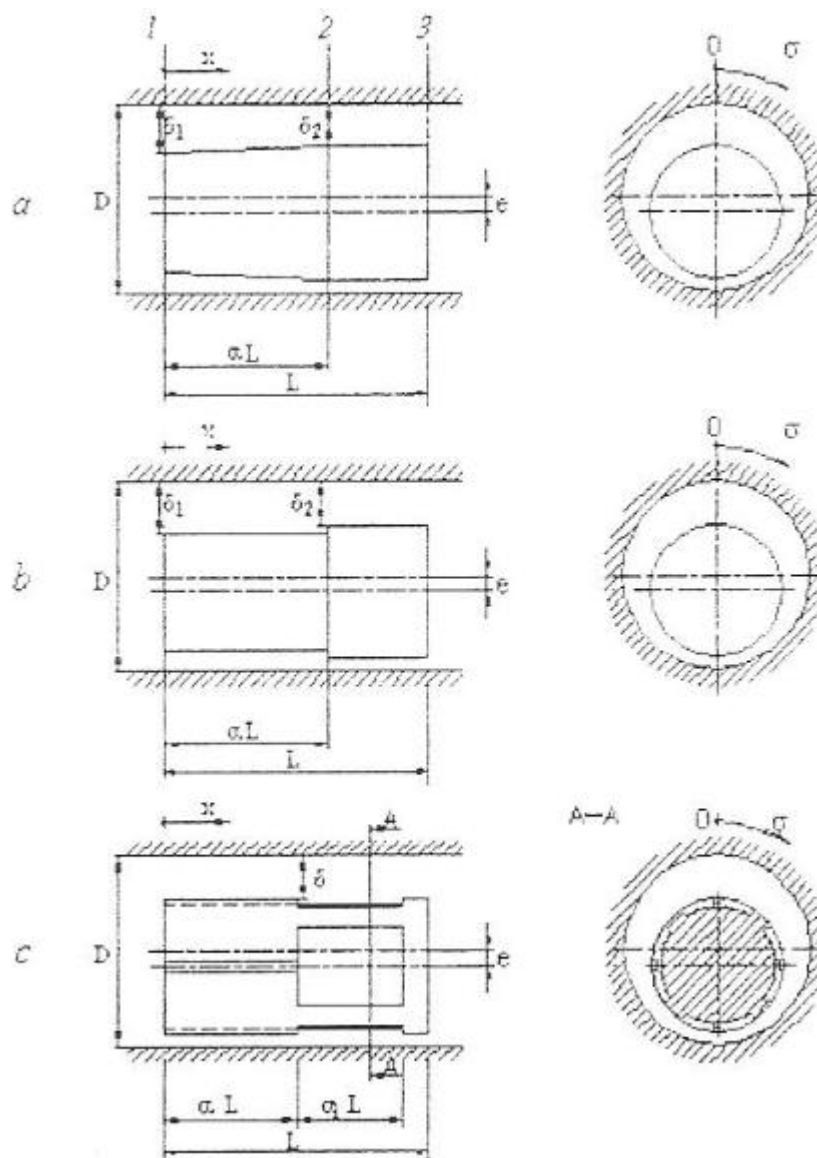


Figura 34: Pistone senza guarnizioni: tre diverse geometrie

Cuscinetti dinamici e ibridi

I cuscinetti dinamici non hanno alimentazione di aria esterna, la capacità di carico è dovuta alla rotazione. Quando la capacità di carico è necessaria anche a velocità basse o nulle, si fornisce alimentazione esterna (cuscinetti ibridi). Sfruttando i cuscinetti ibridi sono stati costruiti alcuni rotori per studiarne il comportamento.

Il primo di questi è un mandrino pneumatico con cuscinetti ibridi: questo è lungo circa 500 mm e con diametro 50 mm. È dotato di due cuscinetti radiali con meato di $20 \mu\text{m}$ e di uno assiale con meato di $15 \mu\text{m}$ ed è mosso da una turbina ad aria compressa. È possibile misurare la rigidità assiale e radiale mediante dei dispositivi di applicazione del carico, mentre mediante dei trasduttori di

spostamento capacitivi è possibile determinare la traiettoria dell'asse del mandrino. Il prototipo è stato progettato per ottenere delle rigidità all'utensile confrontabili con quelle dei mandrini industriali; è stato testato per velocità fino a 60000 giri/min.

Il secondo rotore è un mandrino comandato da un motore asincrono con controllo di velocità in anello chiuso; ha 2,5 kW di potenza nominale con una velocità di 75000 giri/min. La temperatura del motore e dell'aria è controllata da un sistema di raffreddamento a circuito chiuso.

Altri studi sono stati effettuati per migliorare la stabilità del rotore a scapito della rigidità. È stato progettato un rotore di 37 mm di diametro con turbina pneumatica per applicazioni tessili. I cuscinetti ad aria sono montati su anelli O-ring con diametro della sezione di 1,48 mm, in modo che possano oscillare. Gli O-ring inseriscono un'azione ammortizzante che rende possibile lavorare a pressioni di alimentazione più basse, in questo modo è possibile studiare l'instabilità senza danneggiare il rotore e i cuscinetti. La traiettoria è misurata dal lato turbina e dal lato del naso del mandrino, facendolo girare fino a 75000 giri/min.

Per avere un comportamento stabile, il cuscinetto è stato alesato con una geometria ellittica.

Conclusioni

Le prove miravano a migliorare i parametri come la stabilità, la rigidità e il consumo, ognuno secondo l'applicazione. Per ogni tipo di misura è stato scelto lo strumento con il grado di precisione adatto.

Le prove sperimentali hanno un ruolo essenziale nel supportare e migliorare le simulazioni numeriche, come anche nello sviluppo di modelli teorici. Garantiscono anche che i modelli analitici e numerici siano affidabili e possano quindi essere utilizzati nella progettazione di sistemi simili.

2.4.16. G. Belforte, F. Colombo, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, Aerostatic thrust bearings: experimental comparison between grooved and plane pads, June 2009

Lo scopo di questo articolo è di valutare l'effetto di una scanalatura circolare sulla distribuzione di pressione, sulla portata d'aria e sulla rigidità di un pattino circolare ad aria.

Negli ultimi anni sono state studiate diverse soluzioni per migliorare le prestazioni dei cuscinetti ad aria come diversi sistemi di alimentazione, cuscinetti in materiali porosi, cuscinetti a membrana o micro scanalature lavorate sulla superficie del pattino.

Sono stati provati due pattini circolari di diametro 40 mm con tre fori di alimentazione posizionati a 120°. Il pattino 1 ha i tre fori di diametro 0,3 mm posizionati su una circonferenza di diametro 25 mm. Il pattino 2 è come il primo in cui è stata aggiunta una scanalatura circolare profonda 10 µm e larga 0,7 mm lavorata sulla circonferenza dei fori.

Il diametro dei fori di alimentazione è stato controllato con un microscopio, mentre la larghezza e la profondità della scanalatura sono state controllate con un rugosimetro.

La distribuzione statica di pressione è stata determinata mediante il banco prova già citato nel punto 2.4.15. In questo caso il meato è misurato mediante tre trasduttori induttivi; due trasduttori laser sono usati per tarare i sensori induttivi. La pressione al di sotto del pattino è rilevata per mezzo di un contropattino mobile che può muoversi in direzione radiale e circonferenziale.

Per prima si è misurata la caratteristica statica, alimentando il pattino a 5 bar e si è notato che il pattino 2 ha una capacità di carico maggiore del pattino 1 per qualsiasi valore di meato.

Dopo si è misurata la distribuzione di pressione in direzione radiale e circonferenziale con un meato di 15 µm, facendo varie prove per verificare la ripetibilità. Le distribuzioni radiali sono misurate nella direzione a 0°; in corrispondenza dei fori, e nella direzione a metà fra due fori. La distribuzione circonferenziale è misurata in corrispondenza della circonferenza dei fori di alimentazione.

Dai confronti si nota che la pressione nella ragnatura rimane costante. Dalle prove circonferenziali si nota che la pressione è mediamente più alta in presenza di ragnatura. La presenza della ragnatura aumenta la capacità di carico specialmente ai bassi meati, evitando anche l'effetto di rigidità negativa a meati bassissimi.

2.4.17. G. Belforte, F. Colombo, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, Aerostatic thrust bearings: experimental comparison between different feeding solutions, June 2009

Lo scopo di questo articolo è di valutare l'effetto del numero di fori di alimentazione sulle caratteristiche statiche di un pattino circolare ad aria.

Sono stati analizzati due pattini aventi le dimensioni geometriche esterne citate nel punto 2.4.16. Il pattino 1 ha sei fori di diametro 0,2 mm equamente spaziatati sulla circonferenza, mentre il secondo ne ha tre del medesimo diametro. La strumentazione e la procedura di prova sono le medesime del punto 2.4.16.

Osservando le caratteristiche statiche si nota che si ha un massimo nella curva della capacità di carico per bassi meati; quando il meato si avvicina allo zero il carico diminuisce. Il pattino 1 ha maggiore capacità di carico e maggiore portata d'aria. Il meato a carico massimo diminuisce aumentando il numero di fori di alimentazione.

Si è misurata la distribuzione di pressione in direzione radiale e circonferenziale con un meato di 15 μm . Le distribuzioni radiali sono misurate nella direzione a 0° ; in corrispondenza dei fori, e nella direzione a metà fra due fori; 30° per sei fori e 60° per tre fori. La distribuzione circonferenziale è misurata in corrispondenza della circonferenza dei fori di alimentazione. Sia la distribuzione radiale che quella circonferenziale.

La distribuzione radiale e la circonferenziale aumentano con il numero di fori di alimentazione. Per il pattino 2, i fori sono quasi indipendenti perché la distribuzione fra due fori scende ad un valore prossimo alla pressione ambiente. Quindi diminuendo il numero di fori, la distribuzione di pressione è meno uniforme e si sente maggiormente l'effetto della rigidità negativa a bassi meati.

La capacità di carico per un pattino con sei fori è circa il doppio per quello a tre fori, così anche per la portata. A bassi meati è conveniente usare un numero maggiore di fori per via della maggiore uniformità di pressione, mentre agli alti meati c'è eccessiva portata.

CAPITOLO III

BANCHI PROVA E METODI DI MISURA

In questo capitolo si vuole descrivere i banchi prova utilizzati per le rilevazioni sperimentali sui pattini pneumostatici, che uno si trova all'interno del laboratorio LAQ IBIS del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino e l'altro nella ditta Mager s.r.l.

I banchi sono stati progettati in modo da migliorare le prestazioni e le procedure di misurazione.

Mediante questi banchi si possono provare pattini circolari e rettangolari. La struttura dei due banchi consente di effettuare due tipi di prove: la *caratterizzazione statica*, che consiste nel rilevare la portanza, il consumo e la rigidità del pattino in funzione del meato, e la *distribuzione di pressione*, che permette di conoscere l'andamento di pressione al di sotto del pattino lungo una direzione conosciuta e ad un meato voluto. Le due prove logicamente non possono essere eseguite contemporaneamente.

3.1. STRUTTURE

Il banco che si trova all'interno del laboratorio LAQ IBIS del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino è appoggiata direttamente a terra. Il *piano di lavoro* è costituito da un *blocco di granito*, che appoggia a terra tramite una *struttura di alluminio* e quattro *piedi antivibrazioni*. Al piano di granito sono fissate tre *colonne portanti* che sorreggono la *crociera a tre bracci*, formando una struttura chiusa. Mentre l'altro banco che si trova nella ditta Mager s.r.l. è appoggiata direttamente a terra. Il *piano di lavoro* è costituito da una *piastra di acciaio in AISI 420*, che appoggia a terra tramite una *struttura di acciaio elettrosaldato*. Alla struttura di acciaio elettrosaldato sono fissate quattro *colonne portanti* che sorreggono la *piastra di ferro C40 verniciato*, formando una struttura chiusa. Questi tipi di costruzione permette ai banchi di contrastare l'applicazione del carico di compressione durante le prove.

Al di sopra della crociera è montata la *colonna centrale* con lo scopo di ospitare il sistema di applicazione del carico. All'interno della colonna scorre un *puntale*: ad esso è demandata la funzione di applicazione del carico. Il suo scorrimento è controllato dalla *vite senza fine* dotata di un *volantino ad azione manuale* per ruotarla nel caso del banco prova trovato nel Politecnico di Torino, mentre nella

Mager si ha un *castello con un motoriduttore* per la generazione del carico. Nel banco prova trovato nel Politecnico di Torino la *cella di carico* è montata in basso, alla fine del puntale, in modo che tenga già conto del peso della struttura meccanica che sta al di sopra, dall' altro lato della cella di carico è montata la *punta di contatto*, dotata di cava emisferica e fra il pattino e la punta di contatto è presente una sfera; non c'è necessità di dischi portapattino, mentre che il banco nella ditta la *cella di carico* è montata in alto, tra motore e guida, dall' altro lato della guida è montata la *punta di contatto*, dotata di cava emisferica, in questo caso sono fornite tre punte di contatto secondo i pattini da provare e fra il pattino e la punta di contatto è presente una sfera.

Nel banco prova trovato nel Politecnico di Torino c'è un *contropattino* che è costituito da tre *tavole* sovrapposte. La *tavola inferiore* ha un movimento rotatorio e serve a misurare l'angolo di orientamento del foro di misura. La *tavola centrale* ha un movimento lineare trasversale e misura il primo degli spostamenti lineari del contropattino denominato "asse X". La *tavola superiore* ha il secondo movimento lineare di tipo longitudinale, chiamato "asse Y". Su questa ultima tavola è ricavato il *foro fi misura* a cui è collegato il *trasduttore di pressione*. I sistemi di coordinate utilizzabili sono due: il primo costituito dalla scala angolare e dall'asse Y per un posizionamento di tipo polare, il secondo con asse X e asse Y per un posizionamento cartesiano.

L'orientamento della prima tavola è effettuato manualmente; c'è una vite di bloccaggio per mantenere la posizione. Lo spostamento della seconda e terza tavola è effettuato mediante due viti senza fine che consentono gli spostamenti in entrambi i sensi. Parallelamente alle due viti sono fissati due trasduttori di posizione potenziometrici.

Per provare modelli di pattini con altezza diversa sono stati costruiti puntali di tre lunghezze, ognuno dotato di una superficie sferica cava per il contatto con la sfera.

I due banchi prova descritti sopra, sono mostrati nelle figure 35 e 36.



Figura 35: Banco prova presso nel laboratorio IBIS del Politecnico di Torino



Figura 36: Banco prova presso nella ditta Mager s.r.l.

3.2. CIRCUITI DELL'ARIA

I banchi sono dotato di un circuito dell'aria compressa, come si vedono nelle figure 37 e 38 che serve ad alimentare il pattino. Il pattino ha fori molto piccoli per cui c'è la necessità di aria priva di impurità ed umidità, fornita ad una ben precisa pressione. C'è poi il bisogno di poter interrompere il flusso e di inserire uno strumento per la misurazione della portata.

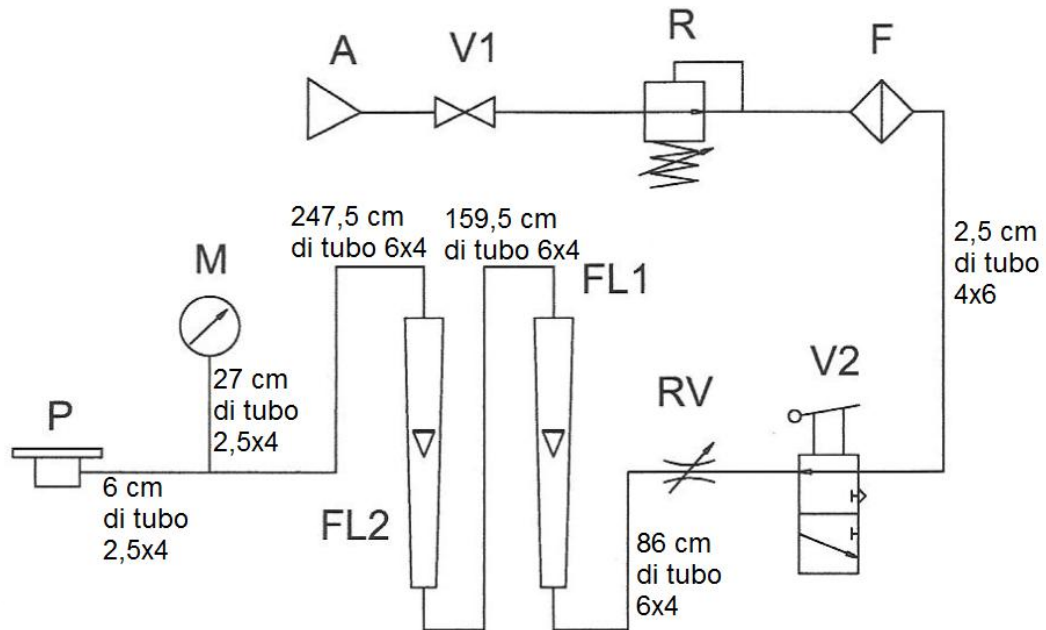


Figura 37: Circuito dell'aria compressa presso il Politecnico di Torino

Per il banco prova presso il laboratorio IIBIS del Politecnico di Torino, si osserva che nella figura 37, l'aria è prelevata dall'alimentazione di rete **A** a 10 bar ed è intercettata dalla valvola a saracinesca **V1**. Successivamente attraversa il riduttore **R**, che ne riduce la pressione al valore richiesto dal pattino, per le prove realizzate si sono utilizzate 4 bar, e il filtro **F** che elimina le impurità. Questi tre elementi sono fissati alla parete direttamente alla linea di rete, il resto del circuito è fissato al banco.

L'aria attraversa poi una valvola a tre vie **V2** che serve per interrompere il flusso di aria senza azionare la valvola a saracinesca. Dopo c'è una resistenza variabile **RV** che solitamente rimane aperta; si chiude solamente se il pattino necessita di stabilizzazione. Seguono poi i due flussimetri **FL1** e **FL2**, descritti nei prossimi punti a trattare, il manometro di precisione **M**. All'estremità finale del circuito è presente il pattino **P**.

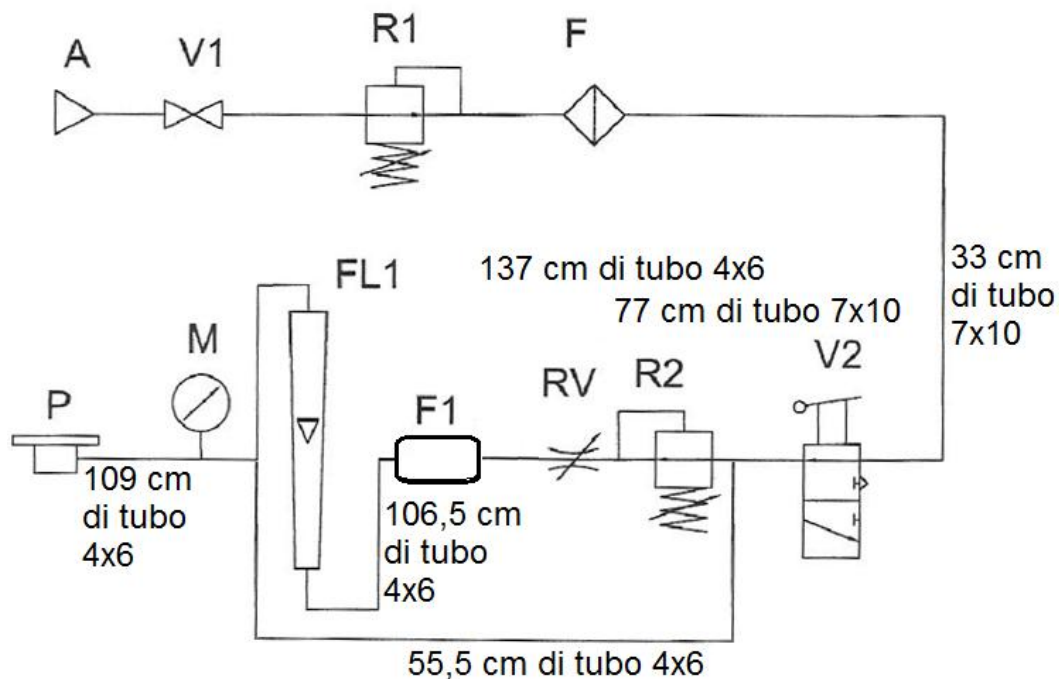


Figura 38: Circuito dell'aria compressa presso la ditta Mager

Per il banco prova presso la ditta Mager, si osserva che nella figura 38, l'aria è prelevata dall'alimentazione di rete **A** a 10 bar ed è intercettata dalla valvola a saracinesca **V1**. Successivamente attraversa un primo riduttore **R1**, che ne riduce la pressione, e il filtro **F** che elimina le impurità.

L'aria attraversa poi una valvola a tre vie **V2** che serve per interrompere il flusso di aria senza azionare la valvola a saracinesca. Dopo c'è un secondo riduttore **R2** che effettua l'ulteriore riduzione di pressione al valore richiesto dal pattino, per le prove realizzate si sono utilizzate 4 bar. Successivamente è presente una resistenza variabile **RV** che solitamente rimane aperta; si chiude solamente se il pattino necessita di stabilizzazione, come vista prima nel circuito d'aria compressa presso il laboratorio IBIS del Politecnico di Torino. Dopo c'è un serbatoio **F1** che permette accumulare aria compressa. Segue poi il flussimetro **FL1**, descritto nel prossimo punto a trattare, il manometro di precisione **M**. All'estremità finale del circuito è presente il pattino **P**.

3.3. STRUMENTAZIONE

La strumentazione collegata ai banchi permette di rilevare le grandezze della prova. In dove sono presenti:

- una cella di carico per misurare la forza applicata al pattino;

- due comparatori per rilevare lo spostamento verticale del pattino;
- due flussimetri per misurare la portata di aria che attraversa gli ugelli;
- un manometro per misurare la pressione di alimentazione;
- un trasduttore di pressione per misurare la pressione all'interno del meato;
- due trasduttore di posizione per misurare lo spostamento del contropattino;
- una scala angolare per rilevare l'orientamento del contropattino.

I segnali sono misurati mediante una scheda di acquisizione collegata ad un PC. Tale dispositivo hardware trasforma i segnali analogici in valori digitali. Mediante il software Labview è possibile creare un programma di trattamento dei segnali, che li campiona, li trasforma e li memorizza in un file.

3.3.1. Misurazione della forza

La cella di carico utilizzata nel banco prova presso il Politecnico di Torino è del tipo estensimetrico a ponte di Wheatstone, modello LRF300 prodotto dalla *FUTEK*, come si vede in figura 39. Questa è del tipo a basso profilo, cioè di forma rettangolare ad altezza ridotta per applicazioni che necessitano di ingombri limitati. Essa può misurare carichi di compressione e trazione, applicati fra le due filettature di estremità. Il modello adottato ha forza massima di 1000 lb, pari a 4450 N, con sensibilità di 2 mV/ V. Mentre che, la cella di carico utilizzata nel banco prova presso la Mager è del modello 546QDT* prodotto dalla *DS EUROPE*, come si vede in figura 40. Questa è in forma di "S". Questa può misurare carichi di compressione e trazione, applicati fra le due estremità. Il modello adottato ha forza massima di 1000 kg, pari a 9806,7 N.



Figura 39: Cella di carico *FUTEK LRF300*

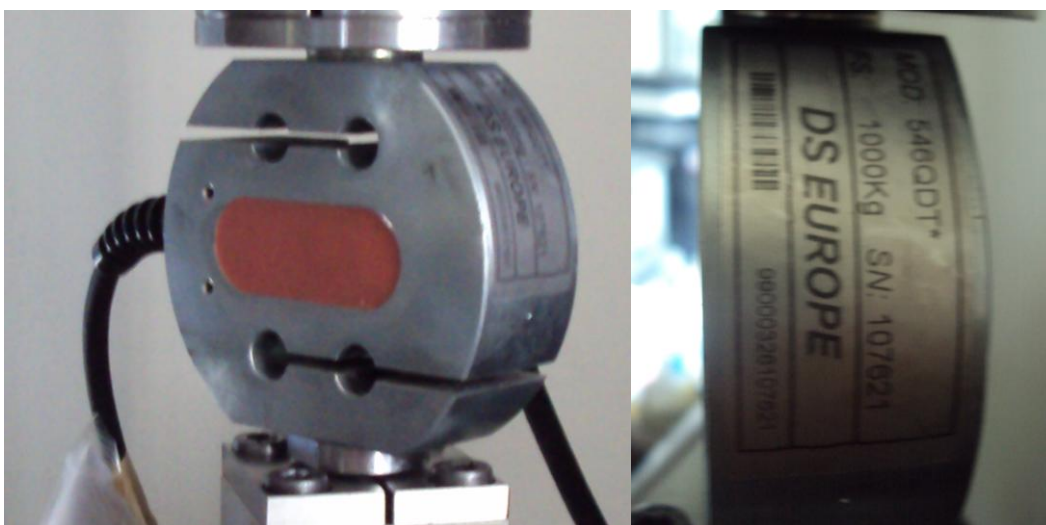


Figura 40: Cella di carico *DS EUROPE 546QDT**

3.3.2. Misurazione del meato

La misurazione del meato è la parte critica delle prove. È molto difficile trovare il punto di azzeramento degli strumenti e la misura è influenzata dai fenomeni di beccheggio del pattino. Per questo occorrono strumenti semplici da azzerare e stabili nel mantenimento della lettura.

A causa di questi problemi i sensori presenti sul banco sono stati sostituiti varie volte con modelli più adatti allo scopo. Cronologicamente si sono susseguiti:

- comparatori meccanici a lancetta;
- trasduttori induttivi e comparatori meccanici;
- trasduttori induttivi e laser;
- comparatori LVDT.

Comparatori meccanici

Data la ridotta sensibilità e il notevole attrito delle aste sul disco portapattino, era abbastanza frequente che una prova con movimento poco fluido causasse la lettura di meati falsati.

Sensori laser

I sensori di spostamento funzionano per riflessione: un raggio laser è emesso dalla testa ottica, si riflette sulla superficie da misurare, il sensore integrato nella testa lo riceve e la centralina calcola la distanza dalla testa alla superficie.

L'uso del laser non presenta particolari difficoltà. Una volta posizionata la base magnetica e direzionata la testa sul punto voluto, si controlla di essere all'interno del campo di misura. Se si definisce una posizione di partenza e si azzerà il visualizzatore, si può fare una misura differenziale; ad esempio misura di uno spostamento. Non vi sono particolari precauzioni da osservare per effettuare la misura, tranne quello di evitare superfici lucidate a specchio o nere opache.

Sensori induttivi

I sensori induttivi impiegati sono forniti dalla HBM (Hottinger). Il sistema è costituito dai tre sensori TR102 e da una centralina di controllo *MGCplus*. I sensori induttivi hanno la particolarità di misurare lo spostamento della distanza evitando il contatto con qualsiasi superficie. Il principio di funzionamento è basato sull'induzione magnetica, sono quindi necessari materiali ferromagnetici (materiali amagnetici si possono usare ma con difficoltà). Il campo di misura è di 0,5 mm, mentre la sensibilità raggiunge i 0,5 μm .

Il sistema di controllo *MGCplus* è adatto ad una molteplicità di trasduttori, essendo costituito da una unità centrale e da schede di espansione. Nel caso di sensori induttivi occorrono tre schede *ML50B*.

L'uso dei trasduttori induttivi non è semplice, questi richiedono una taratura per poter avere una misura affidabile. La misura è influenzata dalle condizioni magnetiche dell'ambiente circostante e anche dalle proprietà dei corpi presenti, è necessario quindi effettuare una taratura direttamente sul banco ogni volta si toglie il pattino o si sposta uno dei sensori.

La necessità di una lunga taratura ad ogni smontaggio del banco hanno portato a dismettere tali trasduttori nonostante di essere di precisione elevata.

Comparatori LVDT

I comparatori sono forniti dalla ditta *Mahr*. La misurazione del meato avviene mediante i comparatori *Mahr* 1318 e da un condizionatore/visualizzatore (centralina) *Millimar* C1208, usata nel laboratorio IBIS e la centralina *Millitron* M256, utilizzata nella ditta Mager. I comparatori sono del tipo ad asta con codolo per il montaggio su un morsetto per strumenti, come si mostra in figura 41. Il funzionamento si basa sul principio del trasformatore LVDT (linear variable differential transformer), che permette allo strumento di raggiungere la sensibilità di $0,1 \mu\text{m}$ e di avere una notevole stabilità della lettura. Il campo di misura è di 1,5 mm.

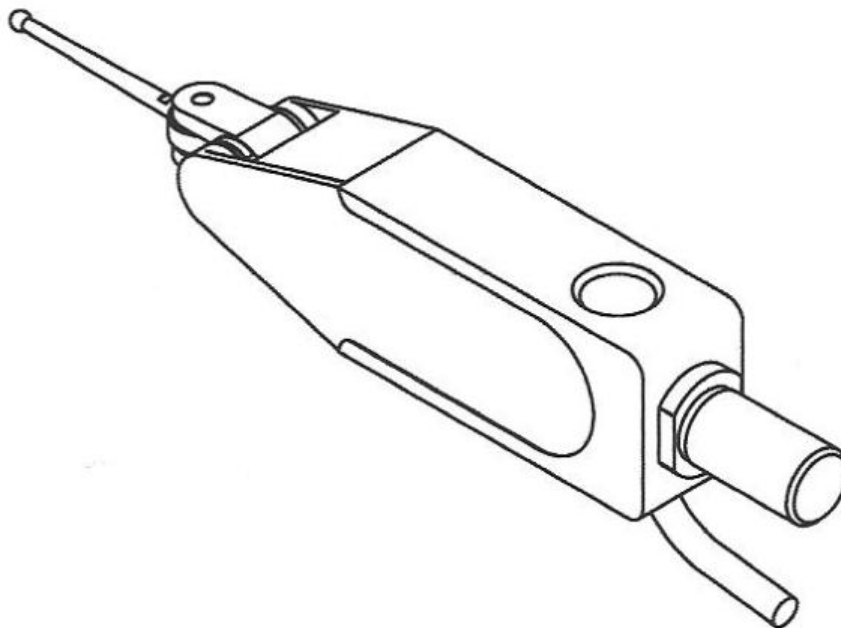


Figura 41: Comparatore LVDT

La centralina *Millimar* e *Millitron* alimenta i comparatori e ne riceve il segnale convertendolo in una lettura sul display. Il quadrante è uno schermo LCD su cui sono rappresentati due indicatori digitali e un indicatore analogico a lancetta: le due righe a cifre indicano la lettura dei due sensori, l'indicatore a lancetta simula la lettura di un comparatore meccanico e può essere impostato per visualizzare uno dei due canali. Il fondo scala dell'indicatore analogico è stato regolato per visualizzare un campo di misura di $\pm 30 \mu\text{m}$.

Lo strumento può effettuare controlli dimensionali di particolari meccanici. Per tale motivo sono presenti, a fianco del display, delle spie che indicano il raggiungimento del limite di tolleranza impostato.

L'uso dei comparatori è abbastanza semplice: una volta montati sulla base magnetica, come si osserva in figura 42, si posizionano nel punto dove si vuole misurare lo spostamento verticale e si porta l'asta a contatto con la superficie; si azzerava il visualizzatore. Il comando di azzeramento si dà premendo in sequenza i pulsanti MASTER > START > START. Si deve prestare attenzione a posizionare le aste di misura il più possibile orizzontalmente, in quanto il valore della misura è influenzato dall'angolo formato con la superficie.

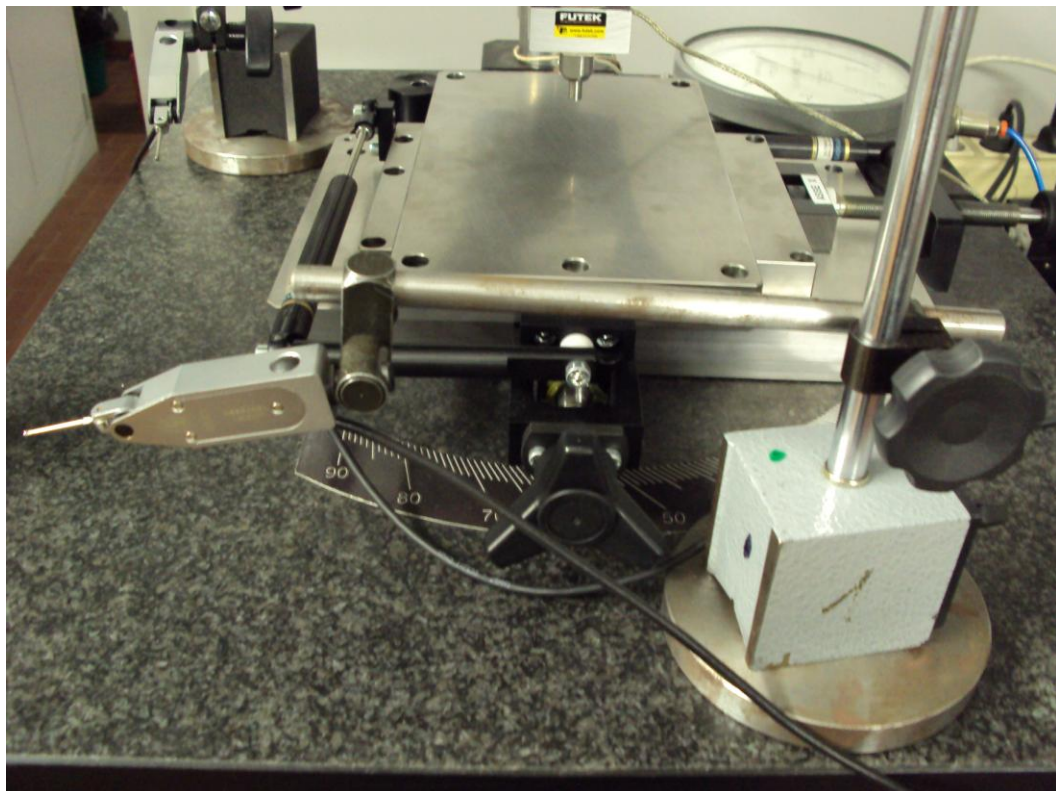


Figura 42: Montaggio dei comparatori su base magnetica

Data l'elevata stabilità della misura e la possibilità di portare i sensori al centro pattino, si possono rilevare anche piccoli spostamenti del pattino con una precisione migliore di quanto si ha fatto in passato. Ciò ha permesso di effettuare analisi, anche a meati ridottissimi per studiare il comportamento del pattino a contatto. Tale strumento, insieme a nuovi metodi di prova più raffinati ha consentito di effettuare prove qualitativamente superiori alle precedenti strumenti analizzati.

Questo strumento è l'unico a non essere dotato di un'uscita analogica, ma ha solo un'interfaccia digitale seriale. Il collegamento avviene direttamente al PC mediante il cavo apposito.

3.3.3. Misurazione della portata

La misurazione della portata nel Politecnico di torino avviene mediante due flussimetri a galleggiante della ditta *Rota Yokokawa*. Visto che il range di portata misurabile da un solo flussimetro è abbastanza ridotto, se ne sono usati due. Il modello L6.3/250 (n° matricola 13584) ha una scala di misura compresa fra 0,22 e 4,14 NI/min (a 1 bar assoluto e 20 °C). Il modello L627 (n° matricola 11033) misura portate più piccole: ha una scala di misura compresa fra 0,033 e 0,65 NI/min (a 1 bar assoluto e 20°C), che amplia verso il basso il campo di portata misurabile.

Il flussimetri a galleggiante in questione sono costituiti da un tubo di vetro conico di diametro calibrato. Il flussimetro L6.3/250 è costruito in allestimento industriale: il tubo di vetro è inserito all'interno di un contenitore di protezione ed il collegamento alle tubazioni è effettuato mediante due flange; il galleggiante è di materiale ceramico, come si vede in figura 43.



Figura 43: Flussimetro L6.3/250

Lo strumento L627 è invece realizzato in costruzione da laboratorio: il tubo di vetro è fissato ad un treppiede che può essere appoggiato su una superficie piana e, mediante due viti, se ne può regolare la verticalità; il galleggiante è di acciaio, come si vede in figura 44.

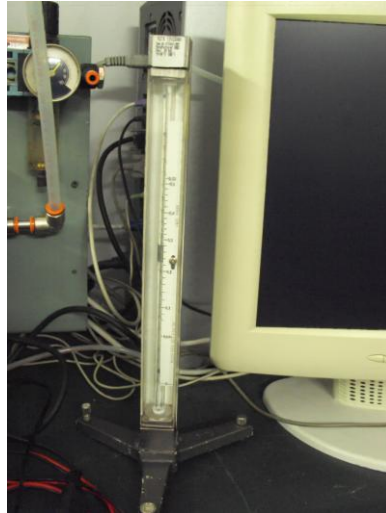


Figura 44: Flussimetro L627

La lettura del flussimetro non può essere acquisita attraverso uno strumento, dovrà quindi essere introdotta manualmente quando si memorizzano i dati.

La procedura di prova iniziale prevedeva l'uso del solo flussimetro L6.3/250, in quanto nelle prove non si raggiungevano meati bassi e non era quindi necessario misurare portate piccole. Quando si è iniziato a effettuare lo studio a meati ridotti, si è presentata la necessità di misurare anche le piccole portate e quindi si è introdotto il secondo flussimetro. Si è visto poi che il secondo flussimetro era utilizzabile anche per la determinazione del punto di zero del pattino.

Il flussimetro è uno strumento delicato, pertanto occorrono alcune precauzioni nel suo uso. È innanzitutto necessario non farlo cadere a terra perché è fragile. È previdente inoltre non alimentare o togliere aria improvvisamente per evitare urti del galleggiante con i suoi fincorsa, poiché dal suo peso e dalla sua forma dipende la precisione di misura.

La lettura della posizione del galleggiante è effettuata mediante una scala millimetrica, ma non è indicato nessun valore di portata. Questo si ottiene mediante il software di conversione ROTAMAT che interpola le tabelle di taratura fornite dal costruttore tenendo conto della temperatura dell'aria e della sua pressione. Il risultato è fornito in 1/min in condizioni ambiente e in condizioni normalizzate.

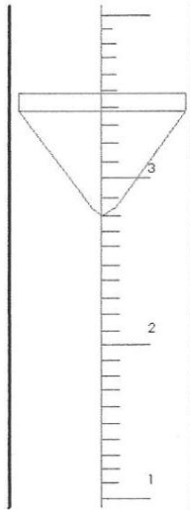


Figura 45: Principio di funzionamento di un flussimetro

Invece, la misurazione della portata nella Mager avviene mediante un trasduttore massiccio a filo caldo della ditta *BROOKS*. Il modello è 5860S/BC1BA0BA0AA1B1 e ha una scala di misura compresa fra 0 e 25 NI/min (a 1 bar assoluto e 20 °C) e con visualizzatore digitale.

3.3.4. Misurazione della pressione

La pressione è uno dei parametri che caratterizzano il comportamento di un cuscinetto ad aria. Per caratterizzare il flusso di aria, occorre conoscere il valore della pressione di alimentazione e il suo profilo nel meato.

La misurazione della pressione di alimentazione nel laboratorio IBIS del Politecnico di Torino avviene mediante un manometro di precisione Bourdon a lancetta di marca *BLONDELLE* con scala 0–12 bar e precisione di 0,05 bar. Il manometro è inserito nel circuito di alimentazione appena prima del pattino. Mentre, la misurazione della pressione di alimentazione nella ditta Mager avviene mediante un manometro *ROSEMOUNT* con scala 0–10 bar.

La misurazione della pressione nel meato avviene per mezzo di un piccolo foro (\varnothing 0,14 mm) ricavato nella tavola superiore del contropattino; poi attraversa i condotti interni fino a giungere ad un trasduttore. Il trasduttore è di tipo resistivo a ponte di Wheatstone; e il modello è *XPM10-20* della ditta *FGP Sensors*, dove "20" indica il fondoscala di 20 bar. Come tutti i trasduttori di questo tipo è necessario un condizionatore-visualizzatore esterno, ma è prodotto anche in versione con condizionatore integrato.

3.3.5. Scheda di acquisizione

La scheda di acquisizione è lo strumento che permette di leggere i segnali analogici in uscita dagli strumenti e di convertirli in un valore numerico corrispondente alla grandezza misurata. Poi mediante il software Labview si crea un programma (conosciuto anche come Virtual Instrument) che controlli la scheda di acquisizione, applichi i guadagni ai segnali acquisiti e memorizzi i dati in un file.

3.4. SOFTWARE DI ACQUISIZIONE

In questo paragrafo si descrive il software che è stato utilizzato, descrivendo anche l'interfaccia grafica.

Entrando nel dettaglio, il programma è costituito da due sezioni: un'interfaccia grafica in cui sono inclusi i visualizzatori delle variabili misurate, i relativi cursori, le caselle per inserire i dati, i pulsanti di comando, e uno schema a blocchi che descrive il flusso dei dati e la logica di controllo.

3.4.1. Interfaccia grafica

L'interfaccia grafica usata per il laboratorio del Politecnico di Torino, si può vedere in figura 46 ed è un pannello composto da:

- un pulsante “STOP” che termina l'acquisizione dei dati;
- un pulsante “SALVA” che salva la lettura corrente in una riga del file di testo;
- una casella di inserimento testo per la scrittura del percorso del file di salvataggio;
- un grafico su cui si visualizza la posizione del foro di misura della pressione;
- due visualizzatori che indicano la posizione lungo l'asse X e Y del foro di misura;

- una casella di inserimento del valore dell'angolo di orientamento della tavola;
- due grafici a barra per la visualizzazione dell'altezza del meato con i relativi visualizzatori;
- un pulsante “LEGGI MILLIMAR” per avviare la lettura di test dei comparatori;
- due grafici a barra per la lettura della forza e della pressione con i visualizzatori associati;
- due caselle di inserimento della lettura dei flussimetri;
- un visualizzatore della tensione di alimentazione dei trasduttori potenziometrici.

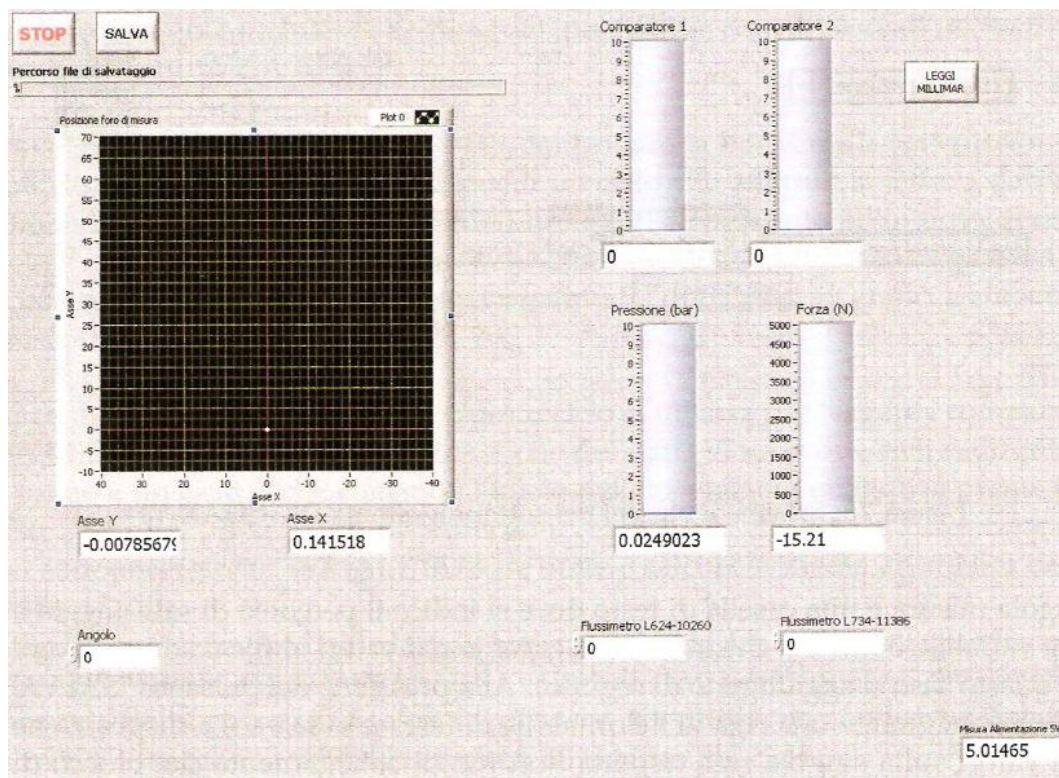


Figura 46: Interfaccia grafica del programma ACQUISIZIONE.VI

Mentre la interfaccia grafica usata per la Mager è molto più complessa che la usata per il Politecnico di Torino e ha molti pulsanti, caselle, visualizzatori, ecc, per questo motivo no si procederà a descrivere questa interfaccia, ma è possibile vederla in figura 47.

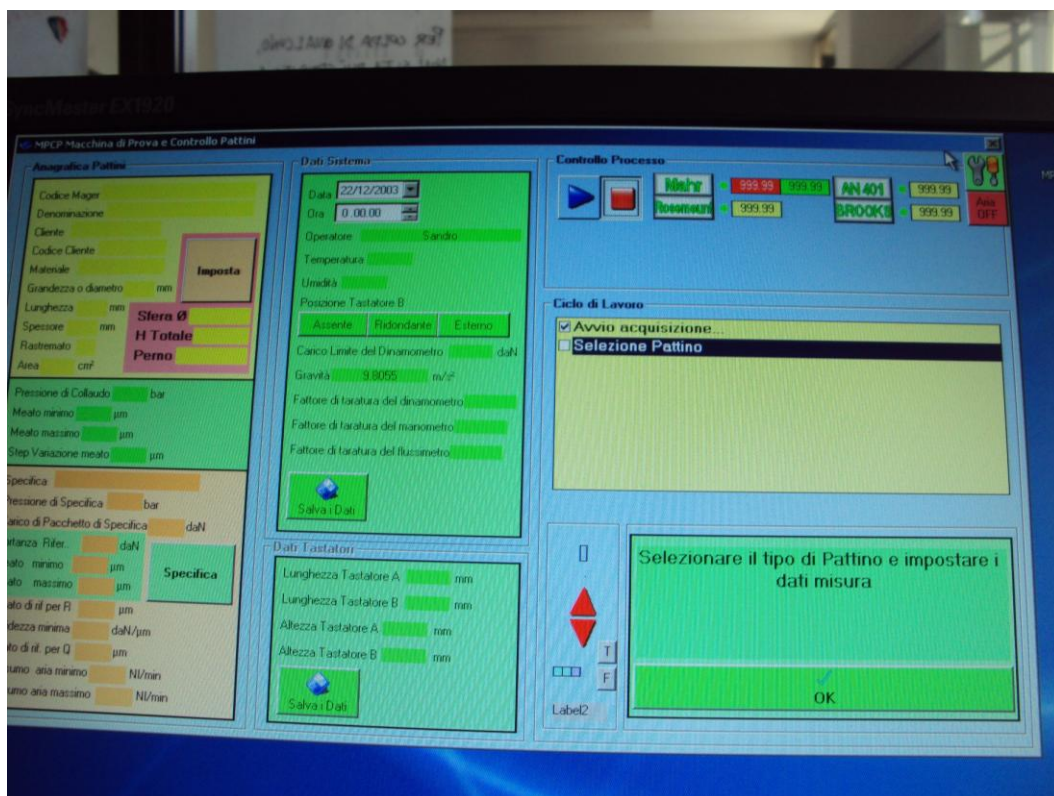


Figura 47: Interfaccia grafica utilizzata nella ditta Mager

3.5. USO DEL BANCO CON METODI DI PROVA

In questo paragrafo si descriverà brevemente l'utilizzo del banco. Le prove che si possono effettuare sono due: La caratteristica statica e la de terminazione dei profili di pressione. Nella prova di caratterizzazione statica del pattino si rilevano forza, spostamento verticale, portata d'aria ed, eventualmente, la pressione in funzione del meato, misurato come spostamento verticale, con lo scopo di determinare la rigidità, il carico massimo ed il consumo. La rilevazione del profilo di pressione si effettua per caratterizzare il flusso di aria presente nel meato e, insieme alla caratteristica statica, per studiare l'influenza della geometri del pattino sulle prestazioni generali.

Le caratteristiche importanti dei vari metodi di prova si manifestano prevalentemente nella caratterizzazione statica, in quanto è molto influenzata dalla misura del meato. La procedura di determinazione dei profili di pressione è derivata dalla procedura per la prova statica.

I metodi di prova sono:

1. Metodo di prova con comparatori
2. Metodo di prova con azzeramento mediante flussimetro
3. Metodo di prova mediante meati prefissati

3.5.1. Caratterizzazione statica

Le operazioni preliminari alla prova sono molto semplici e consistono solamente nel loro posizionamento e nell'azzeramento del visualizzatore. Si presenta il problema di come determinare il punto di zero dell'altezza del meato.

Procedura di prova:

- collegamento all'aria compressa;
- controllo del pattino;
- montaggio del pattino sul disco porta pattino;
- montaggio del puntale corretto;
- inserimento del pattino nel banco;
- posizionamento dei comparatori;
- regolazione delle aste a azzeramento;
- lettura dei valori, trascrizione e conversione;
- chiusura aria compressa;
- smontaggio pattino.

Fasi preliminari

Si collega il pattino all'aria compressa, si monta sul disco e si inserisce nel banco. Si monta il puntale adatto e si preme leggermente sul disco per mantenerlo in posizione senza applicare un carico eccessivo (intorno a $30 \div 40$ N).

Preparazione dei trasduttori

I comparatori sono montati su basi magnetiche, si possono quindi posizionare come meglio si vuole, anche in funzione delle attrezzature già presenti. Il corretto posizionamento prevede che solo le punte delle aste dei comparatori siano a contatto del pattino in modo che le aste stesse siano il più possibile orizzontali, evitando quindi che le aste o corpo del comparatore vadano a toccare il disco portapattino. Per fare ciò si regolano i braccetti delle basi magnetiche e si orientano le aste. Per avere una maggiore precisione di misura e una minore influenza dell'imbarcamento del pattino, conviene misurare lo spostamento verticale il più possibile vicino al centro del pattino.

Azzeramento dei trasduttori

Una volta posizionati i comparatori, si azzerava il visualizzatore; il campo di misura non deve essere definito, ma è la massima escursione dell'asta. La centralina di controllo soffre di un leggero rumore elettromagnetico che fa oscillare la visualizzazione di alcuni decimi di micron, pertanto occorre premere delicatamente il pulsante di azzeramento per evitare offset dello zero di lettura. Eventualmente ripetere l'operazione alcune volte fino ad ottenere il valore 0 sul visualizzatore.

Lettura dei valori e conversione

La lettura dei valori è molto semplice, basta solo leggere i due valori di altezza dei due sensori. Si effettua poi la media delle due letture. Si introducono poi i fattori di conversione, la lettura del flussimetro è convertita con il programma ROTAMAT, la rigidità è calcolata con la formula a cinque punti.

Fasi finali

Al termine della misura si tolgono i comparatori, prima alzando l'asta dal pattino e poi spostando la base magnetica, si chiude il flusso di aria e si smonta il pattino.

3.5.2. Caratteristica di pressione

La tecnica di misura della pressione e del movimento del contropattino sono identiche al metodo precedente, si elencheranno quindi solo le fasi principali senza entrare nel dettaglio.

Fasi della prova:

- collegamento del pattino;
- posizionamento dei trasduttori;
- azzeramento dei trasduttori;
- raggiungimento del meato voluto;
- azzeramento sul foro di uscita dell'aria;
- rilevazione della pressione a 0°;
- rilevazione della pressione all'angolo intermedio fra due fori;
- rilevazione della pressione circonferenziale;
- termine della prova.

3.5.3. Caratterizzazione statica con azzeramento mediante flussimetro

Nell'azzeramento senza aria, il pattino è appoggiato alla superficie del contropattino; è facile in questo modo azzerare gli strumenti, anche se questa condizione non corrisponde alla situazione reale di funzionamento. Inoltre, se si applica forza al pattino, c'è l'influenza della deformazione.

L'azzeramento con aria consente, invece, di avere il pattino nella reale situazione di funzionamento, anche se non è più possibile avere il contatto fra le superfici. È necessario quindi elaborare un sistema per la determinazione del meato nullo.

Esaminando le prove precedenti, si è notato che il legame fra forza e portata non varia mai, anche se le rilevazioni del meato sono errate. Si è anche visto che, applicando forza con il volantino, la portata decresce fino ad annullarsi o fino a raggiungere un minimo: in queste condizioni il pattino non ha più portanza perché non c'è più flusso di aria e si deduce quindi che sia a meato zero.

Si usa quindi il flussimetro come strumento di azzeramento, partendo dalla condizione di minimo carico e ma mano caricando il pattino fino a raggiungere la portata nulla o il valore minimo. Il flussimetro già utilizzato ha un fondo scala adatto a determinare le portate di funzionamento; al contrario le portate di azzeramento sono molto basse e si rende necessario un secondo flussimetro con scala minore collegato in serie, per avere una buona risoluzione di lettura.

Sono stati effettuati studi sul comportamento del flussimetro al variare della forza applicata, sia caricando il pattino che diminuendo il carico. Si è notato che muovendo il volantino per spingere il pattino a contatto, i valori di forza aumentano e il galleggiante del flussimetro scende con un leggero ritardo, che però si annulla quando si lascia assestare la posizione impostata. A risalire il flussimetro sale tempestivamente, senza manifestare fenomeni di isteresi tipici di un'inversione del moto. Si può quindi dire che l'azzeramento effettuato caricando il pattino non influisce sulla prova che è invece effettuata diminuendo la forza.

Generalmente un flussimetro utilizzato nel suo campo di misura non provoca cadute di pressione nel circuito, però quando si raggiunge la portata massima tali cadute possono manifestarsi.

Fasi del metodo:

- collegamento del pattino;
- controllo dei raccordi;
- inserimento all'interno del banco;
- posizionamento dei comparatori;
- contatto del puntale;

- aumento del carico fino a portata nulla;
- azzeramento dei comparatori;
- rilevazione dei dati e conversione;
- tracciatura dei grafici;
- chiusura dell'aria compressa;
- smontaggio dei pattini.

Operazioni iniziali

Si monta il pattino sul disco mediante le tre viti. Si collega il pattino all'aria compressa, si apre l'aria, si regola la pressione al valore di lavoro e si controlla che il pattino abbia i fori liberi. Si verifica che non ci siano perdite nei raccordi, è importante questo controllo per avere misure di portata ripetibili e quindi un azzeramento affidabile.

Avvicinamento del puntale

Si introduce il pattino nel banco e si avvicina il puntale per bloccarlo all'interno. Si avvita lentamente il volantino scuotendo il disco orizzontalmente per assicurarsi che il puntale sia a contatto con la sfera senza forzamenti. Questa operazione è importante per non avere movimenti irregolari del pattino durante la prova.

Annullamento della portata

Si avvicinano i comparatori al pattino e si portano le aste di misura a contatto con la sua superficie superiore. Si ruota lentamente il volantino premendo il pattino e facendo scendere la portata. Il flussimetro di taglia maggiore arriverà allo zero, diventa necessario controllare la portata sul flussimetro più piccolo. Con piccoli spostamenti si cerca di annullare la portata senza applicare carico ulteriormente sul pattino. Alcune volte la portata non si annulla, ma si ferma ad un valore di minimo, secondo il tipo di pattino. L'altezza di meato impostata costituisce il punto di azzeramento dei comparatori e anche il primo punto della prova, ad

altezza di meato nulla, per cui si annotano i valori nella prima riga della tabella di rilevazione.

Esecuzione della prova

Si rileva la caratteristica statica scaricando il pattino e prendendo nota delle letture dei comparatori, della cella di carico e dei due flussimetri. Si inseriscono i fattori di conversione per la lettura della cella di carico. Si convertono le letture dei due flussimetri mediante il programma ROTAMAT. Si calcola la rigidità mediante la formula fornita dalla Mager.

Conclusione della prova

Si tracciano i grafici di forza, rigidità e portata ANR in funzione del meato. La curva di portata è composta dalle letture dei due flussimetri, quindi si considerano anche livelli di portata bassi, che prima non venivano neanche misurati. A rilevazione conclusa si toglie il pattino dal banco, si chiude l'aria compressa e si scollega il pattino.

3.5.4. Caratteristica di pressione con azzeramento mediante flussimetro

Il metodo di misura della caratteristica di pressione non è cambiato, è variato invece il metodo di regolazione dell'altezza del meato. Per determinare il meato non è più indispensabile l'utilizzo dei comparatori, ma si usa il flussimetro sfruttando la correlazione fra portata e meato determinata nelle prove di caratterizzazione statica. È necessario quindi effettuare in modo accurato alcune prove, per ripetibilità, e trovare una curva che rappresenti l'andamento medio della portata al variare del meato.

Tecnica di prova:

- collegamento del pattino;
- controllo dei raccordi;
- esame della tabella delle letture di una prova statica ed individuazione della lettura del flussimetro corrispondente al meato a cui effettuare la prova di pressione;

- impostazione del meato mediante lettura del flussimetro;
- misurazione della pressione lungo la direttrice radiale a 0°;
- misurazione lungo la direttrice fra due fori;
- misurazione lungo la direzione circonferenziale;
- costruzione dei grafici;
- termine della prova.

Azioni iniziali

Le fasi iniziali della prova sono le stesse della altra tecnica di misura della pressione; occorre però verificare correttamente i raccordi per avere una corretta impostazione della portata e di conseguenza del meato.

Regolazione del meato

Dalle tabelle delle prove statiche si trova la corrispondenza fra il meato voluto e la lettura relativa sul flussimetro, eventualmente tracciando un grafico se si vuole una caratteristica completa. In questa prova il flussimetro funziona come un calibro pneumatico di precisione, avendo una grande sensibilità alla variazione del meato. Si regola il volantino fino a raggiungere la portata voluta.

Rilevazione dei dati

Impostato il meato voluto si rilevano le pressioni lungo le tre direzioni stabilite (radiale lungo il raggio del foro, radiale lungo il raggio intermedio fra due fori, circonferenziale) secondo la tecnica già descritta.

Conclusione della prova

Alla fine delle misurazioni si tracciano i grafici pressione-spostamento e pressione-angolo. Si chiude poi l'aria e si smonta il pattino dal banco.

3.5.5. Caratteristica statica a valori di meato prefissati

Queste due esigenze apparentemente contrastanti sono in realtà accomunate dalla rilevazione di pochi valori ad un intervallo costante di rilevazione.

La tecnica consiste nel misurare le grandezze di portanza, rigidezza, pressione e portata ad una altezza di meato prestabilita, con intervalli di spostamento molto ampi. Volendo raggiungere l'altezza misurata in modo preciso, a differenza del metodo precedente in cui non veniva controllata la posizione raggiunta. L'azzeramento avviene ancora mediante flussimetro. Per comodità, la pressione è stata rilevata in un punto conosciuto, al raggio di foratura nella posizione angolare intermedia fra due fori.

In questo modo il tempo di esecuzione si reduce notevolmente, anche se occorre più tempo per raggiungere la singola posizione. Le curve di forza e di rigidezza sono molto stabili se si confronta con i metodi precedenti.

Fasi della prova:

- collegamento del pattino;
- controllo dei raccordi;
- inserimento del pattino nel banco;
- posizionamento dei comparatori;
- annullamento della portata;
- azzeramento dei comparatori;
- rilevazione dei dati ai valori di meato prestabiliti;
- conversione e tracciatura dei grafici;
- chiusura dell'aria compressa;
- smontaggio del pattino.

Le fasi iniziali non saranno elencate, in quanto sono le stesse del metodo di prova con azzeramento mediante flussimetro.

Annullamento della portata

Si aumenta il carico a piccoli passi, fino ad ottenere il valore minimo o nullo di portata; fatto ciò si azzerano i comparatori. Si è definito il punto di zero con il metodo identico alla prova precedente.

Rilevazione dei dati

Sulla tabella di rilevazione dei dati si scrivono già i valori di meato da misurare. Partendo dal punto di azzeramento, si scarica lentamente il pattino, fino a raggiungere la prima altezza di meato imposta, si annotano le misure. Si prosegue con questa sequenza di azioni fino all'ultimo valore di meato. Occorre prestare molta attenzione nel raggiungere precisamente le letture di meato in modo che siano confrontabili con le simulazioni numeriche.

Fasi finali

Creando i grafici dei parametri caratteristici del pattino si possono apprezzare i vantaggi di questo metodo di prova. Dopo aver effettuato la prova, si toglie il pattino dal banco, si chiude l'aria compressa e si smonta dal disco.

CAPITOLO IV

METODOLOGIA

Per effettuare le prove descritte si utilizzano due banchi prova, uno presente nel laboratorio IBIS del Dipartimento di Meccanica nel Politecnico di Torino e l'altro presente nella ditta Mager s.r.l. I banchi sono in grado di svolgere una prova denominata "caratteristica statica" che permette di determinare il carico sopportabile, la rigidità statica e il consumo di aria compressa al variare dell'altezza del meato d'aria.

Sono stati provati due procedure, una di queste due procedura utilizzata per la ditta Mager e l'altra procedura usata per il Politecnico di Torino. L'analisi dei risultati prevede per prima la valutazione dell'efficacia delle procedure. Si esaminano poi le prove separandole per pattino scegliendo le prove migliori che verranno utilizzate per determinare le prestazioni e come prove campione per i confronti.

Le due procedure in forma grafica utilizzate nel laboratorio del Politecnico di Torino e per la ditta Mager, sono i seguenti:

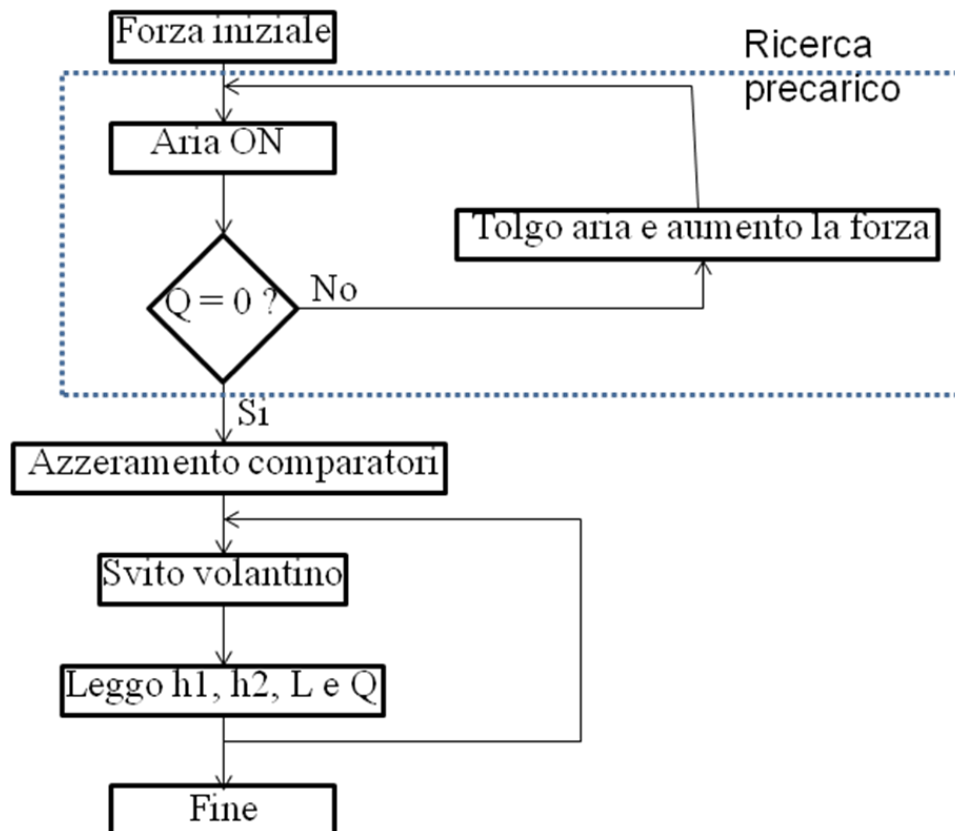


Figura 48: Procedura utilizzata nel Laboratorio IBIS del Politecnico di Torino

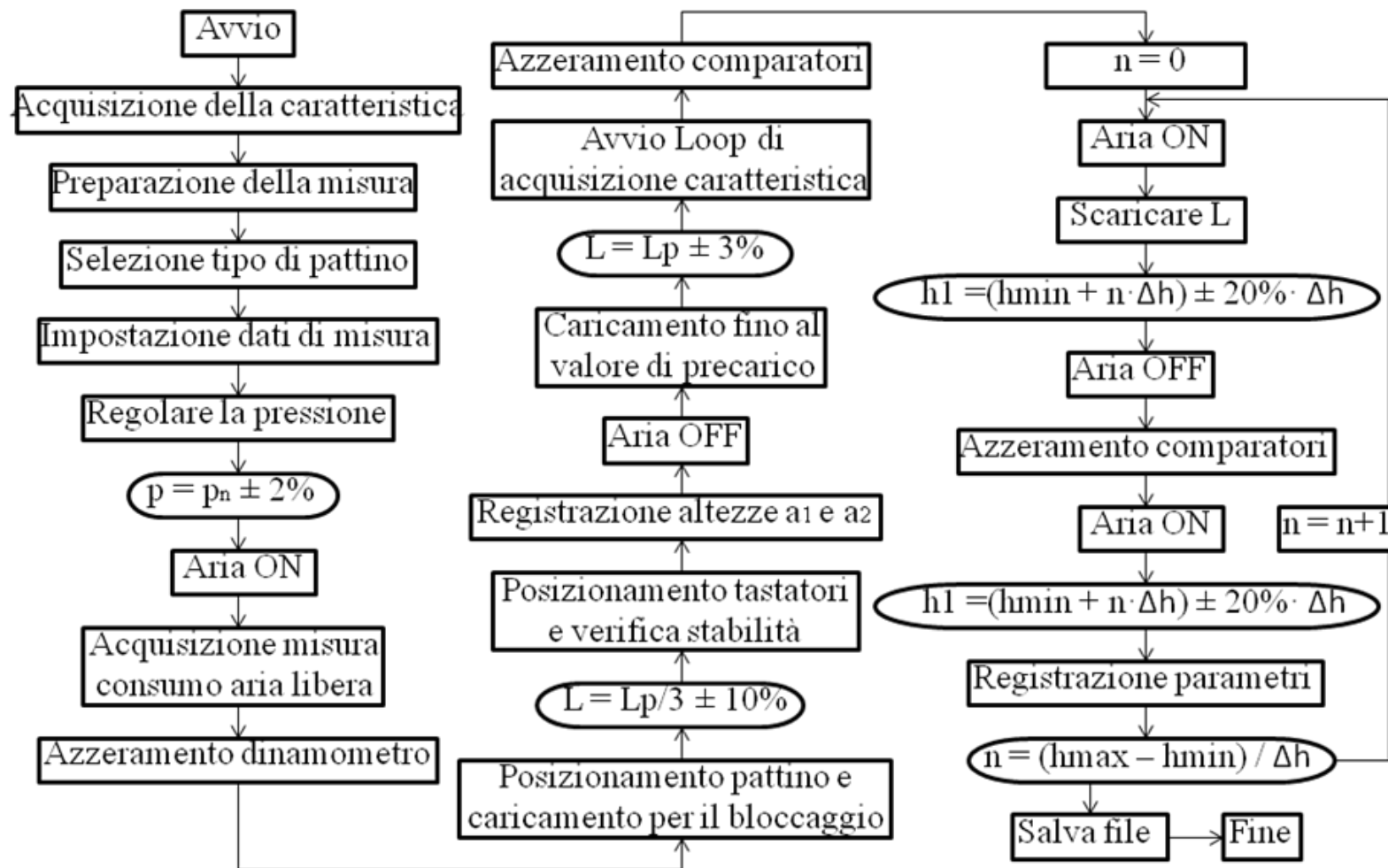


Figura 49: Procedura utilizzata nella ditta Mager s.r.l.

Inoltre, per effettuare le prove si hanno dovuto utilizzare varie posizioni diverse per il comparatore 1 e così ottenere tutti i dati necessari per fare il confronto tra i due banchi di prova.

Sono state utilizzate tre posizioni nei due laboratori, una di queste tre posizioni il comparatore 1 è messo nella parte superiore centrale (molto vicino al puntale) dei pattini, mentre il comparatore 2 è messo nel bordo del pattino, e così ottenere il sollevamento o abbassamento di queste due parte dei pattini dovuto alla forza introdotta, come si mostra in figura 50.

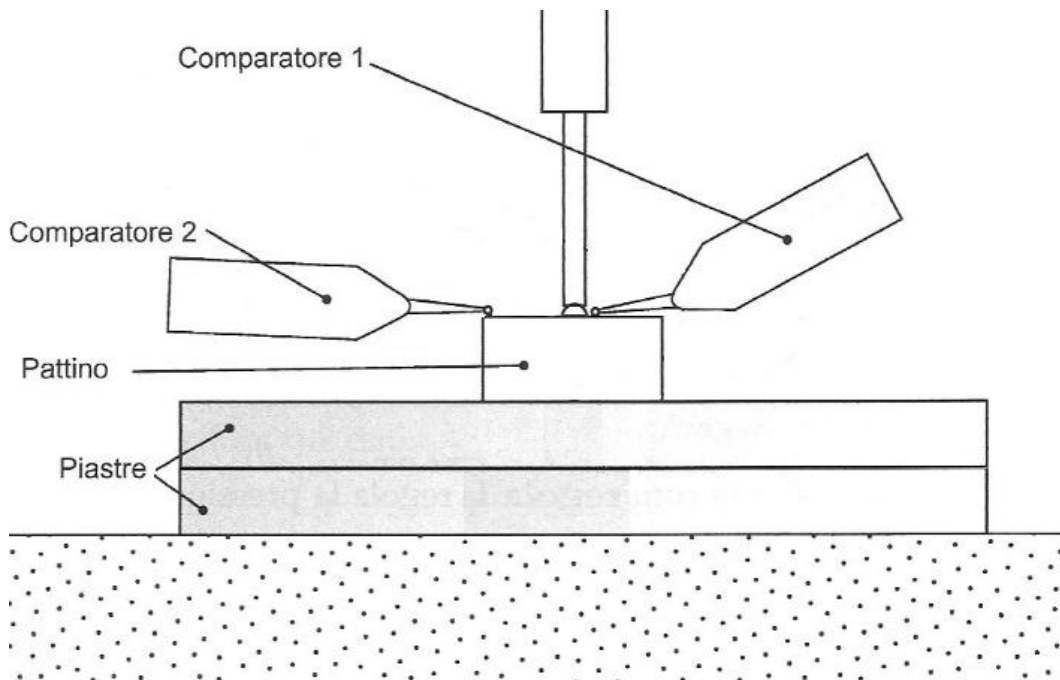


Figura 50: Prima posizione dei comparatori 1 e 2

Nella seconda posizione di studio il comparatore 1 è messo sopra la piastra superiore, per determinare qualsiasi cambio nella piattaforma (sollevamento o abbassamento della piastra), ma il comparatore è messo vicino al centro della parte più lunga del pattino, mentre il comparatore 2 rimane nella stessa posizione visto nella prima posizione studiata, osservare figura 51.

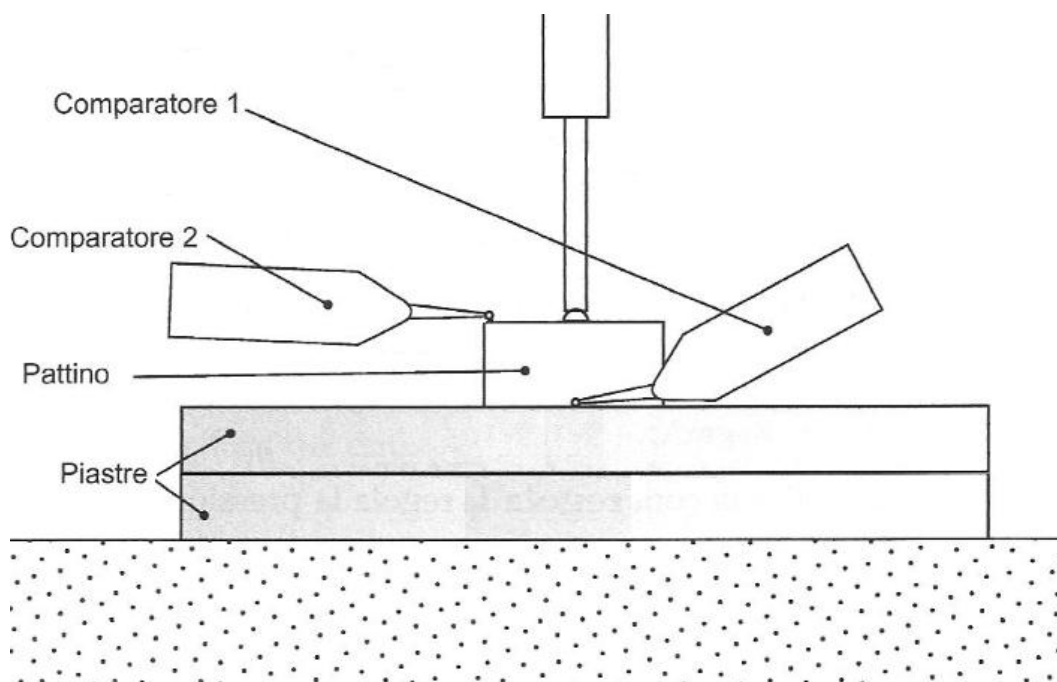


Figura 51: Seconda posizione dei comparatori 1 e 2

Per ultimo, nella terza posizione di studio il comparatore 1 e 2 sono messi anche nella piastra superiore come nella seconda posizione, ma in questo caso il comparatore 1 è messo vicino al centro della parte più corta del pattino, come si vede in figura 52.

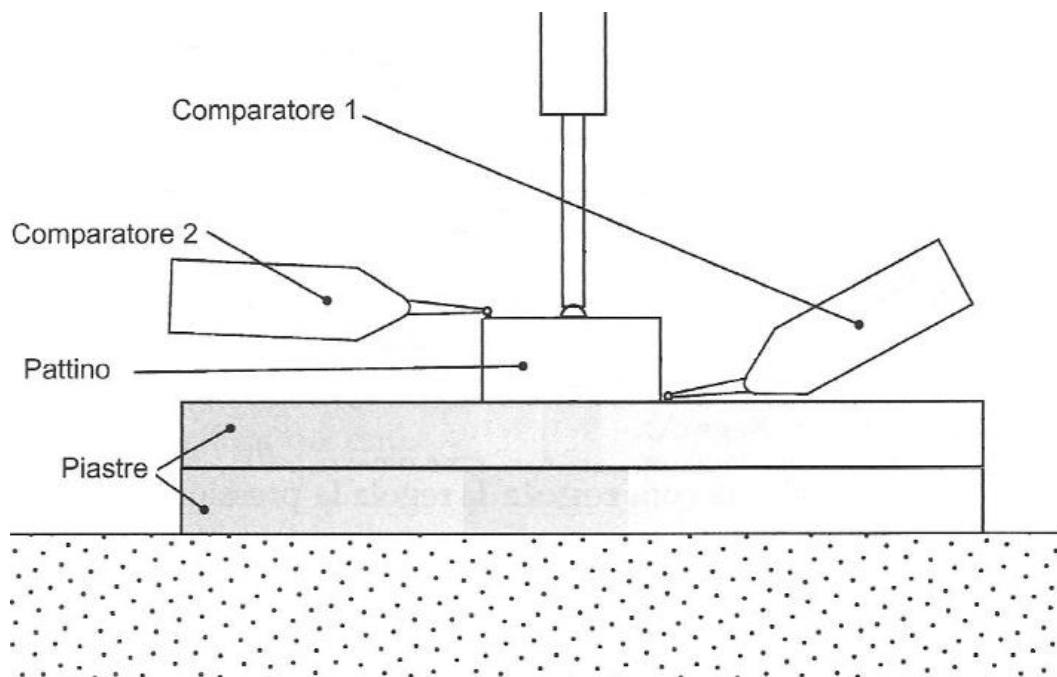


Figura 52: Terza posizione dei comparatori 1 e 2

CAPITOLO V

PATTINI

In questo capitolo si intende descrivere i pattini utilizzati nelle prove. Si analizzeranno le caratteristiche dimensionali. Si sono esaminati tre pattini della ditta Mager s.r.l.

5.1. Caratteristiche



Figura 53: Pattino DEA GLB-1H



Figura 54: Pattino PR2.6



Figura 55: Pattino DEA R2.1

In tabella 2 sono indicate le caratteristiche principali dei tre pattini.




Pattini			
Cod_mager	WF010100311000	WF010100007000	WF010100151000
Denominazione	pattino DEA GLB-1H	pattino PR2.6	pattino DEA R2.1 30 x 68 x 12
Materiale	lega Al6082	lega Al6082	acciaio AISI 420
Larghezza [mm]	76,2	40	30
Lunghezza [mm]	115	90	68
Spessore [mm]	25	14	12
Area [cm²]	87,63	36	20,4
Forza [Kgf]	350,52	144	81,6
Forza [N]	3437,44	1412,16	800,23

Tabella 2: Caratteristiche dei pattini

CAPITOLO VI

ANALISI DELLE RILEVAZIONI

Lo studio delle rilevazione è importante per capire le differenze delle 2 macchine a livello di impostazione di progetto (architetture, materiali, strumenti di misura, sistemi di generazione del carico, ecc.) e capire anche il comportamento del pattino e i fenomeni fisici collegati. Si analizzeranno le curve e si cercherà di interpretare il significato degli andamenti. Successivamente si confronteranno le misure di set di pattini pneumostatici, a parità di misurando, le prestazioni rilevate dai 2 banchi, facendo una correzione della portata per ogni prova realizzata ai pattini nella Mager, dovuto alla non taratura degli strumenti di misura e quindi ottenere le differenze delle prove.

6.1. SIGNIFICATO DELLE RILEVAZIONI

In questo paragrafo si analizza ogni tipo di rilevazione, commentandone il significato e presentandone le peculiarità.

6.1.1. Analisi della curva di forza e di rigidezza

In figura 56 è rappresentato un grafico tipico di forza e di rigidezza e grazie ai metodi è stato possibile indagare anche il comportamento dei pattini nell'intorno dei meati ridotti e agli altri meati con maggiore precisione. Si presentano le caratteristiche ritenute rilevanti:

- Caratteristica di portanza: è la caratteristica di funzionamento del pattino quando vi è flusso di aria nel meato.
- Punto di flesso: il flesso sulla curva di portanza identifica il massimo valore di rigidezza del patino (individuabile sulla curva di rigidezza allo stesso valore di altezza di meato), è il punto di lavoro ideale per il pattino.
- Punto di contatto: è il punto che si raggiunge l'altezza di meato di 0 μm , è presente un punto angoloso in cui vi è il cambiamento di pendenza fra la caratteristica con flusso di aria e senza flusso di aria.
- Caratteristica di contatto: per valori di altezza inferiori allo zero non si ha più flusso d'aria dagli ugelli e le due superfici sono a contatto, si misura solamente il cedimento elastico del corpo del pattino.
- Variabilità della rigidezza: essendo la rigidezza la derivata della forza rispetto al meato, un piccolo intervallo di rilevazione (come in questo

caso) genera una elevata oscillazione dei valori se si utilizza una formula di derivazione a tre punti; utilizzando la relazione a quattro punti fornita da Mager, l'oscillazione si riduce molto anche se non scompare del tutto.

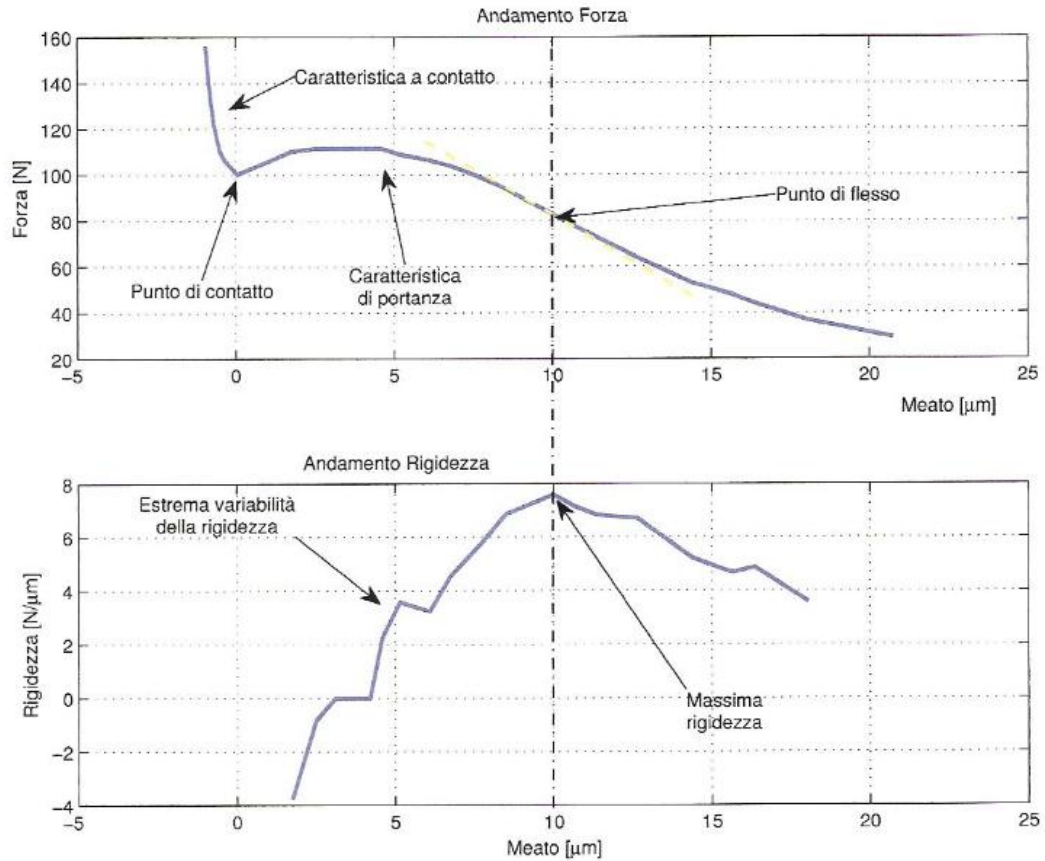


Figure 56: Caratteristiche peculiari della curva di forza e di rigidezza

6.1.2. Analisi della curva di portata

Nella figura 57 è mostrata una rilevazione tipica di portata. Si notano alcune caratteristiche singolari:

- **Minimo di portata:** da valori di meato negativi fino al valore 0, la portata è nulla; in alcuni pattini il valore di portata non scende al di sotto di un valore minimo a causa di imperfetta tenuta dal raccordo di alimentazione o non completo contatto della superficie del pattino.
- **Prima pendenza:** per bassi meati la pendenza della curva di portata cresce fino ad assestarsi su un tratto retto.
- **Cambio di pendenza:** al meato di rigidezza massima si nota un cambio netto di pendenza con un piccolo tratto di curva di raccordo. Tale caratteristica si nota per tutti i pattini.

- Seconda pendenza: per meati elevati la curva di portata si posiziona su un tratto retto a pendenza minore del primo.

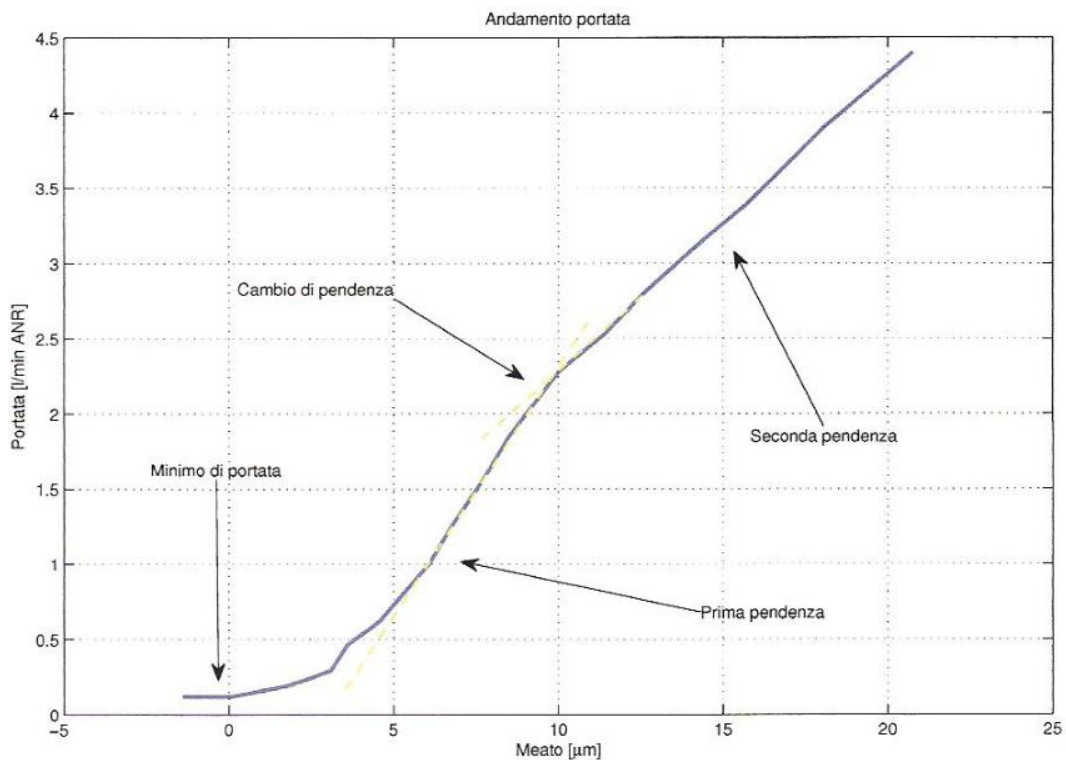


Figura 57: Caratteristiche peculiari della curva di portata

6.2. ANALISI PRELIMINARE DELLE DIFFERENZE DELLE 2 MACCHINE A LIVELLO DI IMPOSTAZIONE DI PROGETTO (ARCHITETTURA, MATERIALI, STRUMENTI DI MISURA, SISTEMI DI GENERAZIONE DEL CARICO, ECC.)

In tabella 3 si mostra le caratteristiche e differenze delle 2 macchine o banchi prova a livello di impostazione di progetto, cioè a livello di architettura, materiali, strumenti di misura, sistemi di generazione del carico, ecc.).

Caratteristiche	MP MAGER	MP POLITO
Telaio	Acciaio elettrosaldato	Base in profilo di alluminio commerciale
Piastra di appoggio o base	Piastra in AISI 420	Base in granito con sopra tre piastre in acciaio

Montante e traversa	Ferro C40 verniciato	A stella in lega alluminio
Azionamento per la generazione carico	Castello con motoriduttore SUMER S.A. France Codice: C D22 L V1 P3 4C Tipo: NPB0, RAP: 1/30 N°: 31462, OF: 23146	Volantino ad azione manuale
Sistema di guida	Pneumostatico con cella di carico tra motore e guida	Con cella di carico nella parte inferiore della guida e contatto diretto con il pattino
Cella di carico	DS EUROPE, in forma di "S" Modello: 546QDT* Lmax= 1000 kg \equiv 9806,7 N Tensione e compressione SN: 107621, Serie: AN 401 Codice: 99000326107621 Precisione: 0,36% Data ultima TARATURA: mai tarato dopo acquisto	FUTEK, rettangolare Modello: LRF350 Lmax= 4450 N Tensione e compressione Materiale - 17-4 PH SS Sensibilità: 2 mV/V Precisione: 1,63% Data ultima TARATURA: mai tarato dopo acquisto
Supporto Tastatori	F.lli BORLETTI, N°: 325676 Base magnética	Mitutoyo Codice: 7011SN
Comparatori elettronici	Mahr, Millitron M256 Sensibilità: 0,1 μ m Campo di misura: 1,5 mm e \pm 30 μ m	Mahr, Millimar C 1208-M Sensibilità: 0,1 μ m Campo di misura: 1,5 mm e \pm 30 μ m
Trasduttore portata d'aria	Trasduttore massico a filo caldo BROOKS Modello:5860S/BC1BA0BA0AA1B1 Serial: T12323/001 Range / fluid: 0-25 l/min ANR con visualizzatore digitale ERO ELECTRONIC, M279 Per lettura diretta consumo in l/min ANR Precisione: 1,56% Data ultima TARATURA: mai tarato dopo acquisto	Flussimetro a galleggiante, L6.3/250 13584 PRT-043, N°:1543 Range = 10 - 220 mm Trasduttore volumetrico Programma in MATLAB per conversione lettura in mm a l/min ANR, necessita dei seguenti dati di INPUT: lettura in mm, pressione relativa e temperatura Precisione: 8,06% Data ultima TARATURA: 15/02/2006

Tabella 3: Differenze fra le due macchine a livello di impostazione di progetto

6.3. CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI RILEVATE DAI 2 BANCHI

I pattini pneumostatici sono stati utilizzati per confrontare le misure, a parità di misurando, le prestazioni rilevate dai 2 banchi e quindi ottenere delle differenze.

Di seguito sono riportati i dati ottenuti delle prove realizzati nella Mager (con la procedura della Mager) e nel laboratorio del Politecnico di Torino (con la procedura della Mager e con la procedura del Politecnico), per ogni pattino:

- **Pattino DEA GLB-1H**

N	h1 [μm]	h2 [μm]	pcorr [bar]	Qcorr [Nl/min]	Lcorr [Kgf]	L final [N]	Q final [Nl/min]
0	2,04	3,70	4,08	0,50	262,78	2576,99	1,41
1	2,88	4,27	4,10	0,71	253,09	2481,97	1,62
2	3,87	5,08	4,10	1,05	238,30	2336,98	1,95
3	4,86	5,76	4,09	1,36	221,34	2170,57	2,27
4	5,86	6,44	4,09	1,66	201,90	1979,93	2,57
5	6,88	7,14	4,08	1,95	182,51	1789,79	2,86
6	7,86	7,92	4,08	2,21	163,68	1605,16	3,11
7	8,86	8,78	4,08	2,43	145,80	1429,82	3,34
8	9,88	9,63	4,10	2,68	128,63	1261,41	3,58
9	10,85	10,49	4,10	2,83	113,51	1113,12	3,74
10	11,86	11,47	4,09	2,97	99,70	977,74	3,88
11	12,86	12,36	4,09	3,07	87,29	856,06	3,98
12	13,87	13,32	4,09	3,17	76,02	745,54	4,08
13	14,87	14,26	4,09	3,20	65,96	646,83	4,11
14	15,90	15,31	4,08	3,23	57,47	563,59	4,13
15	16,89	16,32	4,09	3,21	49,54	485,82	4,11

Tabella 4: Risultati ottenuto nella Mager

L [N]	Yp1 [μm]	Yp2 [μm]	Yb1 [μm]	Yb2 [μm]	h1 [μm]	h2 [μm]
2370,58	3,9	4,0	0,3	0	3,6	4,0
2201,10	5,6	4,8	0,4	0	5,2	4,8
2068,55	6,8	4,8	0,4	0	6,4	4,8
1868,65	7,1	5,6	0,5	0	6,6	5,6
1649,19	8,1	6,4	0,6	0	7,5	6,4
1497,09	9,1	7,7	0,6	0	8,5	7,7
1308,06	9,8	9,1	0,6	0	9,2	9,1
1119,02	9,8	10,2	0,7	0	9,1	10,2
938,67	11,4	11,1	0,8	0	10,6	11,1
743,12	12,3	12,7	1,0	0	11,3	12,7
556,25	15,2	14,9	1,2	0	14,0	14,9
347,66	16,4	17,5	1,3	0	15,1	17,5

Tabella 5: Risultati ottenuto nel Politecnico di Torino con la procedura Mager

L [N]	Yp1 [μm]	Yp2 [μm]	Yb1 [μm]	Yb2 [μm]	h1 [μm]	h2 [μm]	Q [mm]	Q [NI/min]
2474,88	4,4	2	0,2	0	4,2	2	15	0,21
2416,21	5,6	3	0,2	0	5,4	3	21	0,64
2231,52	7,1	4	0,3	0	6,8	4	32	1,42
1953,39	8,5	5	0,4	0	8,1	5	41	1,95
1849,10	10,2	6	0,6	0	9,6	6	46	2,23
1566,80	11,9	7	0,6	0	11,3	7	54	2,73
1403,66	12,4	8	0,6	0	11,8	8	59	3,06
1105,98	15,2	9	0,6	0	14,6	9	67	3,59
934,33	17,3	10	0,7	0	16,6	10	70	3,78
795,26	19,1	11	0,8	0	18,3	11	73	3,98
688,79	19,8	12	0,9	0	18,9	12	74	4,04
656,20	20,2	13	1,0	0	19,2	13	74	4,04
560,60	21,6	14	1,1	0	20,5	14	75	4,11
480,20	24,3	15	1,2	0	23,1	15	75	4,11
441,09	25,2	16	1,3	0	23,9	16	75	4,11
399,63	25,6	17	1,3	0	24,3	17	75	4,11

Tabella 6: Risultati ottenuto nel Politecnico con la procedura del Politecnico

- Pattino PR2.6

n	h1 [μm]	h2 [μm]	pcorr [bar]	Qcorr [NI/min]	Lcorr [Kgf]	L final [N]	Q final [NI/min]
0	1,86	2,70	4,06	0,30	99,28	973,62	2,17
1	2,90	3,74	4,05	0,51	96,67	948,04	2,39
2	3,88	4,75	4,05	0,69	93,99	921,72	2,56
3	4,89	5,66	4,05	0,98	90,11	883,71	2,85
4	5,87	6,46	4,05	1,32	85,16	835,10	3,20
5	6,88	7,27	4,07	1,70	79,44	779,06	3,57
6	7,89	8,05	4,07	2,07	73,31	718,97	3,95
7	8,89	8,88	4,06	2,46	67,62	663,10	4,34
8	9,88	9,67	4,05	2,80	62,18	609,74	4,68
9	10,87	10,47	4,05	3,16	57,31	562,07	5,04
10	11,89	11,37	4,04	3,49	52,27	512,64	5,37
11	12,92	12,25	4,03	3,78	47,51	465,89	5,65
12	13,88	13,10	4,02	4,02	43,34	425,02	5,89
13	14,87	14,12	4,03	4,30	39,06	383,00	6,18
14	15,87	15,17	4,03	4,45	34,85	341,76	6,32
15	16,92	16,25	4,02	4,63	30,58	299,90	6,51

Tabella 7: Risultati ottenuto nella Mager

L [N]	Yp1 [μm]	Yp2 [μm]	Yb1 [μm]	Yb2 [μm]	h1 [μm]	h2 [μm]	Q [mm]	Q [NI/min]
903,91	4,4	4,8	0,6	0,4	3,8	4,4	25	0,93
830,03	5,6	6,0	0,6	0,4	5,0	5,6	38	1,78
751,81	7,2	7,2	1,0	0,5	6,2	6,7	49	2,42
667,07	9,0	8,5	1,1	0,6	8,0	8,0	61	3,19
591,02	10,5	9,4	1,2	0,6	9,4	8,8	73	3,98
510,62	10,8	11,0	1,5	0,6	9,3	10,4	84	4,76
419,36	13,4	12,7	1,8	0,9	11,6	11,8	95	5,55
319,41	15,2	14,8	2,1	1,0	13,1	13,8	106	6,30
219,46	17,7	18,1	2,9	1,0	14,8	17,1	109	6,50

Tabella 8: Risultati ottenuto nel Politecnico di Torino con la procedura Mager

L [N]	Yp1 [μm]	Yp2 [μm]	Yb1 [μm]	Yb2 [μm]	h1 [μm]	h2 [μm]	Q [mm]	Q [NI/min]
945,19	4,4	3	0,0	0,2	4,4	2,8	13	0,07
914,77	5,2	4	0,0	0,3	5,2	3,7	22	0,71
871,31	6,0	5	0,6	0,4	5,4	4,6	30	1,29
825,68	7,1	6	0,6	0,4	6,5	5,6	37	1,72
751,81	8,9	7	1,0	0,5	7,9	6,5	49	2,42
690,97	10,1	8	1,0	0,5	9,1	7,5	57	2,92
630,13	11,7	9	1,1	0,6	10,6	8,4	68	3,65
569,29	13,0	10	1,2	0,6	11,8	9,4	77	4,25
499,76	14,4	11	1,5	0,6	12,9	10,4	85	4,83
456,30	16,3	12	1,7	0,9	14,6	11,1	92	5,34
404,15	17,5	13	1,9	0,9	15,6	12,1	98	5,76
358,52	19,3	14	1,9	1,0	17,4	13,0	103	6,10
319,41	21,0	15	2,1	1,0	18,9	14,0	106	6,30
280,30	21,7	16	2,7	1,0	19,0	15,0	107	6,37
249,88	23,2	17	2,7	1,0	20,5	16,0	108	6,43
228,15	24,3	18	2,9	1,0	21,4	17,0	109	6,50
208,59	25,9	19	3,1	1,3	22,8	17,7	109	6,50
186,87	26,8	20	3,5	1,4	23,3	18,6	109	6,50

Tabella 9: Risultati ottenuto nel Politecnico con la procedura del Politecnico

• **Pattino DEA R2.1**

n	h1 [μm]	h2 [μm]	pcorr [bar]	Qcorr [NI/min]	Lcorr [Kgf]	L final [N]	Q final [NI/min]
0	1,87	0,87	4,08	0,62	53,47	524,39	1,53
1	2,88	2,49	4,06	0,85	47,06	461,50	1,75
2	3,90	3,83	4,06	1,12	41,66	408,50	2,03
3	4,91	4,89	4,05	1,42	37,13	364,14	2,33
4	5,86	5,83	4,05	1,71	33,38	327,32	2,61
5	6,96	6,89	4,05	2,03	29,53	289,58	2,93
6	7,91	7,85	4,04	2,26	26,57	260,60	3,16
7	8,94	8,86	4,04	2,48	23,47	230,16	3,39
8	9,94	9,85	4,04	2,74	20,67	202,68	3,65
9	10,93	10,74	4,04	2,86	18,35	179,98	3,77
10	11,99	11,75	4,03	2,95	16,03	157,20	3,86
11	12,93	12,55	4,04	2,97	14,18	139,03	3,88
12	13,85	13,41	4,04	3,13	12,61	123,64	4,03
13	14,87	14,47	4,04	3,17	10,96	107,47	4,07
14	15,86	15,46	4,04	3,16	9,31	91,30	4,06
15	16,99	16,47	4,04	3,16	8,06	79,02	4,07

Tabella 10: Risultati ottenuto nella Mager

L [N]	Yp1 [μm]	Yp2 [μm]	Yb1 [μm]	Yb2 [μm]	h1 [μm]	h2 [μm]	Q [mm]	Q [NI/min]
488,89	4,0	3,7	0,6	0,0	3,4	3,7	18	0,43
445,44	4,7	4,8	0,6	0,0	4,1	4,8	29	1,22
408,50	5,1	5,9	0,6	0,0	4,5	5,9	34	1,54
373,73	6,4	6,6	0,7	0,1	5,7	6,5	40	1,89
330,27	6,7	7,5	1,0	0,1	5,7	7,4	46	2,23
291,16	7,7	8,3	1,2	0,1	6,5	8,2	54	2,73
245,53	9,2	9,9	1,5	0,2	7,7	9,7	62	3,26
86,91	18,1	19,5	2,7	0,8	15,5	18,7	75	4,11

Tabella 11: Risultati ottenuto nel Politecnico di Torino con la procedura Mager

L [N]	Yp1 [μm]	Yp2 [μm]	Yb1 [μm]	Yb2 [μm]	h1 [μm]	h2 [μm]	Q [mm]	Q [NI/min]
528,00	6,1	4	0,6	0,0	5,5	4,0	15	0,21
482,37	7,3	5	0,6	0,0	6,7	5,0	23	0,79
447,61	8,2	6	0,6	0,0	7,6	6,0	28	1,15
401,98	9,4	7	0,8	0,1	8,6	6,9	35	1,60
360,69	10,6	8	1,2	0,1	9,4	7,9	42	2,00
319,41	11,4	9	1,2	0,2	10,2	8,8	49	2,42
286,82	12,7	10	1,5	0,2	11,2	9,8	55	2,79
254,22	13,9	11	1,5	0,2	12,4	10,8	60	3,12
225,98	14,9	12	1,7	0,2	13,2	11,8	65	3,46
210,77	16,0	13	1,7	0,3	14,3	12,7	67	3,59
191,21	17,0	14	1,9	0,5	15,1	13,5	70	3,78
173,83	18,0	15	1,9	0,5	16,1	14,5	71	3,85
149,93	19,1	16	2,2	0,6	16,9	15,4	73	3,98
136,89	20,2	17	2,2	0,6	18,0	16,4	74	4,04
117,33	21,5	18	2,5	0,6	19,0	17,4	74	4,04
108,82	22,2	19	2,6	0,8	19,6	18,2	75	4,11
97,78	23,3	20	2,7	0,8	20,6	19,2	75	4,11

Tabella 12: Risultati ottenuto nel Politecnico con la procedura del Politecnico

Ottenuti tutti i risultati visto sopra per ogni pattini e per ogni procedura, si è dovuto realizzare una correzione nella portata per tutte le prove, questo si è dovuto fare già che è stato utilizzato di strumenti di misura non tarati. Queste misure sono realizzate di forma che la portata possa uscire dei fori dei pattini senza nessun ostacolo e variando la pressione di alimentazione di 1 a 5 bar, facendo questa procedura nella Mager e nel Politecnico di torino si è stato ottenuto le equazioni caratteristiche della portata in funzione della pressione e finalmente acquisito la differenza di portata necessaria per fare la correzione per ogni pattino utilizzato. Si presentano i dati e le grafici corrispondente per ogni pattino:

- **Pattino DEA GLB-1H**

POLITO			MAGER		Differenza di Q [Nl/min]
Pa [bar]	Q [mm]	Q [Nl/min]	Pa [bar]	Q [Nl/min]	
1	56	2,86	1	1,35	1,51
2	64	3,39	2	2,00	1,39
3	70	3,78	3	2,65	1,13
4	76	4,18	4	3,29	0,89
5	82	4,61	5	3,93	0,68

Tabella 13: Correzione della portata per il pattino DEA GLB-1H

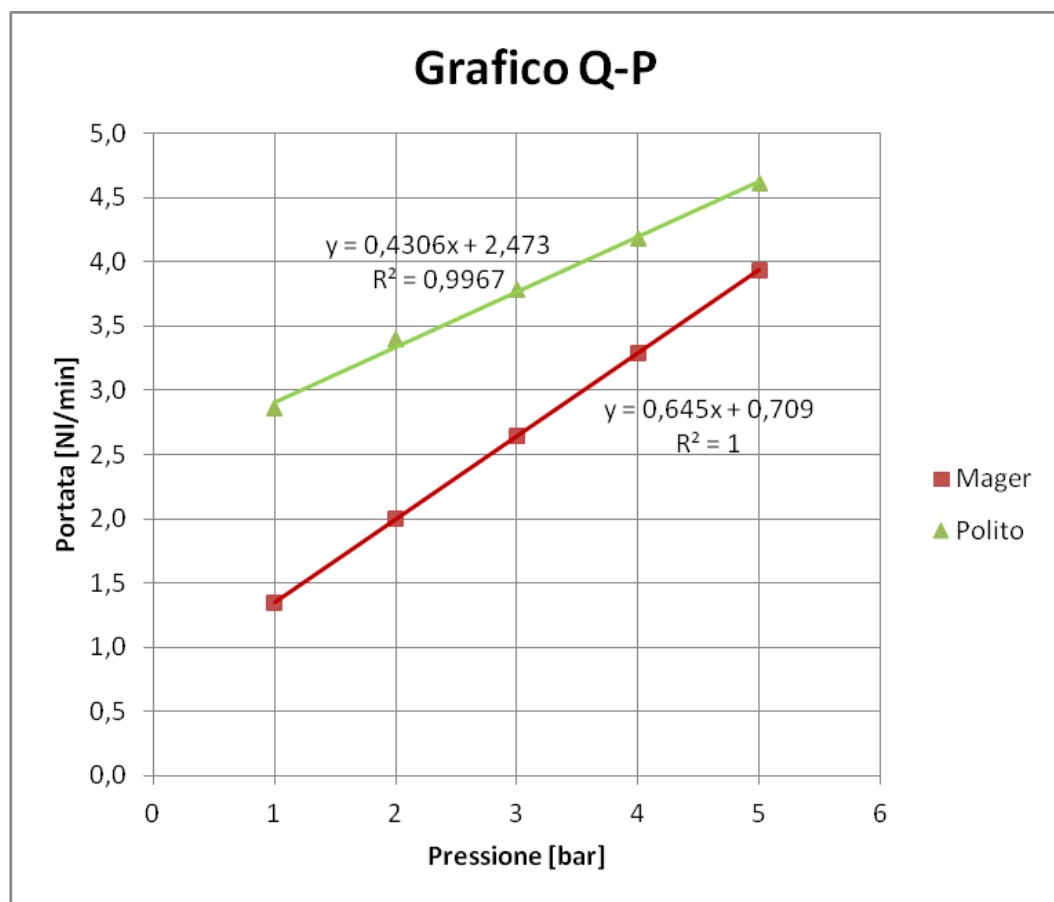


Figura 58: Correzione della portata per il pattino DEA GLB-1H

Per trovare il numero che si deve sommare a ogni valore di portata ottenuti nella tabella 4, si procede a fare la differenza tra le due equazioni acquisite nella figura 58:

$$y_{Polito} - y_{Mager} = (0,4306 \cdot x + 2,473) - (0,645 \cdot x + 0,709)$$

Come in tutte le prove sono state effettuate con un valore di pressione pari a 4 bar, quindi il valore di x è uguale a 4 bar, essendo pari a:

$$y_{Polito} - y_{Mager} = (0,4306 \cdot 4 + 2,473) - (0,645 \cdot 4 + 0,709) = 0,9064 \text{ Nl/min}$$

- **Pattino PR2.6**

POLITO			MAGER		Differenza di Q [Nl/min]
Pa [bar]	Q [mm]	Q [Nl/min]	Pa [bar]	Q [Nl/min]	
1	76	4,18	1	1,94	2,24
2	90	5,19	2	2,93	2,26
3	100	5,89	3	3,88	2,01
4	109	6,50	4	4,85	1,65
4,8	126	7,54	5	5,83	

Tabella 14: Correzione della portata per il pattino PR2.6

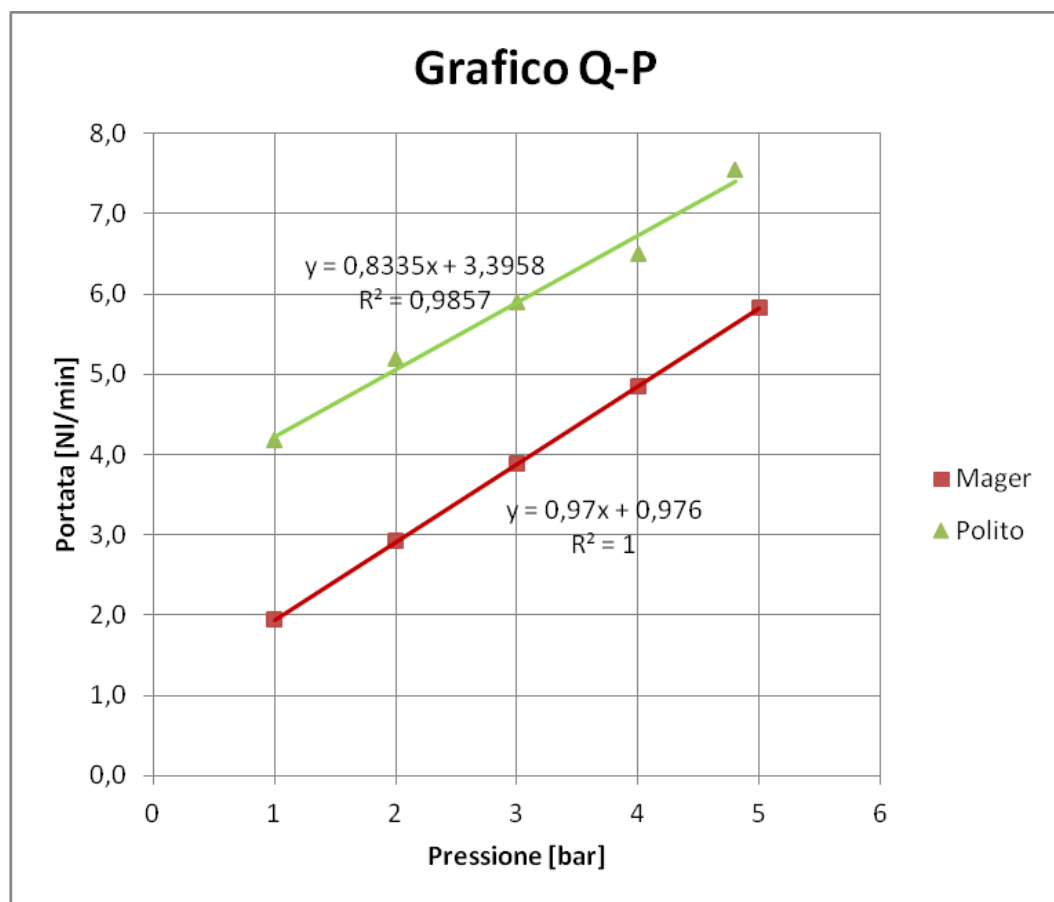


Figura 59: Correzione della portata per il pattino PR2.6

Per trovare il numero che si deve sommare a ogni valore di portata ottenuti nella tabella 7, si procede a fare la differenza tra le due equazioni acquisite nella figura 59:

$$y_{Polito} - y_{Mager} = (0,8335 \cdot x + 3,3958) - (0,97 \cdot x + 0,976)$$

Come in tutte le prove sono state effettuate con un valore di pressione pari a 4 bar, quindi il valore di x è uguale a 4 bar, essendo pari a:

$$y_{Polito} - y_{Mager} = (0,8335 \cdot 4 + 3,3958) - (0,97 \cdot 4 + 0,976) = 1,8738 \text{ Nl/min}$$

- Pattino DEA R2.1

POLITO			MAGER		Differenza di Q [Nl/min]
Pa [bar]	Q [mm]	Q [Nl/min]	Pa [bar]	Q [Nl/min]	
1	55	2,79	1	1,32	1,47
2	63	3,32	2	1,96	1,36
3	70	3,78	3	2,60	1,18
4	75	4,11	4	3,24	0,87
5	81	4,54	5	3,86	0,68

Tabella 15: Correzione della portata per il pattino DEA R2.1

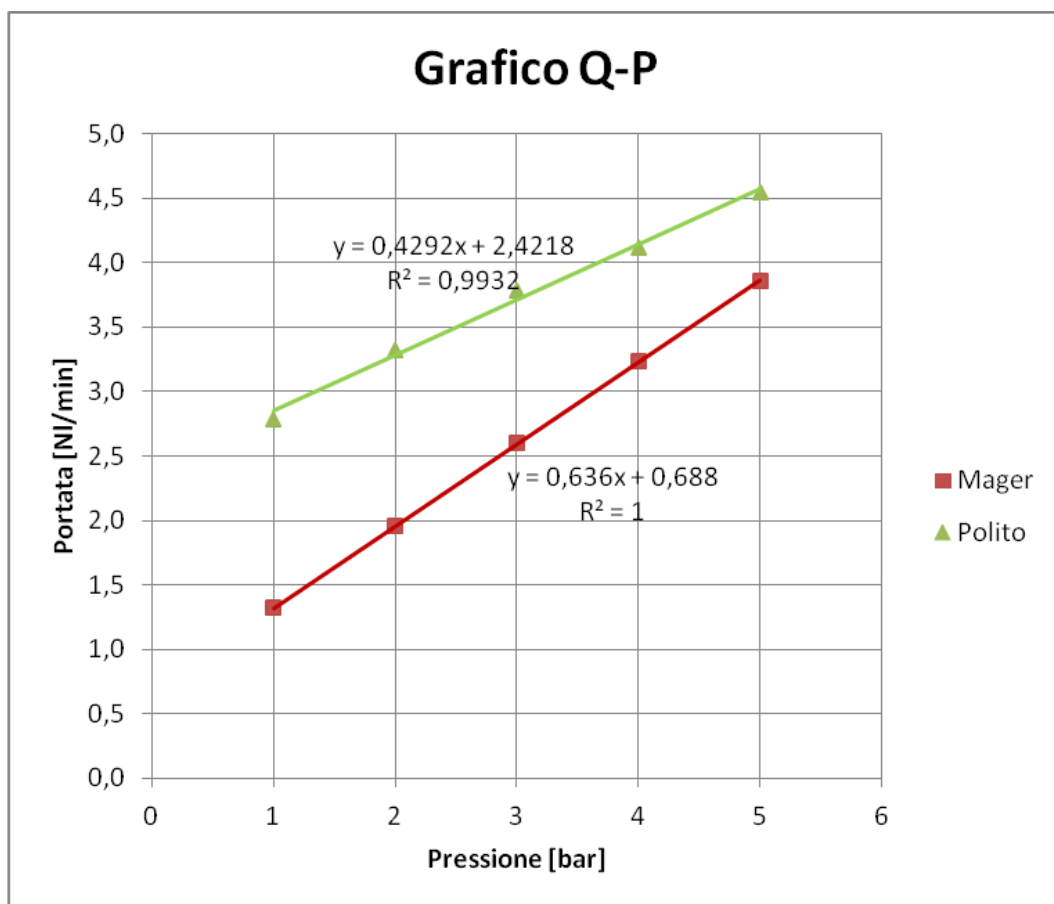


Figura 60: Correzione della portata per il pattino DEA R2.1

Per trovare il numero che si deve sommare a ogni valore di portata ottenuti nella tabella 10, si procede a fare la differenza tra le due equazioni acquisite nella figura 60:

$$y_{Polito} - y_{Mager} = (0,4292 \cdot x + 2,4218) - (0,636 \cdot x + 0,688)$$

Come in tutte le prove sono state effettuate con un valore di pressione pari a 4 bar, quindi il valore di x è uguale a 4 bar, essendo pari a:

$$y_{Polito} - y_{Mager} = (0,4292 \cdot 4 + 2,4218) - (0,636 \cdot 4 + 0,688) = 0,9066 \text{ Nl/min}$$

Dopo di aver finito di fare le correzioni di portate, si procede a confrontare le misure di set di pattini pneumostatici, a parità di misurando e quindi le prestazioni rilevate dai 2 banchi di prove per ogni pattino.

- **Pattino DEA GLB-1H**

Nella figura 61 si mostra delle caratteristiche della forza contro il meato centrale per il pattino DEA GLB-1H, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la stessa procedura nei due laboratori vede più meno gli stessi risultati; mentre che a diverse procedure si mostra delle variazioni considerevole nelle curve ottenute.

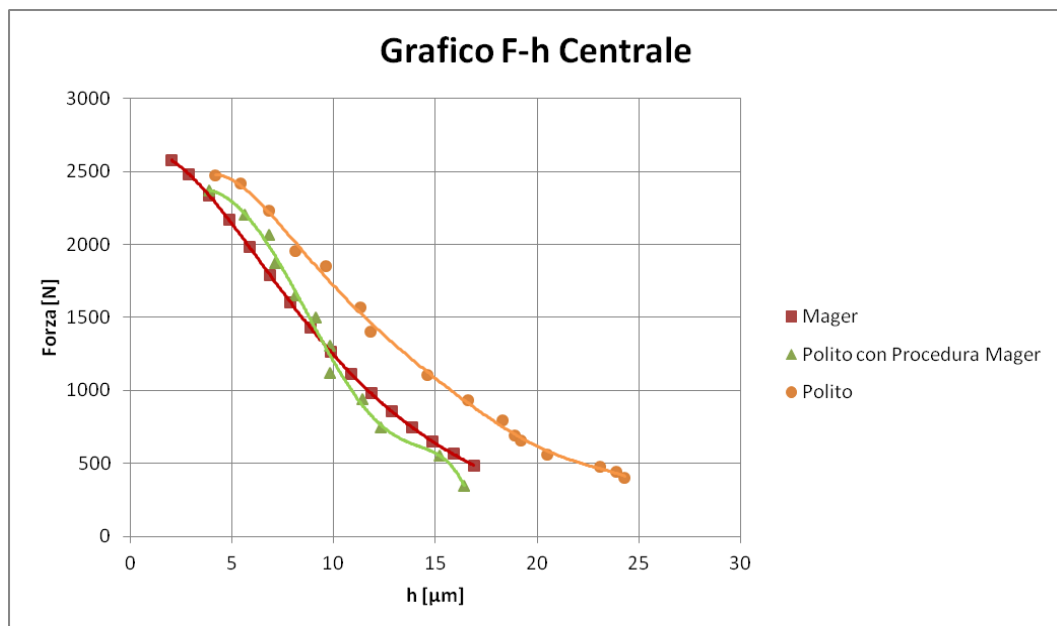


Figura 61: Curve di forze contro meato centrale per il pattino DEA GLB-1H

Nella figura 62 si mostra delle caratteristiche della forza contro il meato nel bordo per il pattino DEA GLB-1H, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la stessa procedura nei due laboratori si vede più meno gli stessi risultati; mentre che a diverse procedure si mostra delle variazioni considerevole nelle curve ottenute.

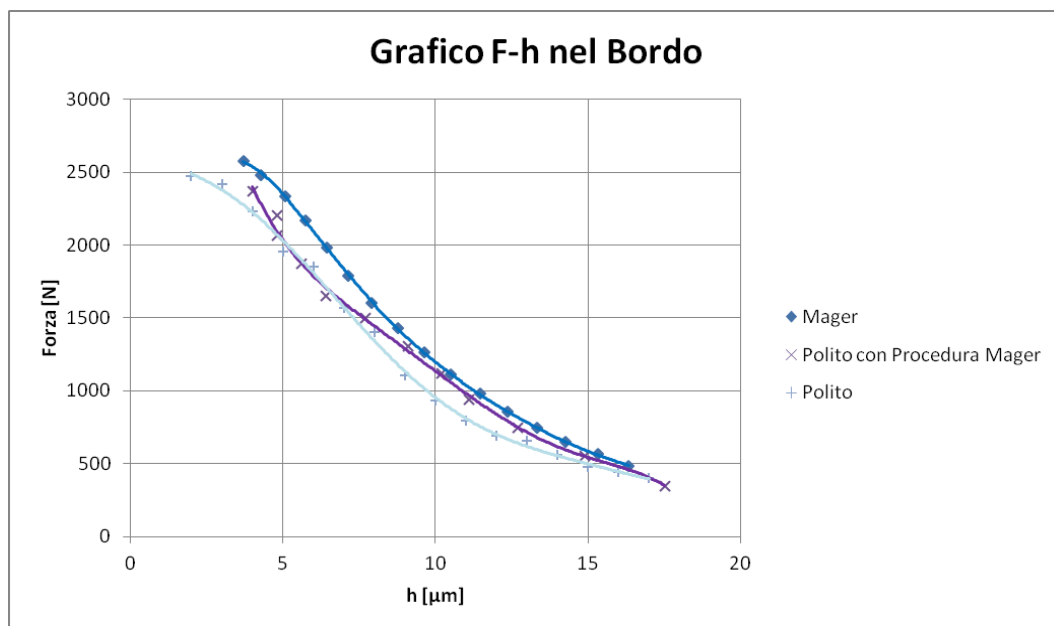


Figura 62: Curve di forze contro meato nel bordo per il pattino DEA GLB-1H

Nella figura 63 si mostra delle caratteristiche della portata contro il meato centrale per il pattino DEA GLB-1H, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la correzione nella portata nei dati presi nella Mager si vede come le curve si stabilizza nello stesso valore massimo di portata.

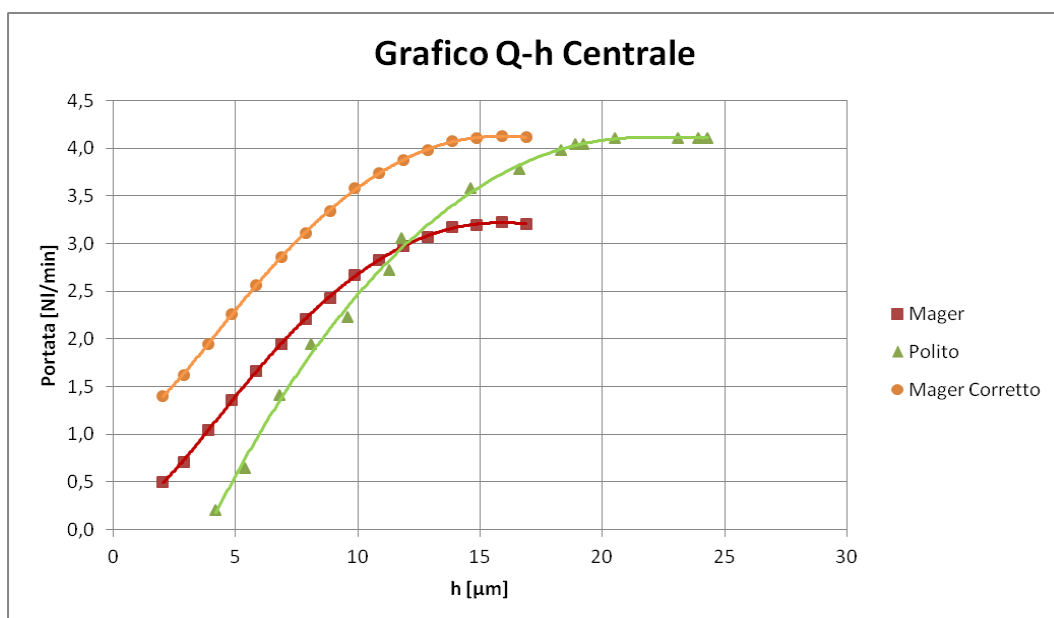


Figura 63: Curve di portate contro meato centrale per il pattino DEA GLB-1H

Nella figura 64 si mostra delle caratteristiche della portata contro il meato nel bordo per il pattino DEA GLB-1H, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la correzione nella portata nei dati presi nella Mager si vede come le curve si stabilizza nello stesso valore massimo di portata e facendo la stessa procedura nei

due laboratori si mostra la stessa curva nei due laboratori come si può vedere nella figura; mentre che a diverse procedure si osserva delle variazioni considerevole nelle curve ottenute.

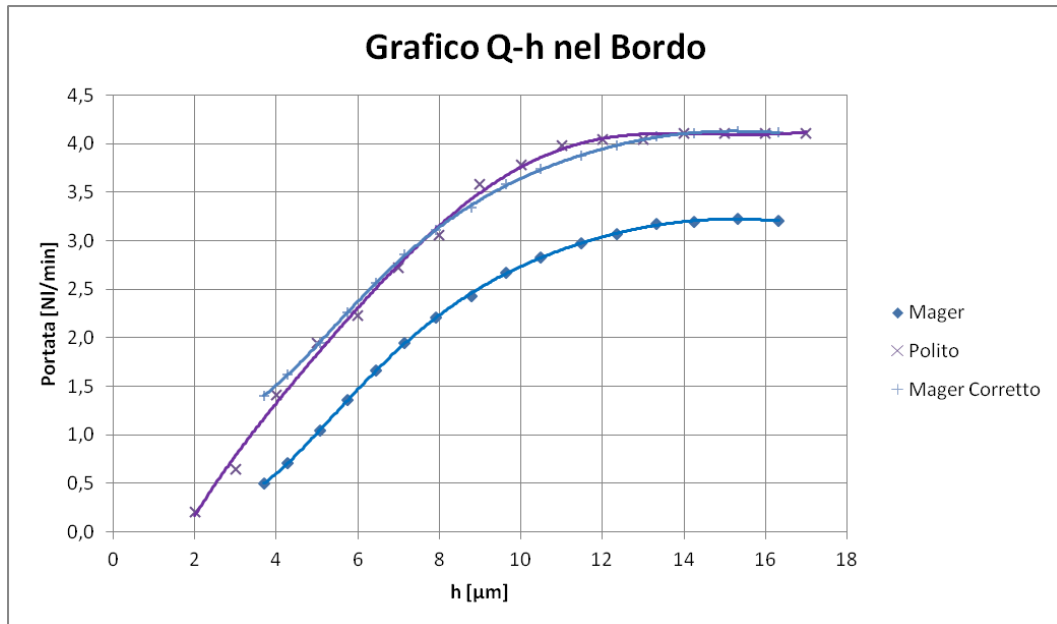


Figura 64: Curve di portate contro meato nel bordo per il pattino DEA GLB-1H

- **Pattino PR2.6**

Nella figura 65 si mostra delle caratteristiche della forza contro il meato centrale per il pattino PR2.6, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la stessa procedura nei due laboratori si vede più meno gli stessi risultati; mentre che a diverse procedure si mostra delle variazioni nelle curve ottenute.

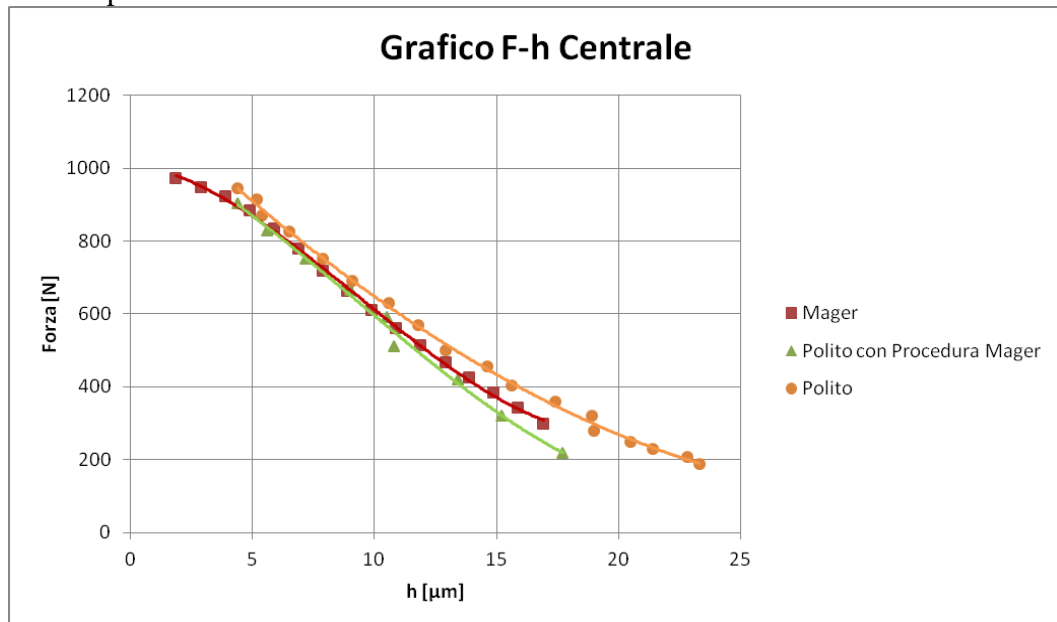


Figura 65: Curve di forze contro meato centrale per il pattino PR2.6

Nella figura 66 si mostra delle caratteristiche della forza contro il meato nel bordo per il pattino PR2.6, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la stessa procedura nei due laboratori si vede più meno gli stessi risultati; mentre che a diverse procedure si mostra delle variazioni considerevole nelle curve ottenute.

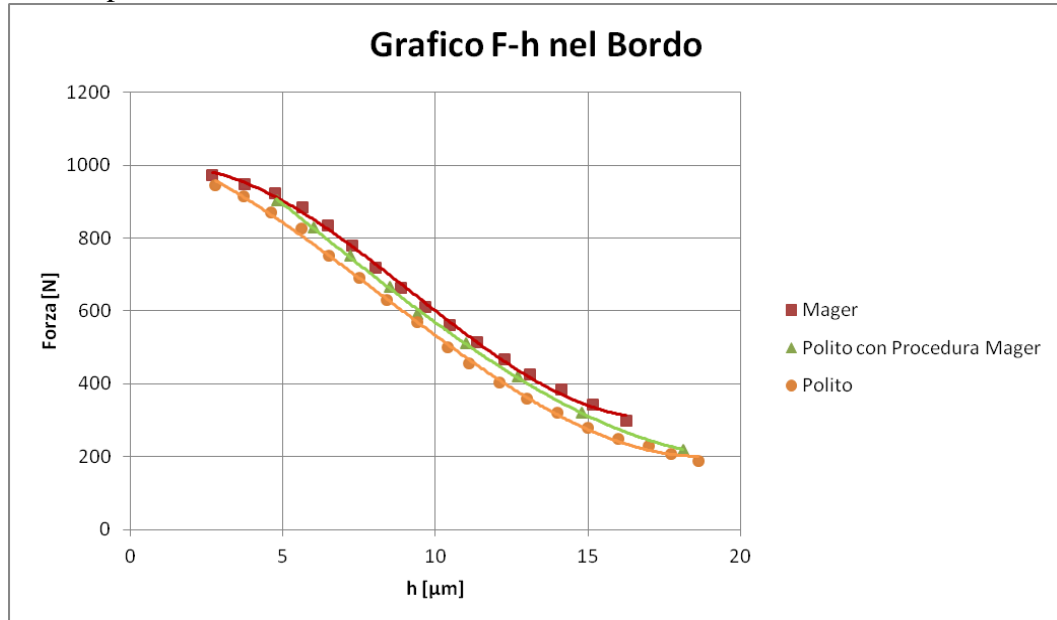


Figura 66: Curve di forze contro meato nel bordo per il pattino PR2.6

Nella figura 67 si mostra delle caratteristiche della portata contro il meato centrale per il pattino PR2.6, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la correzione nella portata nei dati presi nella Mager si vede come le curve si stabilizza nello stesso valore massimo di portata.

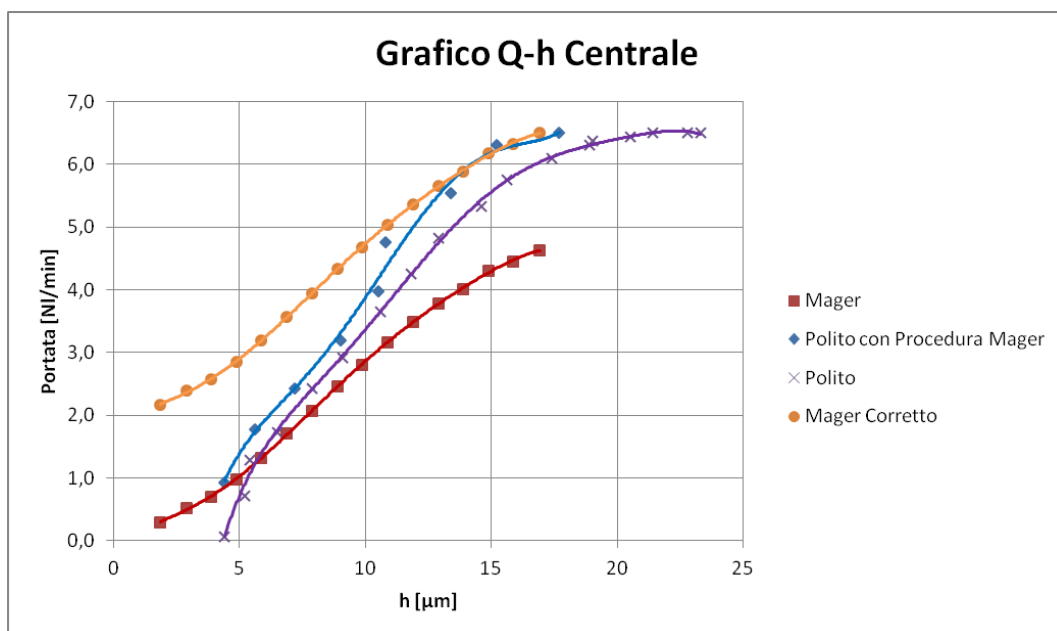


Figura 67: Curve di portate contro meato centrale per il pattino PR2.6

Nella figura 68 si mostra delle caratteristiche della portata contro il meato nel bordo per il pattino PR2.6, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la correzione nella portata nei dati presi nella Mager si vede come le curve si stabilizza nello stesso valore massimo di portata.

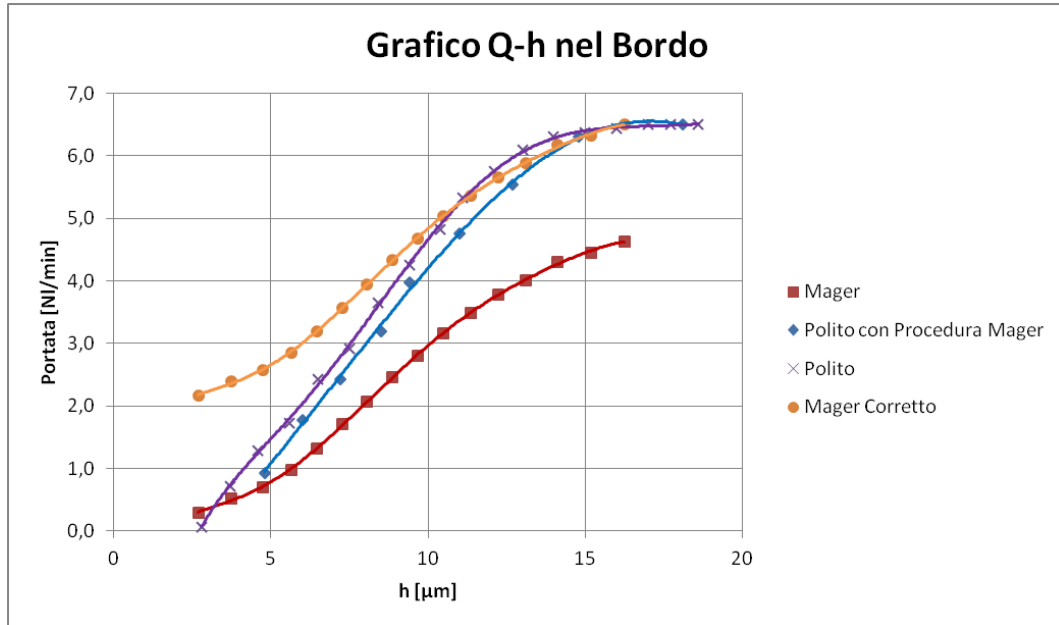


Figura 68: Curve di portate contro meato nel bordo per il pattino PR2.6

- **Pattino DEA R2.1**

Nella figura 69 si mostra delle caratteristiche della forza contro il meato centrale per il pattino DEA R2.1, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la stessa procedura nei due laboratori si vede più meno gli stessi risultati; mentre che a diverse procedure si mostra delle variazioni nelle curve ottenute.

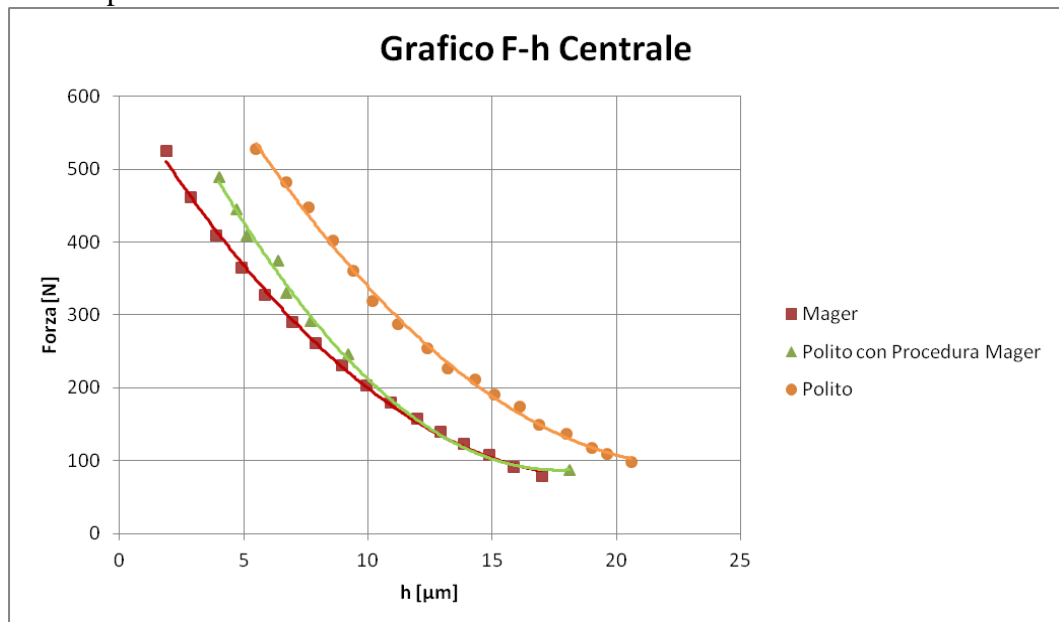


Figura 69: Curve di forze contro meato centrale per il pattino DEA R2.1

Nella figura 70 si mostra delle caratteristiche della forza contro il meato nel bordo per il pattino DEA R2.1, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la stessa procedura nei due laboratori si vede più meno gli stessi risultati; mentre che a diverse procedure si mostra delle variazioni considerevole nelle curve ottenute.

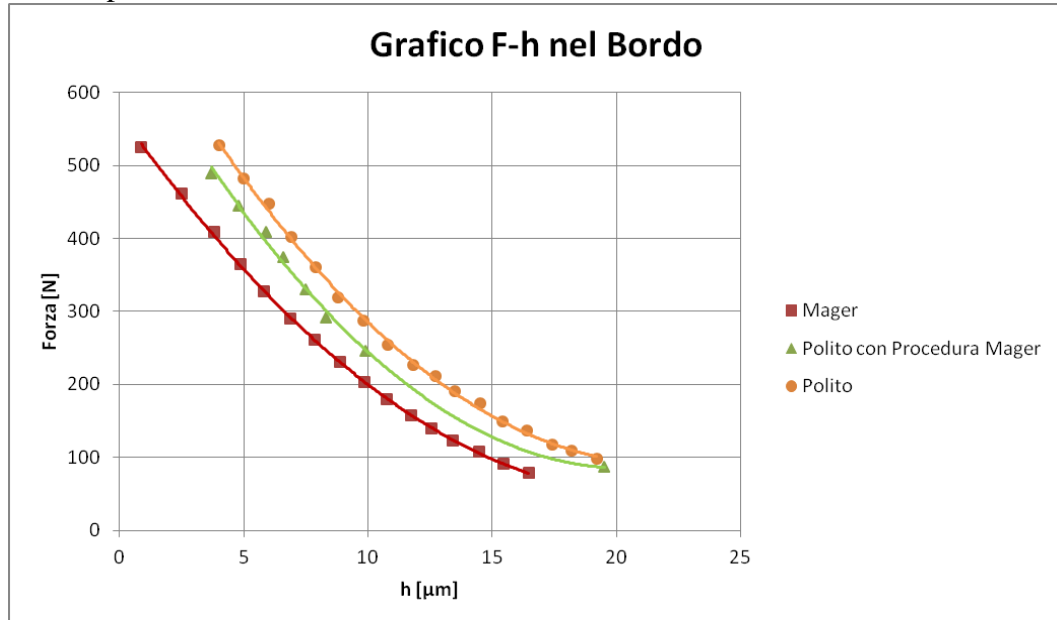


Figura 70: Curve di forze contro meato nel bordo per il pattino DEA R2.1

Nella figura 71 si mostra delle caratteristiche della portata contro il meato centrale per il pattino DEA R2.1, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la correzione nella portata nei dati presi nella Mager si vede come le curve si stabilizza nello stesso valore massimo di portata.

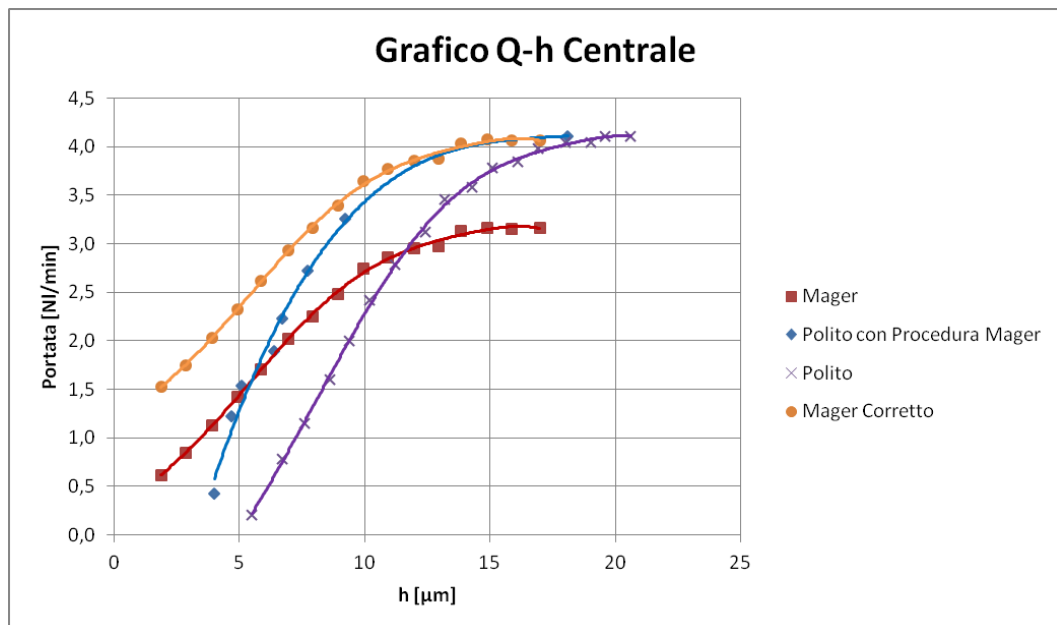


Figura 71: Curve di portate contro meato centrale per il pattino DEA R2.1

Nella figura 72 si mostra delle caratteristiche della portata contro il meato nel bordo per il pattino DEA R2.1, fatto per ogni procedura realizzate nella Mager e nel laboratorio del Politecnico di Torino, che si osserva come facendo la correzione nella portata nei dati presi nella Mager si vede come le curve si stabilizza nello stesso valore massimo di portata.

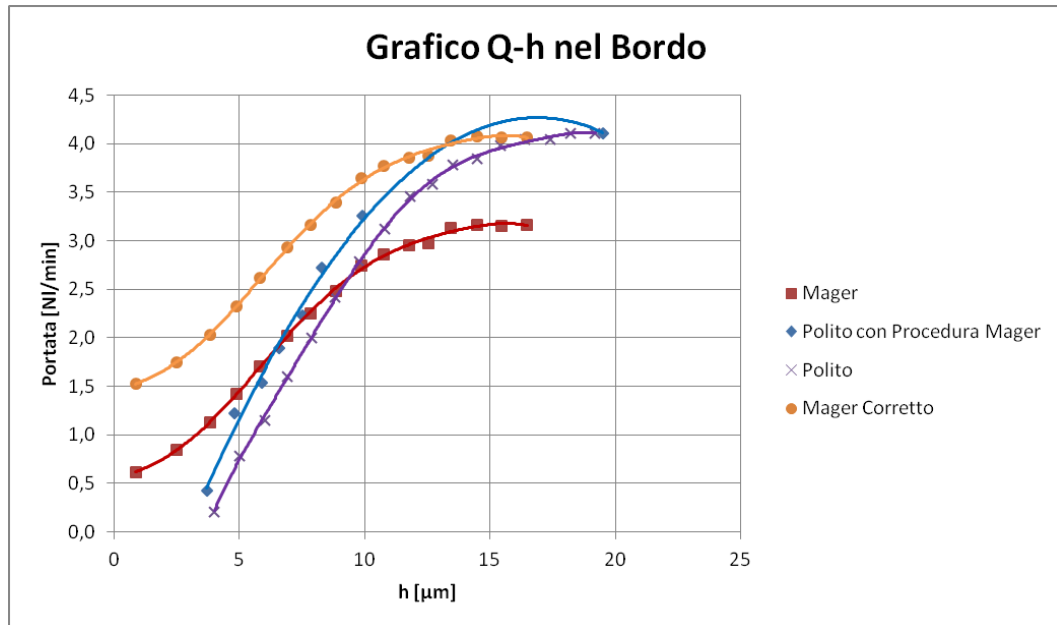


Figura 72: Curve di portate contro meato nel bordo per il pattino DEA R2.1

Come si ha potuto vedere nei grafici ottenuti attraverso i dati raggiunti dei laboratorio del Politecnico di Torino e della Mager, si può dire che per ottenere caratteristiche simili si deve utilizzare una unica procedura nei due laboratori; già che a diverse procedure si osserva delle variazioni considerevole nelle curve ottenute. Inoltre, nella portata si deve fare la correzione necessaria per ottenere il vero valore massimo di portata e così evitare di avere una prestazione non corrispondenti al pattino utilizzato.

CONCLUSIONI

1. L'uso di procedure diverse nella ditta Mager come nel laboratorio IBIS del Politecnico di Torino, causa uno spostamento nelle curve caratteristiche della forza e portata contro il meato centrale o nel bordo.
2. Uso di strumenti di misura non tarati inducono le eventuali differenze di misura, come l'abbiamo potuto vedere nei grafici della portata contro i diversi meati.
3. Anche le eventuale aumenti o diminuzioni della pressione di alimentazione durante le prove generano le differenze di misura.
4. Altro errore che causano differenza nelle misure sono quelle fatto per l'operatore al leggere i valori nei strumenti, come per esempio, nel flussimetro a galleggiante.
5. Il banco prova che si trova nel laboratorio del Politecnico di Torino, si rileva della deformazione della base all'applicare un carico crescente, causando variazione nella vera altezza del meato, principalmente nel centro del pattino già che non può essere misurata la vera deformazione della base, mentre nella macchina che si trova nella ditta Mager non presenta questo problema, già che la piastra di appoggio è in acciaio e grossa, evitando così l'origine alle deformazioni.
6. Le prove realizzate nel laboratorio IBIS del Politecnico di torino, non si ha tenuto conto il coefficiente di compensazione dovuto all'inclinazione del tastatore rispetto alla direzione di spostamento del meato, altro indicatore che generano le eventuale differenze nelle misure.

RACCOMANDAZIONI

1. L'uso di una procedura unica, per consentire di allineare le misure.
2. Verificare che la taratura dei strumenti non sia scaduta (come nella cella di carico, comparatore elettronico, dinamometro, manometri o trasduttore di pressione, flussimetri) e anche l'uso di strumenti più precisi, così si limitano le incertezze nelle misure.
3. Accertarsi che il valore della pressione di alimentazione sia la più prossima possibile al valore di specifica.
4. Automatizzare entrambi sistemi e utilizzare strumenti di misura digitali.
5. Per ottenere caratteristiche ben definite, è opportuno di riprogettare delle piastre di appoggio in modo da eliminare gli errori di planarità, facendole più rigide o robuste.
6. Accertarsi che la leva del tastatore sia il più possibile orizzontale e se non è così, compensare l'inclinazione del tastatore.

BIBLIOGRAFIA

- *Air Bearing Technology*, Westwind Air Bearings, January 2007.
- Andrea Emilio Catania, *Complementi di macchine*, Levrotto & Bella, Torino, Febbraio 1979.
- Andrea Trivella, Federico Colombo, *Industria: un esempio di ricerca e tecnologia*, Oleodinamica Pneumatica, Luglio 2008, pag. 84-88.
- Andrew J. Devitt, *Air bearings with a damping function for metal-cutting machine tools*, New Way air bearings, 1994.
- B.C. Majumdar, *Externally pressurized gas bearings: a review*, Wear 62, 1980, pp. 299-314, Elsevier Sequoia.
- D. A. Boffey, P.M. Wilson, *An experimental investigation of the pressures at the edge of a gas bearing pocket*, Journal of Lubrication Technology, October 1981, pp. 593-600.
- F. Al-Bender, H. Van Brussel, *Symmetric radial laminar channel flow with particular reference to aerostatic bearings*, Journal of Tribology, July 1992, pp. 630-635.
- Federico Colombo, Andrea Trivella, *Air bearing testing*, International Journal of Fluid Power Vol. 9 No. 3, November 2008.
- G. Belforte, T. Raparelli, A. Trivella, V. Viktorov, C. Visconte, *Numerical analysis on the supply hole discharge coefficient in aerostatic bearings*, AITC-AIT 2006, International Conference of Tribology, 20-22 September 2006, Parma, Italy.
- G. Belforte, T. Raparelli, V. Viktorov, A. Trivella, *Discharge coefficients of orifice-type restrictor for aerostatic bearings*, Tribology International 40 (2007), pp. 512-521, 2007.
- G. Belforte, T. Raparelli, V. Viktorov, *Theoretical investigation of fluid inertia effects and stability of self-acting gas journal bearings*, Journal of Tribology, October 1999, pp. 836-843.

- Guido Belforte, Federico Colombo, Terenziano Raparelli, Andrea Trivella, Vladimir Viktorov, *Aerostatic thrust bearings: experimental comparison between different feeding solutions*, ECOTRIB 2009 – 2nd European Conference on Tribology, June 7-10, Pisa, Italy.
- Guido Belforte, Federico Colombo, Terenziano Raparelli, Andrea Trivella, Vladimir Viktorov, *Aerostatic thrust bearings: experimental comparison between grooved and plane pads*, ECOTRIB 2009 – 2nd European Conference on Tribology, June 7-10, Pisa, Italy.
- Guido Belforte, Federico Colombo, Terenziano Raparelli, Andrea Trivella, Vladimir Viktorov, *Study of a gas thrust bearing with supply grooves*, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, Toyama 2008, September 15-18 2008.
- Guido Belforte, *Manuale di pneumatica – II edizione*, Tecniche Nuove, Milano, 2005.
- Guido Lanza, *studio dell'efflusso di aria compressa attraverso ugelli per pattini pneumostatici piani*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Maggio 2001.
- H. Mori, Y. Miyamatsu, *Theoretical flow-models for externally pressurized gas bearings*, Journal of Lubrication Technology, January 1969, pp. 181-193.
- Massimo Filippa, *studio teorico e sperimentale di supporti ad aria*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2002.
- Renato Mang, Andrea Trivella, *I cuscinetti pneumostatici reggispinta*, Oleodinamica Pneumatica Lubrificazione, Settembre 1998, pag. 110-119.
- Sadek Z. Kassab, Elsayed M. Noureldeen, Medhat A. Shawky, *Effects of operating conditions and supply hole diameter on the performance of a rectangular aerostatic bearing*, Tribology International Vol. 30 No. 7, pp. 533-545, 1997.
- Zanovello Fabrizio, *Studio di cuscinetti reggispinta assiale a gas*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Dicembre 2006.

NOMENCLATURA

Elenco dei Simboli

\dot{m} = portata in massa.

A_u = sezione di uscita.

p^o = pressione in condizioni totali a monte.

ρ^o = densità in condizioni totali a monte.

p_2 = pressione a valle.

k = costante dei gas.

c_s = velocità del suono c_s .

p_c/p^o = rapporto critico delle pressioni.

A_c = sezione ristretta.

G = portata in massa del componente reale.

C = conduttanza.

b = rapporto critico delle pressioni.

P_1 = pressione assoluta a monte del componente.

K_T = fattore correttivo che tiene conto della temperatura.

T_0 = temperatura assoluta a monte in condizioni standard.

T_1 = temperatura assoluta a monte.

r = rapporto delle pressioni.

P_2 = pressione a valle in condizioni di lavoro.

P_2^* = pressione a valle in condizioni critiche.

G_C = portata massima.

P_1 = pressione di alimentazione.

ΔP = differenza di pressione.

R = costante dei gas.

S = sezione circolare di passaggio.

C_d = coefficiente di efflusso.

G_{th} = portata teorica.

\dots_i = condizioni iniziali.

\dots_j = condizioni finali.

\dots^* = condizioni critiche.

M_i = numero di Mach.

r_i = raggio iniziale.

r_j = raggio finale.

r = raggio generico.

p_i = pressione iniziale.

p_j = pressione finale.

p = pressione generica.

k = costante dei gas.
 m_j = velocità normalizzata rispetto alla velocità del suono in condizioni critiche.
 u_j = velocità nel punto finale.
 p_j = densità nel punto finale.
 M_{fs} = parametro di stabilità.
 G_r = portata ideale teorica.
 C_d = coefficiente di efflusso.
 h = altezza del meato.
 P_u = pressione a monte della resistenza.
 P_d = pressione a valle della resistenza.
 d = diametro dell'orifizio.
 l = lunghezza dell'orifizio.
 δ = altezza della tasca.
A = alimentazione.
V1 = valvola a saracinesca.
R, R1 = riduttore, che ne riduce la pressione al valore richiesto dal pattino.
F = filtro che eliminano le impurità.
V2 = valvola a tre vie che serve per interrompere il flusso di aria senza azionare la valvola a saracinesca.
R2 = secondo riduttore, che effettua l'ulteriore riduzione di pressione.
RV = resistenza variabile che solitamente rimane aperta, si chiude solamente se il pattino necessita di stabilizzazione.
F1 = serbatoio.
FL1, FL2 = flussimetri.
M = manometro.
P = pattino.

Simboli Matematici

% = percentuale.