



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Aprile 2026

**Identificazione
numerico-sperimentale dei
coefficienti di efflusso di pattini
pneumostatici**

Relatori:

Professor Terenziano Raparelli

Professor Luigi Lentini

Professor Edoardo Goti

Candidato:

Duccio Mariani (Matricola: s292853)

Sommario

1. Introduzione	1
1.1 Cuscinetti a contatto.....	1
1.2 Cuscinetti non a contatto	1
2. Pattini Pneumostatici	3
2.1 Caratteristiche e principi di funzionamento	3
2.2 Parametri operativi e prestazioni.....	6
2.3 Applicazioni	8
2.4 Stato dell'arte.....	8
2.4.1 Coefficienti di scarico	8
2.4.1.1 Al-Bender & Van Brussel (1992) - Metodo della separazione delle variabili	9
2.4.1.2 Belforte et al. (2006) - Approccio sperimentale diretto.....	9
2.4.1.3 Waumans et al. (2008) - Metodo semi-analitico per effetti di flusso all'ingresso	12
2.4.1.4 Neves et al. (2010) - Analisi CFD con metodo degli elementi finiti.....	14
2.4.1.5 Belforte et al. (2011) - Metodo ibrido sperimentale e applicazioni.....	15
2.4.1.6 Chang et al. (2015) - Approccio CFD con reti neurali artificiali	17
2.4.1.7 Zhang et al. (2018a) - Metodo semi-analitico per cuscinetti a spinta.....	19
2.4.1.8 Colombo et al. (2021) - Metodo ibrido con soluzione a forma chiusa.....	22
2.4.1.9 Fatahi-Alkouhi et al.- Calcolo C_d con intelligenza artificiale in applicazioni idrauliche .	28
2.4.2 Micro-vibrazioni	30
2.4.2.1 Chen et al. (2010) - Vorticità dell'aria e nano-vibrazioni.....	30
2.4.2.2 Cheng et al. (2024) - Meccanismo di micro-vibrazione mediante LES e POD	33
3 Strumentazione e metodologia sperimentale	35
3.1 Pattini pneumostatici	36
3.2 Microscopio ottico	38
3.3 Profilometro	40
3.3.1. Strumentazione e procedura di misura.....	40
3.3.2. Analisi dei risultati.....	41
3.4 Prova a getto libero.....	43
3.4.1 Configurazione sperimentale per la misura automatica.....	44
3.4.1.1 Circuito pneumatico e componentistica	44
3.4.1.2 Procedura di test.....	45
3.4.2 Configurazione sperimentale per la misura manuale	47
3.4.2.1 Circuito pneumatico e componentistica	47
3.4.2.2 Procedura di test.....	48
3.5 Banco prova profili di pressione.....	50

3.5.1 Finalita del banco prova	50
3.5.2 Struttura meccanica	51
3.5.3 Circuito pneumatico di alimentazione	53
3.5.4 Sensoristica	55
3.5.5 Procedura sperimentale	57
3.5.5.1 Preparazione del cuscinetto e del circuito	58
3.5.5.2 Preparazione del cuscinetto e del circuito	58
3.5.5.3 Setup del micrometro e dei sensori	58
3.5.5.4 Esecuzione dei test e raccolta dati	61
3.5.5.3 Risultati sperimentali	61
4. Elaborazione dati.....	66
4.2 Acquisizione e pre-processing dei dati sperimentali.....	67
4.2.1 Lettura e salvataggio dati	67
4.2.2 Preparazione dei dati	68
4.3 Metodologia di calcolo e determinazione sperimentale del coefficiente di efflusso C_d	68
4.3.1 Identificazione della zona viscosa e calcolo della forza e della portata medie.....	68
4.3.2 Determinazione numerica dell'altezza del meato	70
4.3.3 Bilancio di forza e calcolo della pressione di imbocco	71
4.3.4 Determinazione del coefficiente di efflusso.....	73
4.4 Procedura di calcolo iterativa e rappresentazione grafica dei risultati	76
5. Conclusioni e analisi dei risultati	79
Bibliografia	84
APPENDICE [A] – Fotografie microscopio.....	85
APPENDICE [B] – Misure profilometro	96
B.1 Cuscinetti in Acciaio Piatti.....	96
B.2 Cuscinetti in Alluminio Piatti.....	102
B.2 Cuscinetti in Alluminio Concavi.....	107
APPENDICE [C] – Codici di calcolo MATLAB	112
C.1 SCRIPT 1: Codice lettura dati da fogli Excel.....	112
C.2 SCRIPT 2: Codice caricamento variabili	124
C.3 SCRIPT 3: Codice elaborazione dati.....	132
C.4 SCRIPT 4: Codice loop automatico	152

1. Introduzione

Nei moderni sistemi meccanici il supporto e la guida di componenti in moto relativo rappresentano un aspetto cruciale per il raggiungimento di elevati livelli di precisione, affidabilità ed efficienza. I cuscinetti costituiscono elementi fondamentali in questo contesto: il loro ruolo primario è sostenere carichi e contemporaneamente consentire il movimento relativo tra due corpi in una determinata direzione, riducendo la dissipazione energetica dovuta all'attrito. In numerose applicazioni industriali e scientifiche – quali macchine utensili di precisione, sistemi di posizionamento nanometrico, turbomacchine ad alta velocità e strumentazione metrologica – le prestazioni del sistema di supporto influenzano direttamente le capacità complessive del macchinario complessivo.

Le soluzioni tecnologiche disponibili si suddividono in due grandi famiglie in base alla modalità di interazione tra le superfici: i cuscinetti a **contatto** e i cuscinetti **non a contatto**. Questa distinzione fondamentale determina le caratteristiche operative diverse in termini di attrito, precisione, velocità limite, usura e manutenzione richiesta.

Un ulteriore criterio di classificazione si basa sulla direzione del carico rispetto all'asse del cuscinetto. Si distinguono così due tipologie: i **cuscinetti radiali**, che sostengono carichi perpendicolari all'asse di rotazione, e i **cuscinetti assiali** (o reggispinta), progettati per carichi che agiscono in direzione parallela ad esso.

1.1 Cuscinetti a contatto

I cuscinetti a contatto operano con interazione diretta tra le superfici in moto relativo, richiedendo necessariamente la presenza di un lubrificante (grasso o olio) per il corretto funzionamento. Questa categoria comprende due sottogruppi principali:

1. **Cuscinetti radenti o a strisciamento**, i quali presentano un contatto diretto tra le superfici in moto relativo, separate da uno strato di lubrificante. Questi cuscinetti offrono elevata capacità di carico, funzionamento silenzioso, tolleranza agli urti e facilità di realizzazione, ma richiedono lubrificazione continua e presentano attriti di avviamento significativi con conseguente usura. Trovano larga applicazione in motori endotermici, turbomacchine e sistemi con carichi elevati a velocità contenute.
2. **Cuscinetti volventi**, i quali, invece, utilizzano elementi rotolanti (sfere, rulli cilindrici, conici o a botte) interposti tra le piste interna ed esterna. Il contatto, teoricamente puntiforme o lineare, genera attrito principalmente per rotolamento anziché strisciamento. Questa soluzione garantisce coefficienti di attrito ridotti, elevata efficienza, standardizzazione dei componenti e facilità di montaggio. Le limitazioni includono sensibilità alle vibrazioni, rumorosità a velocità elevate, usura progressiva degli elementi rotolanti e necessità di precarico per applicazioni di precisione.

1.2 Cuscinetti non a contatto

Per superare le limitazioni dei cuscinetti convenzionali, si è sviluppata la tecnologia dei cuscinetti non a contatto, nei quali la separazione completa tra le superfici in moto relativo è garantita da un film fluido in grado di sostenere il carico applicato. L'eliminazione del contatto fisico tra le superfici in moto tra loro si traduce in assenza totale di usura, attrito estremamente ridotto, bassa generazione di calore e capacità di operare a velocità elevatissime con alta precisione. Lo strato di fluido che separa completamente le superfici evita qualsiasi tipo di contatto diretto, consentendo in molti casi applicazioni a lunga durata con manutenzione minima. A seconda del meccanismo di generazione della portanza, i cuscinetti non a contatto si suddividono in cuscinetti dinamici e cuscinetti statici.

1. **Cuscinetti dinamici** (idrodinamici e aerodinamici): Come è possibile osservare in Figura 1, nei cuscinetti dinamici la portanza è generata esclusivamente dal moto relativo delle superfici, che sfruttano l'effetto di trascinamento viscoso del fluido nel meato. Tuttavia, affinché si generi un campo di pressione idoneo a sostenere il carico, è necessario che il meato presenti una geometria convergente nel senso del moto (effetto cuneo). In questa configurazione, il fluido trascinato dalla superficie in movimento viene forzato in una sezione progressivamente ridotta, provocando un incremento spontaneo della pressione che separa le superfici e garantisce il sostentamento del pattino. La geometria convergente del meato e la velocità relativa producono una distribuzione di pressione che sostiene il carico senza richiedere alimentazione esterna. I **cuscinetti idrodinamici** utilizzano oli con elevata viscosità, raggiungendo coefficienti di attrito estremamente bassi (0,0001-0,001) in regime ottimale. Trovano largo impiego in motori, compressori e applicazioni con carichi elevati. I **cuscinetti aerodinamici** impiegano gas, tipicamente aria, come fluido di lavoro e sfruttano la rotazione o lo scorrimento relativi tra le due superfici per creare un meato tra i corpi. Includono tipologie quali cuscinetti a cuneo aerodinamico e cuscinetti foil, largamente utilizzati in turbomacchine ad altissima velocità (tipicamente superiori a 100.000 rpm) e sistemi di lettura/scrittura nei componenti per computer. Il principale limite dei cuscinetti dinamici risiede nelle condizioni di avviamento e arresto: quando le velocità sono insufficienti a generare il film fluido portante, si verifica contatto metallico con conseguente usura accelerata. Inoltre, pongono problematiche complesse dal punto di vista della stabilità dinamica, specialmente in condizioni transitorie durante le quali possono innescarsi fenomeni di vibrazione non controllata.

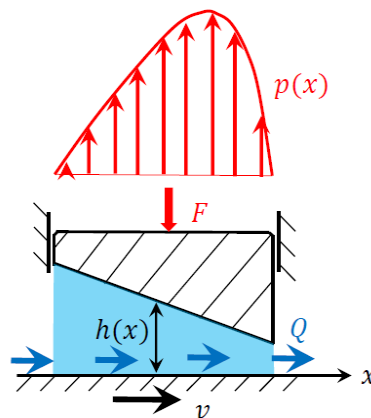


Figura 1. Campo di Pressione di un cuscinetto dinamico a cuneo.

2. **Cuscinetti esternamente pressurizzati** (idrostatici e aerostatici/pneumostatici): Nei cuscinetti esternamente pressurizzati, rappresentati in Figura 2, la separazione delle superfici è ottenuta mediante alimentazione forzata di fluido in pressione da una sorgente esterna, tipicamente attraverso un compressore o una pompa. Il fluido viene convogliato nel gioco tra le superfici attraverso opportuni sistemi di alimentazione, creando un campo di pressione indipendente dalla velocità relativa. Questa caratteristica fondamentale garantisce portanza anche in condizioni statiche e durante i transitori di avvio e arresto, eliminando completamente l'attrito di primo distacco, l'usura e i problemi di avviamento tipici dei cuscinetti dinamici, poiché non è necessario alcun movimento relativo affinché il dispositivo possa operare a regime. I **cuscinetti idrostatici** utilizzano oli in pressione per massimizzare la rigidità e la capacità di carico, risultando ideali per macchine utensili pesanti e tavole rotanti di grandi dimensioni. I **cuscinetti aerostatici** (o pneumostatici) impiegano gas, tipicamente aria compressa, come fluido di lavoro più adatto per applicazioni meno gravose.

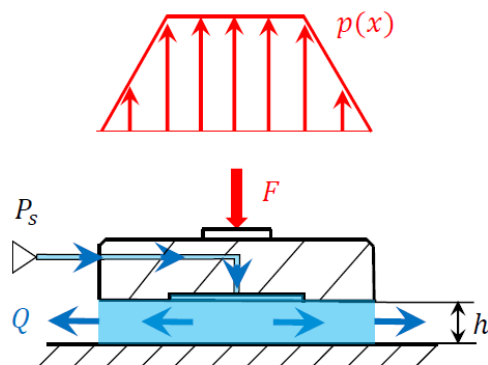


Figura 2 Campo di Pressione di un cuscinetto dinamico a cuneo.

L'impiego dell'aria come fluido lubrificante presenta numerosi vantaggi distintivi: assenza totale di contaminazione dell'ambiente operativo, eliminazione dei problemi legati alla gestione, smaltimento e degradazione dei lubrificanti liquidi, ridotto impatto ambientale, valori di attrito estremamente ridotti e possibilità di operare in ambienti con temperature estreme. Lo strato di gas a bassa viscosità che separa completamente i corpi consente una straordinaria riduzione della dissipazione energetica causata dall'attrito. Tuttavia, a causa della comprimibilità del gas, i valori di rigidità e la capacità di carico che tali cuscinetti possono sostenere sono ridotti rispetto ad altre tipologie di cuscinetti (ad esempio, cuscinetti volventi o idrostatici). La rigidità inferiore viene compensata dall'idoneità a velocità di rotazione elevatissime, dalla disponibilità del fluido di lavoro, dalla pulizia intrinseca del sistema garantita dai sistemi di filtraggio ed essiccazione dell'aria di lavoro e dalla possibilità di garantire, in molti casi, applicazioni a lunga durata con bassa manutenzione grazie alla totale assenza di contatto tra le superfici in moto.

Tali caratteristiche rendono i cuscinetti pneumostatici particolarmente adatti ad applicazioni in cui sono richieste elevata precisione di posizionamento, pulizia dell'ambiente operativo e funzionamento a velocità molto elevate. Esempi di implementazione includono: lavorazioni ad alta velocità e alta precisione quali fresatura e tornitura di precisione, rettificazione di fori e microfori, macchine di misura, macchine utensili di precisione, sistemi di posizionamento ad elevata precisione, attrezzature mediche, scanner ottici e sistemi di lettura/scrittura all'interno dei computer come i processi di verifica di dischi rigidi e circuiti elettronici.

2. Pattini Pneumostatici

Il presente lavoro di tesi si concentra sui cuscinetti aerostatici assiali, chiamati anche pattini pneumostatici, una particolare tipologia di cuscinetti aerostatici che consentono il movimento lineare tra due corpi e che sono in grado di sostenere carichi esclusivamente in direzione assiale.

2.1 Caratteristiche e principi di funzionamento

Il funzionamento di un pattino pneumostatico si basa sull'alimentazione forzata di aria compressa proveniente da una sorgente esterna tramite il foro di alimentazione. A differenza dei cuscinetti aerodinamici, la capacità portante è quindi indipendente dalla velocità relativa tra le superfici, garantendo piena funzionalità anche in condizioni statiche o a basse velocità, eliminando totalmente il fenomeno dell'attrito di primo distacco o stick-slip. Il sistema di alimentazione prevede generalmente un circuito pneumatico che riduce la pressione di rete al valore operativo desiderato (tipicamente 3-6 bar relativi) attraverso riduttori di pressione, filtri per rimuovere particelle contaminanti e, in alcuni

casi, sistemi di regolazione della portata. L'aria pressurizzata fluisce quindi attraverso un sistema di alimentazione verso il meato, il cui range di valori tipici è compreso tra 5 e 20 μm , dove si espande creando la distribuzione di pressione che sostiene il carico.

Come osservabile in Figura 3, l'aria compressa viene convogliata nel meato tra le superfici del pattino e del contropattino attraverso specifici sistemi di alimentazione, creando un campo di pressione che genera la forza portante necessaria a sostenere il carico applicato. In corrispondenza del foro di uscita del pattino può essere realizzata una tasca al fine di aumentare la capacità di carico del cuscinetto, aumentando la superficie utile sulla quale agisce la pressione massima. Tuttavia, sebbene tale soluzione migliori le prestazioni, un volume eccessivo della tasca può innescare instabilità autoeccitate note come *pneumatic hammer*. Soluzioni alternative per migliorare la distribuzione di pressione nel meato prevedono invece l'adozione di fori multipli, la realizzazione di micro-scanalature (ragnature) o l'utilizzo di materiali porosi.

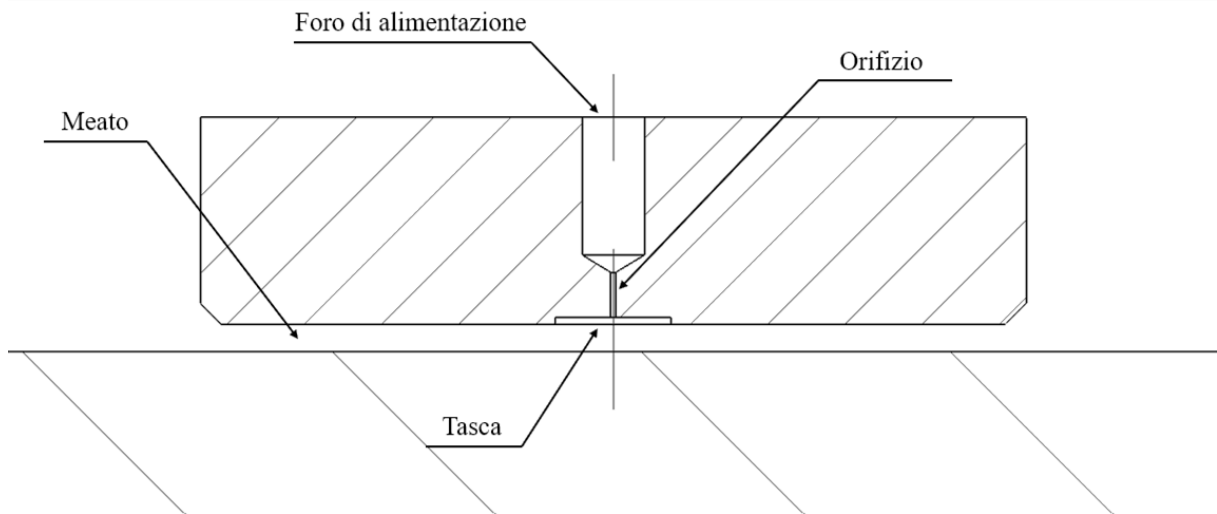


Figura 3. Sezione di un cuscinetto pneumostatico

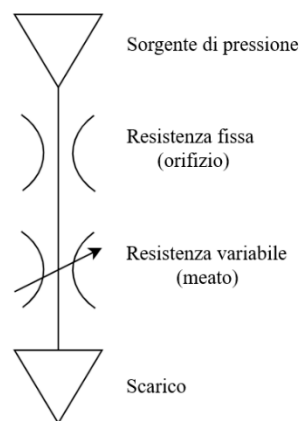


Figura 4. Schema circuitale equivalente di un cuscinetto pneumostatico

Il comportamento fluidodinamico del cuscinetto può essere efficacemente descritto dal circuito equivalente mostrato in Figura 4. In questo modello, l'orifizio viene rappresentato come una resistenza pneumatica fissa, poiché la sua geometria rimane invariata durante l'esercizio. Al contrario, il meato d'aria è schematizzato come una resistenza variabile: il suo valore, infatti, dipende strettamente

dall'altezza del meato d'aria che varia dinamicamente in risposta alle variazioni del carico applicato, modificando così la facilità con cui il fluido defluisce verso l'ambiente esterno.

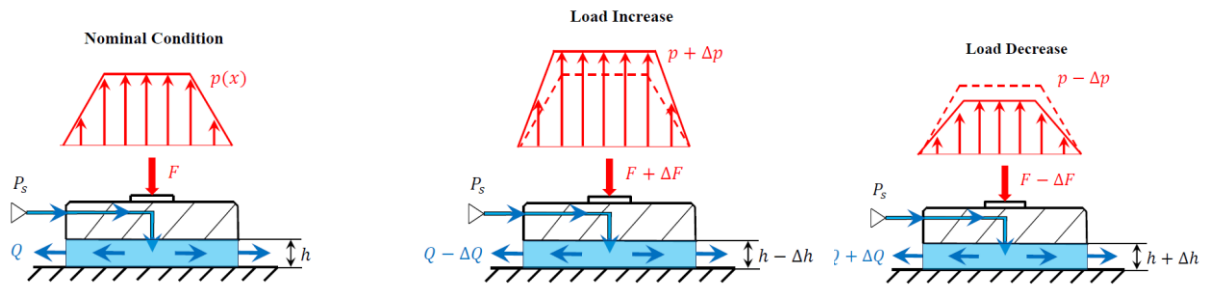


Figura 5. Autoregolazione del campo di pressione alla variazione del carico applicato sul cuscinetto.

Una caratteristica fondamentale dei pattini pneumostatici è infatti la loro capacità di autoregolazione in risposta alle variazioni di carico applicato come raffigurato in Figura 5. Quando il carico aumenta, il pattino tende ad avvicinarsi alla superficie di scorrimento, riducendo l'altezza del meato. Un incremento del carico esterno agisce comprimendo il film d'aria e riducendo l'altezza del meato. Questa compressione genera un immediato aumento della pressione interna, necessario a sviluppare una forza portante che bilanci il nuovo carico esterno e arresti l'avvicinamento delle superfici. Al contrario, una diminuzione del carico porta a un'espansione del meato: la conseguente riduzione della pressione interna permette al pattino di allontanarsi dalla superficie fino al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio statico.

Il meccanismo descritto di compensazione consente al sistema di raggiungere automaticamente una nuova condizione di equilibrio ad ogni variazione di carico, senza necessità di controlli esterni attivi. L'efficacia dell'autoregolazione è quantificata dalla rigidità statica del cuscinetto, definita come la variazione di forza a fronte di una corrispondente variazione di altezza del meato. Una rigidità elevata indica una forte capacità di mantenere costante il meato al variare del carico, essenziale per garantire precisione di posizionamento e ripetibilità nelle applicazioni di alta precisione.

I cuscinetti aerostatici sono caratterizzati dalla presenza di sistemi di alimentazione di diversa tipologia che controllano il flusso di aria verso il meato. La configurazione di tali sistemi consente di distinguere diverse famiglie di cuscinetti, ciascuna con caratteristiche prestazionali specifiche:

- **Cuscinetti con orifizi calibrati:** rappresentano la soluzione più semplice ed economica, possono essere realizzati a singolo o multiplo orifizio, come rappresentato in Figura 6a e Figura 6b, per migliorare la distribuzione di pressione. L'aria viene introdotta nel meato attraverso fori di diametro ridotto (tipicamente 0,1-0,5 mm) distribuiti sulla superficie del pattino. Sono apprezzati per la semplicità costruttiva e i costi contenuti, ma risultano caratterizzati da sensibilità alle variazioni di carico e rigidità limitata a causa della relazione non lineare tra pressione nel meato e portata;
- **Cuscinetti con ragnatura:** caratterizzati dalla presenza di scanalature o tasche (pockets) che collegano tra loro gli orifizi calibrati. Le tasche fungono da camere di equalizzazione della pressione, migliorando significativamente la distribuzione di pressione sulla superficie portante e conseguentemente la capacità di carico e la rigidità del sistema. La presenza delle tasche aumenta la capacità di carico rispetto ai semplici orifizi, in quanto la camera di pressione intermedia migliora la distribuzione globale di pressione. Questa configurazione rappresenta un compromesso ottimale tra prestazioni e complessità realizzativa;

- **Cuscinetti con restrittori porosi:** impiegano materiali porosi (tipicamente bronzo o grafite sinterizzati) che fungono da elemento restrittivo distribuito su un'ampia superficie (Figura 6c). Garantiscono la distribuzione più uniforme della pressione, maggiore stabilità del film d'aria e rigidità superiore, grazie all'ottimale mediazione degli effetti delle imperfezioni superficiali sulla distribuzione di pressione. Il meccanismo di compensazione è il più efficace tra tutte le configurazioni, tuttavia, presentano maggiore complessità tecnologica, costi più elevati e sensibilità all'otturazione dei pori per contaminazione.

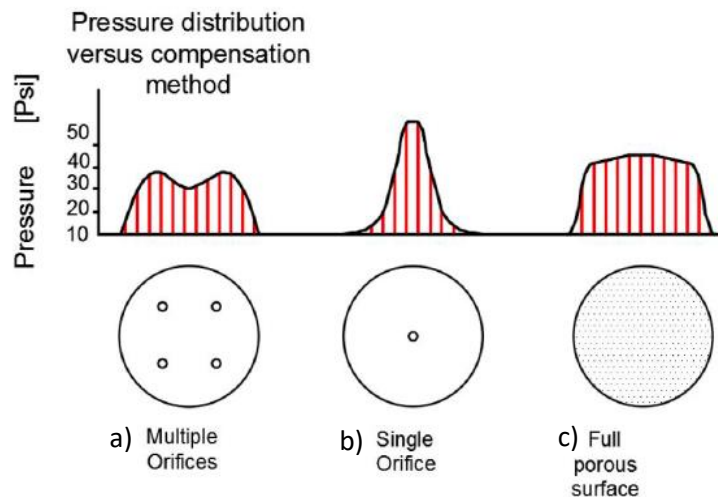


Figura 6. a) Distribuzione di pressione nel meato di un cuscinetto a orifizi multipli; b) Distribuzione di pressione nel meato di un cuscinetto a singolo orifizio; c) Distribuzione di pressione nel meato di un cuscinetto poroso.

2.2 Parametri operativi e prestazioni

La pressione relativa di alimentazione fornita al pattino aerostatico è solitamente compresa nell'intervallo 3-6 bar relativi, che risulta relativamente bassa rispetto ad altri sistemi meccanici. La scelta del livello di pressione rappresenta un compromesso tra capacità portante, consumo d'aria, rumorosità e costi del sistema di alimentazione.

Per garantire livelli di pressione adeguati e portate d'aria realizzabili nel meato, considerando che la viscosità dinamica dell'aria (circa $1,8 \times 10^{-5}$ Pa·s a 20°C) è molto inferiore rispetto ad altri lubrificanti, l'altezza del meato d'aria è solitamente compresa tra 5 e 20 μm durante il normale funzionamento. Queste dimensioni estremamente ridotte impongono severi requisiti di precisione su tutti gli aspetti geometrici e superficiali del sistema.

A causa di dimensioni così ridotte, le tolleranze dimensionali e geometriche e la rugosità delle superfici a contatto con il gas pressurizzato devono rispettare valori estremamente restrittivi. Un gioco troppo piccolo tra i corpi può causare contatto con conseguente danneggiamento, mentre un gioco eccessivo riduce drasticamente la rigidità e la capacità portante, compromettendo l'efficacia del meccanismo di autoregolazione. Disallineamenti angolari tra superfici adiacenti, profili troppo irregolari o rugosità troppo elevate possono alterare significativamente la distribuzione di pressione e influenzare le condizioni di funzionamento del cuscinetto.

Come regola generale, le superfici del pattino e del contropattino, a contatto con il film di gas devono presentare errori di forma nell' intorno di un decimo dell'altezza nominale del meato. La tolleranza geometrica più influente imposta sulle superfici a contatto con il film fluido dei cuscinetti pneumostatici è la rugosità superficiale, la quale deve rientrare in valori inferiori a $Ra=0.5 \mu m$ ottenibili con processo di lappatura.

Le prestazioni dei pattini pneumostatici sono fortemente influenzate da molteplici fattori interconnessi quali la geometria del cuscinetto (forma rettangolare, circolare o anulare, dimensioni e rapporti geometrici), il sistema di restrizione (tipo, dimensioni, numero e disposizione dei fori), le condizioni operative (pressione di alimentazione, carico applicato, velocità relativa e temperatura ambiente) e le proprietà del fluido (viscosità, densità e compressibilità dell'aria).

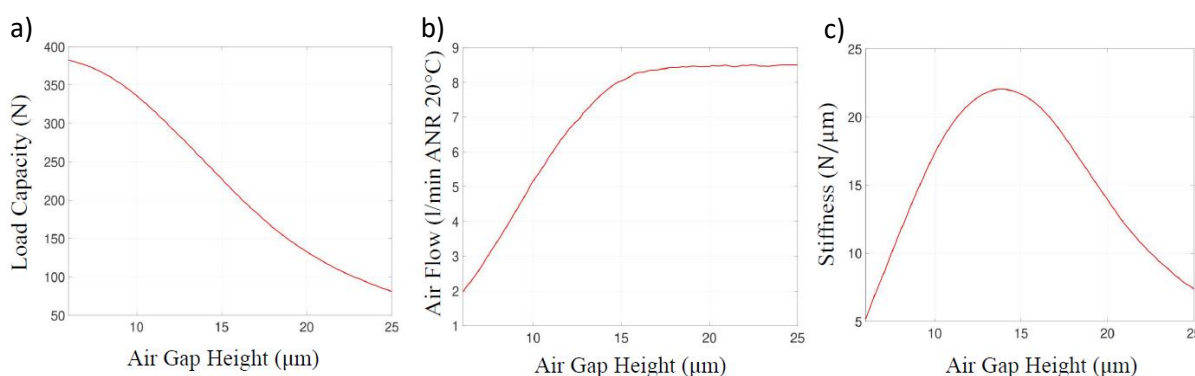


Figura 7. a) Relazione tra altezza del meato e capacità di carico statico del cuscinetto; b) Relazione tra altezza del meato e consumo volumetrico di aria del cuscinetto; c) Relazione tra l'altezza del meato e la rigidità del cuscinetto.

L'analisi delle prestazioni richiede la determinazione di parametri caratteristici fondamentali. La capacità di carico statico (Figura 7a) definisce la forza massima sostenibile in condizioni di equilibrio, il consumo di aria in condizioni di lavoro statiche (Figura 7b) definisce la portata volumetrica che il cuscinetto richiede in condizioni di lavoro statiche, mentre la rigidità statica (Figura 7c) quantifica la resistenza alle variazioni di altezza del meato quando il cuscinetto è soggetto a variazioni di carico, risultando cruciale per la precisione di posizionamento e come misura dell'efficacia dell'autoregolazione. Il comportamento dinamico del sistema è caratterizzato dalla rigidità e dallo smorzamento, ovvero la capacità di dissipare energia in presenza di perturbazioni dinamiche. Infine, il consumo d'aria, espresso come portata massica necessaria, influenza direttamente il dimensionamento del sistema di alimentazione e i costi operativi.

Tale complessità rende necessaria un'attenta analisi sia statica che dinamica per l'ottimizzazione del sistema. L'analisi statica determina le condizioni di equilibrio e le caratteristiche di carico del sistema, caratterizzando quantitativamente il comportamento di autoregolazione attraverso la relazione tra forza, pressione interna e altezza del meato. L'analisi dinamica valuta invece la stabilità e la risposta a perturbazioni esterne, verificando che il meccanismo di feedback passivo non introduca oscillazioni o instabilità che comprometterebbero la precisione del sistema.

Sotto il profilo realizzativo, la scelta dei materiali per i pattini è dettata dal compromesso tra rigidità strutturale e prestazioni dinamiche. L'impiego di acciaio inossidabile garantisce la massima stabilità dimensionale e rigidità, caratteristiche fondamentali per minimizzare le deformazioni sotto carico e mantenere costante l'altezza del meato.

Di contro, l'adozione di leghe di alluminio, tipicamente sottoposte a trattamenti di anodizzazione dura a spessore, consente di ridurre drasticamente le masse in gioco e le inerzie, favorendo applicazioni che

richiedono elevate accelerazioni e pronti transitori. Tali trattamenti superficiali sono inoltre indispensabili per conferire la necessaria durezza e resistenza all'usura in caso di contatti accidentali tra il pattino e la guida.

2.3 Applicazioni

I pattini pneumostatici rappresentano la soluzione più avanzata per applicazioni dove precisione nanometrica, assenza totale di usura, velocità elevate e pulizia sono requisiti imprescindibili. Nel settore delle macchine utensili di ultra-precisione, questi cuscinetti trovano impiego in torni per operazioni di *diamond turning* (tornitura di ultra-precisione con utensile in diamante per l'ottenimento di pezzi con rugosità nanometrica), rettificatrici e fresatrici destinate alla realizzazione di componenti ottici e stampi di alta precisione, dove le tolleranze dimensionali richieste sono dell'ordine di frazioni di micrometro.

La strumentazione metrologica costituisce un altro ambito applicativo fondamentale, con particolare riferimento alle macchine di misura a coordinate (CMM), ai profilometri e agli interferometri, dove l'assenza di attrito e gli errori di movimento estremamente ridotti garantiscono ripetibilità e accuratezza nelle operazioni di misura. Nell'industria dei semiconduttori, i pattini pneumostatici sono essenziali nei sistemi di litografia, negli apparati di movimentazione dei wafer (wafer handling) e nei posizionatori impiegati nella produzione di circuiti integrati, dove la combinazione di pulizia ambientale e precisione nanometrica è indispensabile.

Il settore ottico ed elettronico utilizza estensivamente questi cuscinetti per la lavorazione di lenti e specchi di alta qualità, così come nella produzione di dischi rigidi per computer, dove velocità elevate e assenza di particolato sono requisiti critici. I sistemi di posizionamento beneficiano delle caratteristiche dei pattini pneumostatici attraverso tavole aereostatiche per movimentazione senza contatto e sistemi di micro-assemblaggio che richiedono movimenti fluidi e privi di vibrazioni.

Infine, la ricerca scientifica rappresenta un campo di applicazione all'avanguardia, con impieghi in microscopi a scansione per l'imaging ad altissima risoluzione, acceleratori di particelle dove la precisione di allineamento è fondamentale per il corretto funzionamento dei fasci, e telescopi di nuova generazione che necessitano di sistemi di puntamento e inseguimento estremamente precisi e stabili nel tempo.

2.4 Stato dell'arte

Lo studio dei cuscinetti pneumostatici ha raggiunto negli ultimi decenni un notevole sviluppo, con particolare attenzione rivolta a due aspetti fondamentali: la determinazione accurata dei coefficienti di scarico e la comprensione dei fenomeni di oscillazione di pressione nel meato. Il presente capitolo fornisce una panoramica della letteratura scientifica recente su questi temi, organizzata cronologicamente per consentire una chiara tracciabilità dell'evoluzione delle metodologie e dei risultati.

2.4.1 Coefficienti di scarico

L'accuratezza dei modelli numerici per i cuscinetti aerostatici dipende strettamente dalla corretta stima del coefficiente di efflusso (C_d), parametro che quantifica lo scostamento tra la portata teorica isoentropica e quella reale. La difficoltà principale risiede nel fatto che questi coefficienti non possono essere considerati costanti, ma variano significativamente in funzione di parametri geometrici (diametro dell'orifizio, geometria della tasca di alimentazione, spessore del film d'aria) e di parametri di lavoro (pressione di alimentazione, numero di Reynolds, numero di Mach). Lo sviluppo di metodologie

accurate per la determinazione di tali coefficienti in modo predittivo è essenziale per la progettazione efficiente di cuscinetti ad elevate prestazioni.

2.4.1.1 Al-Bender & Van Brussel (1992) - Metodo della separazione delle variabili

Al-Bender e Van Brussel [1] svilupparono il metodo della separazione delle variabili (MSV) per la soluzione delle equazioni dello strato limite laminare nei flussi in canali stretti, rappresentando un contributo fondamentale alla comprensione dei fenomeni di flusso nei cuscinetti pneumostatici. Questo approccio consente, grazie alla trasformazione di Von Mises seguita dalla separazione della velocità del flusso principale in funzioni di ampiezza e di profilo, di passare dalle equazioni differenziali alle derivate parziali di Navier-Stokes ad un problema ai valori al contorno risolvibile analiticamente tramite un sistema di equazioni differenziali ordinarie più semplici. Il sistema di equazioni differenziali ordinarie ottenuto viene risolto come un problema ai valori iniziali, permettendo l'integrazione spaziale della pressione lungo il meato a partire dalle condizioni di alimentazione dell'orifizio.

L'originalità dell'approccio di Al-Bender risiede nella capacità di adattare la teoria dello strato limite di Prandtl ai flussi interni tipici dei cuscinetti aerostatici, dove la condizione vincolante è la conservazione della portata massica tra le pareti piane del cuscinetto e della superficie di riscontro. Per risolvere il campo di moto, viene utilizzata la trasformazione di von Mises, che permette di riscrivere le equazioni in funzione della funzione di corrente ψ e la coordinata normalizzata X . L'ipotesi cardine è la separabilità della velocità normalizzata $U(X, \psi)$ nelle due componenti di intensità del flusso $q(X)$ e del profilo $g(\psi)$, risultando:

$$U(X, \psi) = q(X) \cdot g(\psi)$$

Questa separazione permette di semplificare i termini convettivi lungo una linea di corrente, riducendo il problema complesso ad un sistema di equazioni differenziali ordinarie di primo ordine, dove si legano il gradiente di pressione P' , la variazione di intensità del flusso q' e i parametri del profilo.

La validazione del modello rispetto ai dati sperimentali evidenzia un'accuratezza notevole, in particolare nella regione di transizione dove il flusso di alimentazione, inizialmente caratterizzato da forti accelerazioni, evolve verso un regime viscoso completamente sviluppato. Tale corrispondenza conferma l'efficacia dell'approccio semi-analitico nel descrivere la fisica del meato con una fedeltà superiore ai modelli integrali precedenti. Tuttavia, la potenza del metodo risiede in un formalismo matematico che presenta alcune limitazioni intrinseche: la gestione delle singolarità all'imbocco richiede accorgimenti numerici specifici e una calibrazione precisa dei passi di integrazione. Inoltre, l'assunzione di un profilo di velocità laminare, pur essendo ideale per la maggior parte delle applicazioni pneumostatiche di precisione, esclude la trattazione diretta di effetti turbolenti complessi. Questo limita l'applicabilità del modello a regimi di moto laminare o transizionale, rendendolo meno affidabile in configurazioni caratterizzate da numeri di Reynolds molto elevati, dove i fenomeni dissipativi turbolenti diventano dominanti.

2.4.1.2 Belforte et al. (2006) - Approccio sperimentale diretto

Belforte, Raparelli, Viktorov e Trivella [2] condussero uno studio sperimentale sistematico e approfondito per determinare i coefficienti di scarico mediante misurazioni dirette di portata d'aria e distribuzione di pressione in cuscinetti pneumostatici. Questo lavoro rappresenta uno dei primi tentativi di caratterizzare sperimentalmente il comportamento dei coefficienti di scarico su un'ampia gamma di parametri operativi e geometrici, quali la pressione di alimentazione, l'altezza del meato e la geometria dei fori di alimentazione.

Lo studio affrontato utilizza un modello a parametri concentrati per modellare il foro di alimentazione del cuscinetto come un ugello equivalente la cui portata teorica viene corretta dal coefficiente di scarico C_d , tramite la legge:

$$G = C_d \cdot G_t$$

dove il termine C_d rappresenta la portata ideale ottenuta da un'espansione isoentropica.

Il banco prova, rappresentato in Figura 8, è una struttura a portale che permette di variare micrometricamente lo spessore del meato d'aria tra il pattino e un elemento fisso di riscontro. Il sistema integra sensori per il monitoraggio simultaneo dei parametri fondamentali: trasduttori micrometrici per l'altezza del meato, una cella di carico per il carico applicato e un circuito pneumatico per misurare il consumo d'aria. Una caratteristica del setup è la capacità di mappare completamente il campo di pressione locale. Grazie a fori di misura ricavati sull'elemento di riscontro, capace di traslare radialmente e ruotare su una piattaforma dedicata, gli autori sono stati in grado di ricostruire la distribuzione di pressione sotto l'intero pattino.

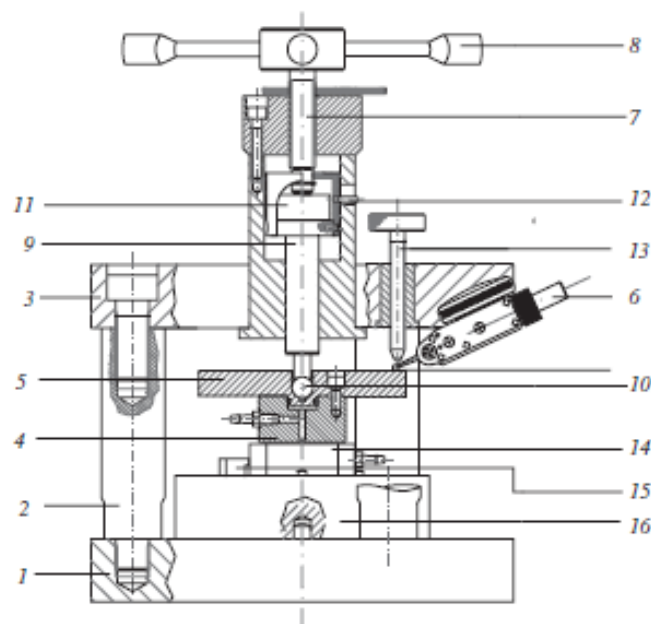


Figura 8. Disegno del banco prova utilizzato

I pattini utilizzati per le prove presentavano ingombri esterni uguali ma differenti configurazioni dei sistemi di alimentazione: tra loro i cuscinetti differivano per lunghezza e diametro dell'orifizio di scarico e per la presenza o meno delle tasche in corrispondenza dell'orifizio.

L'indagine sperimentale condotta dagli autori si articola in tre fasi sequenziali che mirano a trasformare l'osservazione fisica dei profili di pressione in uno strumento di calcolo predittivo per i progettisti. Nella prima fase, lo studio dei profili di pressione radiali ha permesso di mappare le transizioni di regime di moto che avvengono tra il sistema di alimentazione e il meato. Per gli orifizi semplici (Figura 9a), i risultati confermano l'esistenza della cosiddetta 'pressure depression zone': il flusso, accelerando bruscamente all'ingresso del meato, subisce una caduta di pressione locale dovuta a effetti inerziali, seguita da un parziale recupero prima di stabilizzarsi nel regime viscoso laminare. Al contrario, negli orifizi con tasca (Figura 9b), il comportamento è governato dal rapporto tra la profondità della tasca δ e l'altezza del meato h : se la tasca è sufficientemente profonda funge da elemento capacitivo uniformando la pressione prima dell'ingresso nel meato; se invece è troppo sottile, la sua resistenza diventa

predominante, rendendo il comportamento fluidodinamico del sistema del tutto simile a quello di un orifizio anulare.

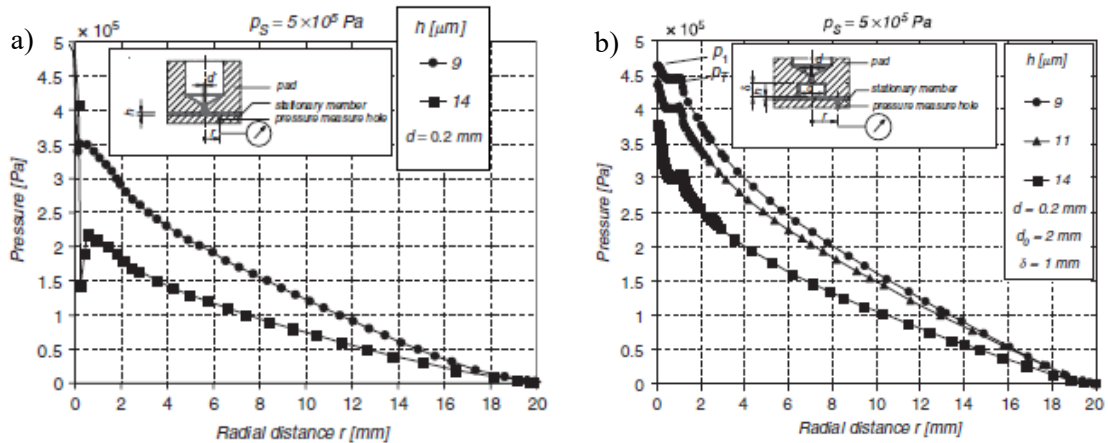


Figura 9. a) Profilo radiale di pressione in cuscinetti semplici; b) Profilo radiale di pressione in cuscinetti con tasca

La seconda fase del lavoro introduce la scomposizione del sistema di alimentazione in un modello a resistenze concentrate in serie. Questo approccio ha permesso di isolare due distinti coefficienti di efflusso basati sul numero di Reynolds: $C_{d,c}$ (visibile in Figura 10a e Figura 10b) relativo alla resistenza del condotto di alimentazione e $C_{d,a}$ (visibile in Figura 11), relativo alla resistenza nella sezione anulare di ingresso al meato.

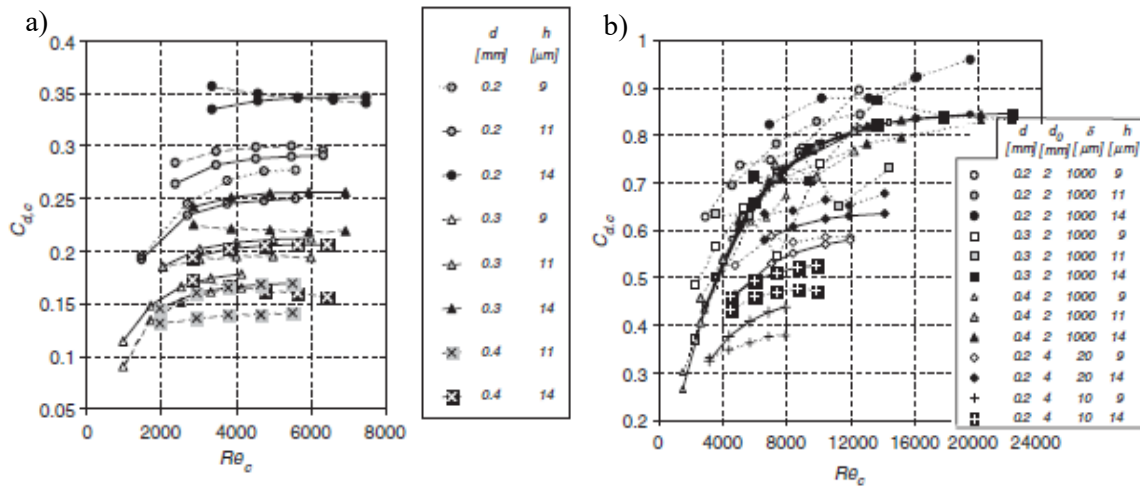


Figura 10. a) Andamento di $C_{d,c}$ in funzione di Re nel condotto in cuscinetti semplici; b) Andamento di $C_{d,c}$ in funzione di Re nel condotto in cuscinetti con tasca.

L'analisi dei dati ha dimostrato che, mentre la lunghezza del foro esercita un'influenza trascurabile, il diametro del foro e l'altezza del meato sono variabili determinanti per i valori dei coefficienti di scarico. In particolare, si è osservato che $C_{d,c}$ tende a crescere con l'altezza del meato e a diminuire con l'aumentare del diametro dell'orifizio, stabilizzandosi asintoticamente per numeri di Reynolds elevati. I valori di $C_{d,a}$, al contrario, mostrano una scarsa sensibilità alle caratteristiche geometriche del sistema, risultando condizionati quasi esclusivamente dal numero di Reynolds calcolato nella sezione anulare d'ingresso nel meato.

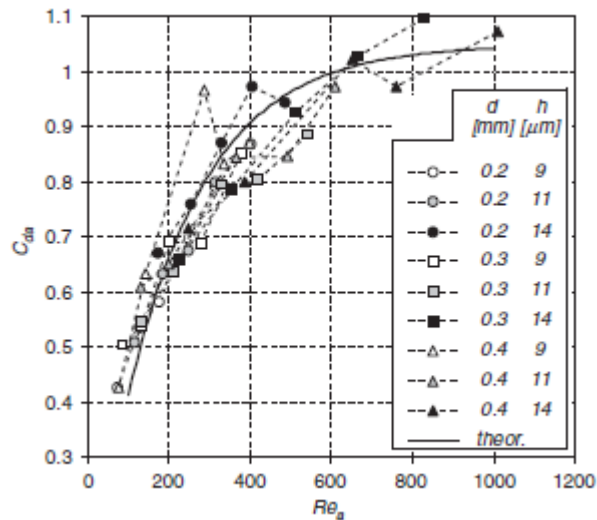


Figura 11. Andamento di $C_{d,a}$ in funzione di Re in cuscinetti con tasca

Le conclusioni dello studio forniscono un criterio operativo per la scelta dei coefficienti di efflusso in base alla geometria del restrittore e della presenza di tasche. Gli autori sintetizzano i risultati stabilendo che, mentre per gli orifici anulari semplici è sufficiente l'impiego del coefficiente relativo alla sezione del condotto $C_{d,c}$ mentre la presenza di una tasca di alimentazione introduce una complessità aggiuntiva che richiede una distinzione basata sulla profondità della stessa.

Il parametro discriminante identificato è il rapporto adimensionale $\frac{h+\delta}{d}$, dove h rappresenta l'altezza del meato, δ la profondità della tasca e d il diametro dell'orificio di alimentazione. Quando questo valore è superiore a 0,2 (tasche profonde), il sistema deve essere modellato attraverso l'azione combinata di due resistenze in serie: quella dell'orificio $C_{d,c}$ e quella della sezione anulare di ingresso al meato $C_{d,a}$. Al contrario, per configurazioni a tasca sottile (rapporto inferiore a 0.2), l'effetto della sezione anulare diventa trascurabile, permettendo di semplificare il modello usando solamente il termine $C_{d,c}$.

2.4.1.3 Waumans et al. (2008) - Metodo semi-analitico per effetti di flusso all'ingresso

Il lavoro di Waumans et al. [3] costituisce il necessario approfondimento teorico all'approccio sperimentale di Belforte et al. [2], superando i limiti delle formule empiriche tradizionali attraverso una modellazione analitica rigorosa. L'approccio di Waumans segna un cambio di paradigma rispetto alla letteratura precedente, inquadrando il problema del flusso d'ingresso non più come una variabile empirica isolata, ma come un caso specifico di fluidodinamica nei condotti sottili. L'autore propone il superamento delle formule sperimentali a favore della risoluzione analitica delle equazioni dello strato limite, tramite la tecnica della separazione delle variabili, trasformando il problema in un calcolo ai valori iniziali. Questa metodologia consente di ottenere un coefficiente di efflusso analitico, conciliando il rigore della fluidodinamica teorica con la semplicità del modello a parametri concentrati. Questa trattazione identifica tre regioni di flusso distinte osservabili in Figura 12: una zona di accelerazione iniziale in corrispondenza dell'orificio, una regione d'ingresso caratterizzata dalla competizione tra forze inerziali e viscosi, e infine una zona di flusso completamente sviluppato. Tramite la definizione della pressione teorica d'ingresso p_t , ricavata ipotizzando un moto viscoso su tutta la superficie del pattino, si ottiene un dato d'ingresso che garantisce la coerenza del modello matematico, introducendo un errore

sui valori di portanza totale trascurabile.

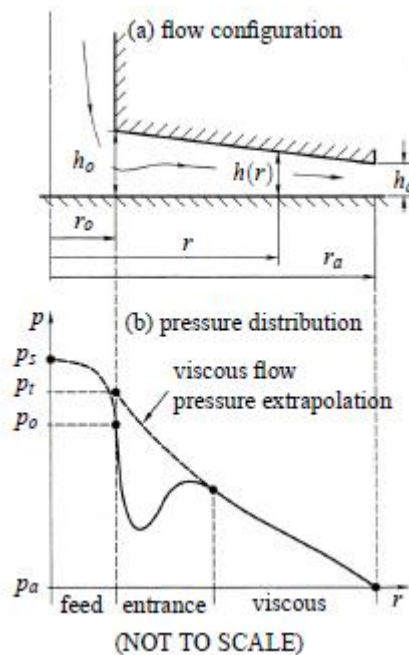


Figura 12. a) configurazione del flusso nel meato; b) profilo di pressione nel meato

Per la descrizione della regione di alimentazione (*feed zone*), Waumans adotta un approccio a parametri concentrati basato sull'ipotesi di flusso privo di effetti d'attrito ed espansione adiabatica; In questa regione il gas accelera dal polmone di alimentazione fino all'imbocco del meato. La portata massica viene determinata attraverso una formulazione che tiene conto della natura comprimibile del fluido, distinguendo correttamente tra regime di deflusso subcritico e regime sonico.

Nella regione d'ingresso (*entrance zone*), il flusso passa da una distribuzione di velocità uniforme a un profilo parabolico dove dominano gli effetti viscosi. Per modellare questa transizione, Waumans ricorre alle equazioni dello strato limite di Prandtl, superando i limiti della teoria di Reynolds che risulterebbe inadeguata a descrivere i fenomeni all'imbocco a causa dei forti fenomeni inerziali locali. L'approccio del metodo si basa sulla separazione delle variabili della velocità grazie all'assialsimmetria del problema, ottenendo una formulazione del tipo:

$$U(R, Z) = Q(R) \cdot G(R, Z)$$

Dove la funzione di ampiezza $Q(R)$ descrive come cambia la velocità in funzione della coordinata radiale e la funzione di profilo $G(R, Z)$ definisce invece la forma del profilo di velocità lungo il raggio e l'altezza del meato. Questa nuova formulazione permette di passare dal problema analitico originario ad un nuovo problema risolvibile con un sistema di equazioni differenziali ai valori iniziali, risolvibile note le caratteristiche del sistema. La soluzione del sistema ottenuto avviene tramite un metodo iterativo che ha come obiettivo l'identificazione della pressione all'ingresso necessaria a soddisfare il valore di pressione pari a quella ambiente all'uscita. In questo modo si ricava un profilo di pressione numerico confrontabile con quelli ottenuti per via sperimentale.

Il confronto tra i risultati ottenuti e quelli precedenti raccolti sperimentalmente presenti in Figura 13a e Figura 13b conferma la bontà dell'approccio analitico utilizzato. Un risultato di particolare rilievo riguarda la spiegazione del minimo locale di pressione all'imbocco: Waumans dimostra che tale caduta di pressione è una conseguenza diretta degli effetti inerziali e non necessariamente legata alla presenza di distacco della vena fluida, come precedentemente ipotizzato in letteratura.

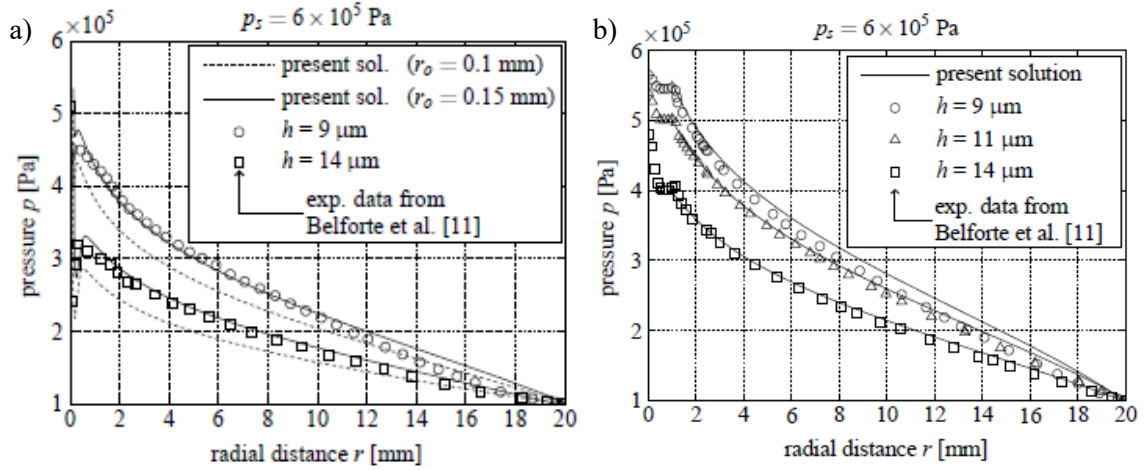


Figura 13. a) Confronto dei profili di pressione calcolati e sperimentali per cuscinetto semplice; b) Confronto dei profili di pressione calcolati e sperimentali per un cuscinetto con tasca.

2.4.1.4 Neves et al. (2010) - Analisi CFD con metodo degli elementi finiti

In questo lavoro Neves, Schwarz e Menon [4] analizzano l'influenza del coefficiente di efflusso (C_d) sulle prestazioni globali di cuscinetti pneumostatici cilindrici raffigurati in Figura 14 con particolare attenzione al consumo di aria e alla capacità di carico. Attraverso la risoluzione numerica dell'equazione di Reynolds, mediante il Metodo degli Elementi Finiti (FEM), lo studio indaga lo scostamento tra l'ipotesi semplificativa di un C_d costante e la realtà di un coefficiente variabile in funzione del rapporto di pressione e delle condizioni di alimentazione, confermando quanto già emerso in letteratura.

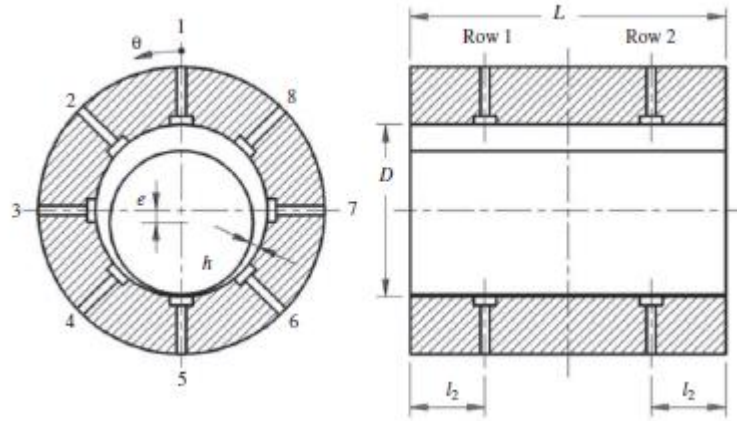


Figura 14. Configurazione dei cuscinetti cilindrici simulati, aventi due file da otto fori ciascuna e eccentricità non nulla

L'altezza del meato nel cuscinetto simulato risulta variabile a causa dell'eccentricità dell'albero. Ai fini della risoluzione numerica, il dominio computazionale cilindrico viene sviluppato su un piano bidimensionale e discretizzato mediante una mesh a elementi triangolari lineari. Il campo di pressione all'interno del meato è governato dall'equazione di Reynolds, che nel caso specifico di fluido comprimibile e di trasformazione isoterma, assume la seguente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p^2}{\partial y} \right) = 24\mu \frac{p_a}{\rho_a}$$

dove p rappresenta la pressione locale nel meato incognita del sistema, h l'altezza del meato, μ la viscosità dinamica dell'aria, p_a e ρ_a la pressione e la densità dell'aria ambiente e Γ il termine di sorgente legato alla portata massica in ingresso dagli orifici.

La discretizzazione dell'equazione sopra riportata sul dominio porta alla composizione del sistema matriciale del tipo $[a]\{f\} = \{b\}$, che viene risolto per via iterativa. La soluzione del sistema permette di ricavare il campo di pressione e i valori dei coefficienti di scarico di ciascun orifizio riportati nel grafico in Figura 15. Tali valori di C_d risultano diversi tra loro poiché il rapporto delle pressioni locali di ingresso e uscita dall'orifizio k_p è determinato dall'altezza del meato, che a sua volta è variabile lungo la coordinata angolare del dominio.

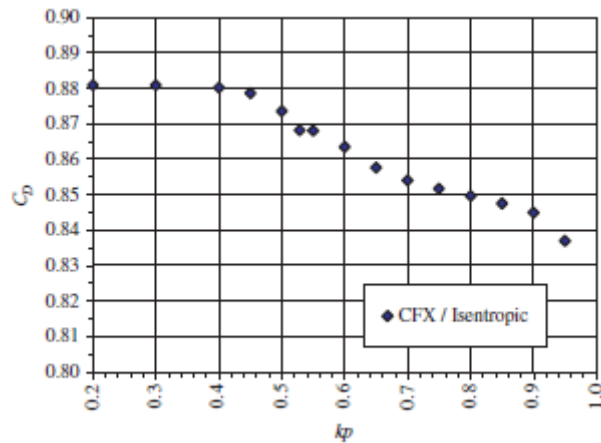


Figura 15. Valori di C_d ottenuti in funzione del rapporto delle pressioni nella regione sonica (tratto orizzontale) e subsonica (tratto pendente)

Dall'analisi condotta in questo studio, emerge come l'ipotesi di C_d costante sia un'approssimazione accettabile per la valutazione della capacità di carico, mentre risulta inadeguata per una stima accurata dei consumi di aria (con errori pari al 7,4%) e della stabilità dinamica. Una progettazione rigorosa di un cuscinetto aerostatico cilindrico deve dunque prevedere l'impiego di un C_d funzione del rapporto di pressione localizzato k_p per ogni singolo orifizio della serie.

2.4.1.5 Belforte et al. (2011) - Metodo ibrido sperimentale e applicazioni

In questo studio, l'approccio basato sulla risoluzione di un problema inverso permette di integrare i dati sperimentali di un banco prova dedicato con un modello agli elementi finiti [5]. Questa metodologia consente di identificare con precisione il comportamento del C_d per diverse tipologie di restrittori tenendo conto dell'influenza delle caratteristiche geometriche reali, comprese le imperfezioni di lavorazione meccanica osservabili al microscopio con esempio in Figura 16, e delle condizioni operative sulla portata di massa e sulla distribuzione di pressione.

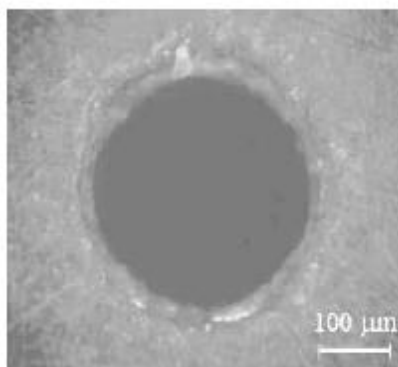


Figura 16. Ingrandimento al Microscopio Ottico del foro avente diametro 0,3mm di un pattino con restrittore a foro semplice senza tasca.

Per le misurazioni è stato impiegato un banco prova derivato da precedenti misurazioni [2] capace di misurare la distribuzione di pressione nel meato, il consumo d'aria e la capacità di carico in funzione

dell'altezza del meato e della pressione di alimentazione del pattino [2]. I test sono stati condotti su tre tipologie di pattini (con foro semplice, a tasca singola e a tasca multipla), caratterizzati da inserti intercambiabili per valutare l'influenza del diametro del foro e della profondità della tasca. L'utilizzo del microscopio ottico ha permesso di quantificare raccordi e smussi di lavorazione: tali microgeometrie, pur essendo solitamente trascurate nelle simulazioni ideali, influenzano sensibilmente il coefficiente di efflusso reale.

L'analisi dei profili di pressione radiali ha permesso di identificare fenomeni fluidodinamici complessi, distinti per tipologia di alimentatore. Negli orifizi di tipo anulare, i risultati sperimentali evidenziano un marcato decremento di pressione all'ingresso del meato, dove l'accelerazione del fluido causa una caduta di pressione locale seguita da un parziale recupero. Al contrario, nei sistemi dotati di tasca di alimentazione, il comportamento dipende strettamente dal rapporto tra la profondità della tasca (δ) e l'altezza del meato (h): tasche profonde garantiscono una pressione più uniforme, mentre tasche con profondità paragonabile all'altezza del meato presentano cadute di pressione interne non trascurabili.

Dal punto di vista analitico, lo studio propone di modellare il sistema di alimentazione come una serie di resistenze pneumatiche concentrate. Mentre per gli orifizi senza tasca è sufficiente un unico coefficiente $C_{d,c}$, per i sistemi dotati di tasca viene invece introdotto un secondo coefficiente $C_{d,a}$ per descrivere la caduta di pressione all'ingresso del meato. Entrambi i parametri sono espressi come funzioni del numero di Reynolds e di rapporti geometrici caratteristici. In particolare, viene dimostrato che in presenza di tasche profonde, il coefficiente di efflusso raggiunge un valore asintotico prossimo a 0.85, rendendo la conduttanza del foro indipendente dall'altezza del meato. Sebbene tale condizione ottimizzi la capacità di carico statica, l'autore sottolinea come l'incremento volumetrico della tasca possa rendere possibili fenomeni di instabilità dinamica.

L'implementazione numerica del modello si basa sulla tecnica delle differenze finite (FDM), applicata a una griglia polare per risolvere l'equazione di Reynolds in condizioni statiche, di cui è riportato un elemento in Figura 17. Il modello integra le equazioni di flusso degli orifizi con la continuità della massa nei volumi di controllo attraverso un algoritmo iterativo: questo processo permette di determinare simultaneamente la distribuzione di pressione nel meato e il valore del coefficiente di efflusso.

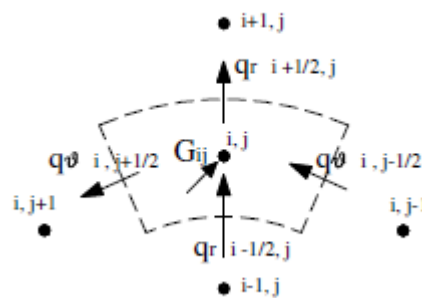


Figura 17. Elemento della discretizzazione polare del dominio del meato per il metodo delle differenze finite

La validazione del modello numerico attraverso il confronto con i dati sperimentali conferma l'efficacia delle formulazioni proposte per i coefficienti di efflusso. Lo studio evidenzia come l'approccio a parametri concentrati sia in grado di predire con accuratezza la distribuzione di pressione nel meato, specialmente nella zona a regime viscoso completamente sviluppato, come apprezzabile in Figura 18a e Figura 18b. Emerge tuttavia una marcata sensibilità del sistema alla variazione di altezza del meato: piccole incertezze nella misurazione o nel posizionamento del pattino possono indurre variazioni significative nei risultati, sottolineando l'importanza della precisione millesimale in fase di assemblaggio del banco di prova.

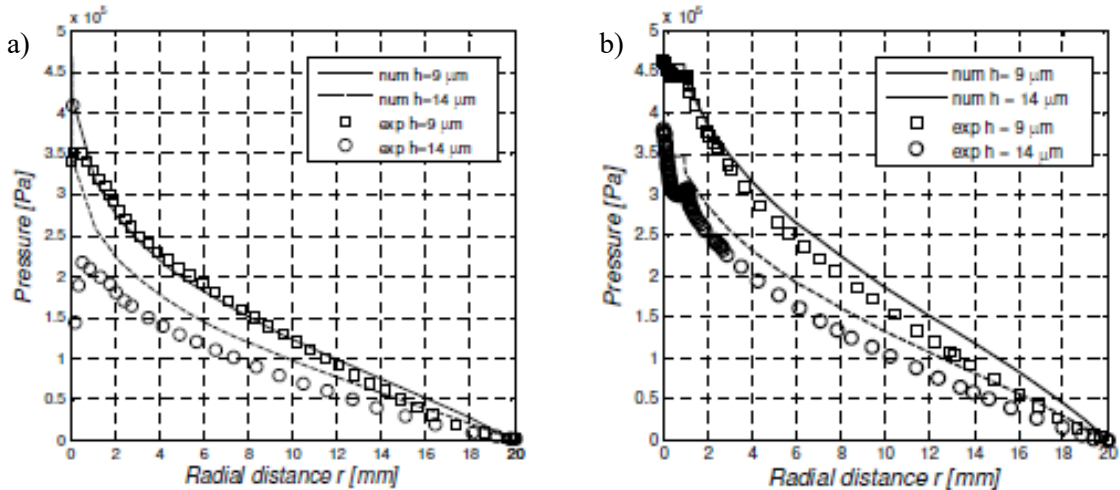


Figura 18. a) Confronto tra valori di pressione sperimentali e calcolati per cuscinetti semplici; b) Confronto tra valori di pressione sperimentali e calcolati per cuscinetti con tasca.

In conclusione, il presente studio fornisce un criterio quantitativo per la scelta del modello di efflusso basato sul rapporto geometrico $(h + \delta)/d$ dove h rappresenta l'altezza del meato, δ la profondità della tasca e d il diametro del foro. Viene dimostrato che per valori superiori a 0,2 è indispensabile adottare una doppia caratterizzazione del coefficiente di efflusso ($C_{d,c}$ e $C_{d,a}$) per descrivere correttamente anche la caduta di pressione tra tasca e meato. I risultati numerici copiano bene quelli sperimentali in un ampio range del rapporto geometrico $h + \delta)/d$, confermando la solidità del procedimento utilizzato. Tuttavia, l'autore sottolinea la forte sensibilità del modello alla precisione della misura dell'altezza del meato, evidenziando come minime incertezze sperimentali nelle misurazioni di tale parametro possano influenzare la precisione delle previsioni.

2.4.1.6 Chang et al. (2015) - Approccio CFD con reti neurali artificiali

Partendo dalle evidenze emerse negli studi di Belforte e Neves [2], [4], [5], che hanno confermato la variabilità del coefficiente di efflusso, questo studio propone un cambio di metodologia. Gli autori evidenziano che, sebbene le simulazioni CFD offrano la massima precisione nella stima del campo di moto, il loro peso computazionale le rende inadatte per processi di ottimizzazione iterativa in fase di progetto [6]. Al contrario, la risoluzione dell'equazione di Reynolds è estremamente efficiente in termini computazionali ma la sua precisione dipende dalla correttezza del valore di input del coefficiente di efflusso. Per soddisfare il compromesso tra velocità di calcolo e precisione, lo studio sviluppa un "modello surrogato" basato su Reti Neurali Artificiali (ANN). L'obiettivo è addestrare la rete utilizzando i risultati di simulazioni CFD validate, permettendo così di prevedere istantaneamente il valore del C_d corretto in funzione dei parametri geometrici dominanti.

L'approccio metodologico si basa sulla sinergia tra la modellazione fluidodinamica computazionale (CFD con software ANSYS) e la risoluzione numerica dell'equazione di Reynolds tramite differenze

finite (FDM). Il fulcro di tale sinergia risiede nella determinazione accurata del coefficiente di efflusso C_d parametro che lega la portata reale alla portata teorica isoentropica.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{CFD}}{\dot{m}_t}$$

In questo caso anziché procedere a un calcolo diretto il C_d , i cui valori ottenuti sono riportati in Figura 19b, viene identificato tramite un processo di ottimizzazione volto a minimizzare l'errore relativo sulla portanza totale tra il modello CFD e il modello FDM, ottenute integrando i profili di pressione riportati in Figura 19a. All'interno del solutore FDM, la pressione in uscita dal restrittore (P_d) viene calcolata imponendo l'equilibrio tra la portata entrante dal restrittore e quella uscente dal meato. L'intero processo assicura che il modello Reynolds, pur essendo computazionalmente rapido, mantenga un'elevata fedeltà fisica: il calcolo iterativo termina solamente quando l'errore relativo sulla portanza totale rispetto al riferimento ottenuto da CFD scende sotto la soglia prefissata pari a 10^{-3} .

Per automatizzare il calcolo del coefficiente di efflusso senza dover ricorrere a costose simulazioni CFD per ogni nuova configurazione, è stata implementata una Rete Neurale Artificiale (ANN). La rete funge da modello surrogato: riceve in input i parametri geometrici e operativi e fornisce in output il relativo valore di C_d istantaneamente. Grazie all'addestramento di *back-propagation*, la rete è in grado di mappare le relazioni non lineari tra la geometria del restrittore e il comportamento del fluido, integrandosi nel solutore FDM per velocizzare l'intera procedura di calcolo del cuscinetto.

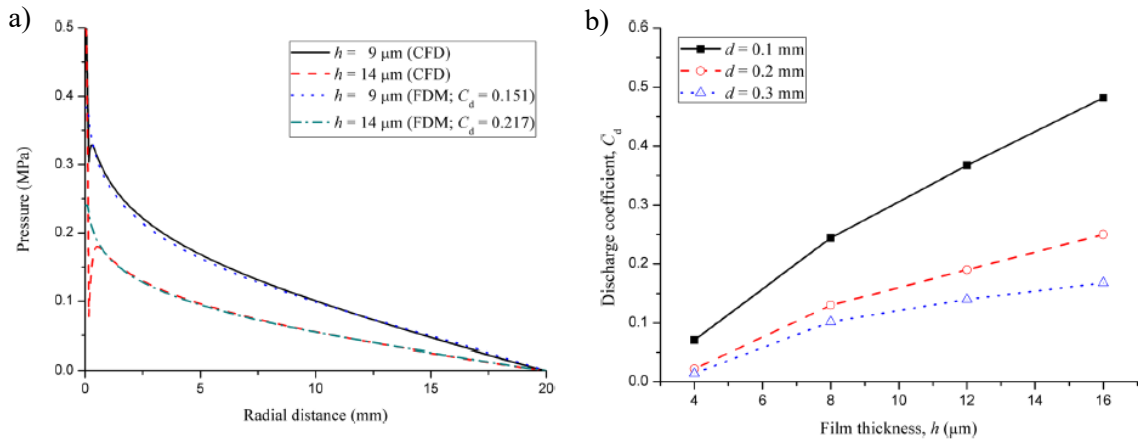


Figura 19. a) Confronto dei profili di pressione ottenuti con FDM e CFD; b) valori di C_d ottenuti con diversi diametri di restrittore e diverse altezze di meato.

Dall'analisi di sensibilità condotta emerge che il coefficiente di efflusso è influenzato in modo predominante solamente dal diametro dell'orifizio (d) e dallo spessore del meato (h), come osservabile in Figura 20. Al contrario, parametri quali la pressione di alimentazione, la lunghezza dell'orifizio, il raggio del cuscinetto e l'eventuale svasatura del restrittore mostrano un'influenza trascurabile e possono essere ignorati nella costruzione del modello predittivo. Di conseguenza il modello surrogato ANN è stato addestrato utilizzando esclusivamente d e h come variabili di input per il calcolo dei coefficienti di efflusso, i cui risultati sono riportati in Figura 20. I test di validazione confermano l'accuratezza della rete neurale nel predire il C_d corretto, garantendo una distribuzione di pressione nel modello FDM che ricalca fedelmente i risultati delle simulazioni CFD.

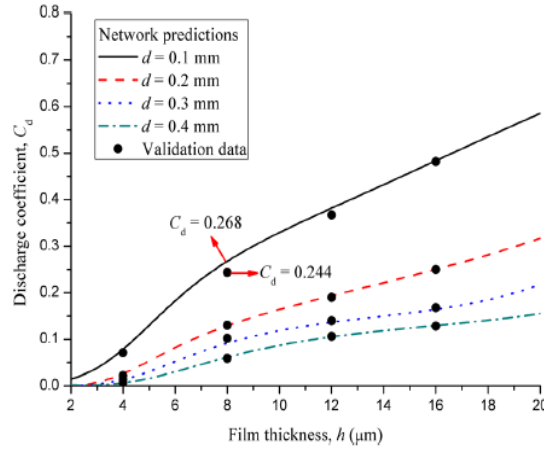


Figura 20. Previsione dei valori di C_d ottenuti tramite la rete neurale

2.4.1.7 Zhang et al. (2018a) - Metodo semi-analitico per cuscinetti a spinta

L'equazione di Reynolds rappresenta lo strumento più utilizzato nella maggior parte degli studi sui cuscinetti aerostatici grazie alla sua ottima efficienza computazionale. Tuttavia, come evidenziato da diversi studi, essa non è in grado di descrivere accuratamente i fenomeni inerziali in prossimità del restrittore, come il calo di pressione in prossimità del restrittore, la “*pressure depression*”, visibile in Figura 21. Per superare tale limite senza ricorrere all'oneroso costo computazionale delle simulazioni CFD, il presente lavoro propone un metodo semi-analitico basato sulla separazione delle variabili applicato alle equazioni dello strato limite [7]. Questo approccio permette di includere nel calcolo sia gli effetti inerziali che quelli viscosi, garantendo un'accuratezza paragonabile alla CFD anche nella zona dell'orifizio (*entrance region*), ma con la rapidità tipica dei modelli analitici.

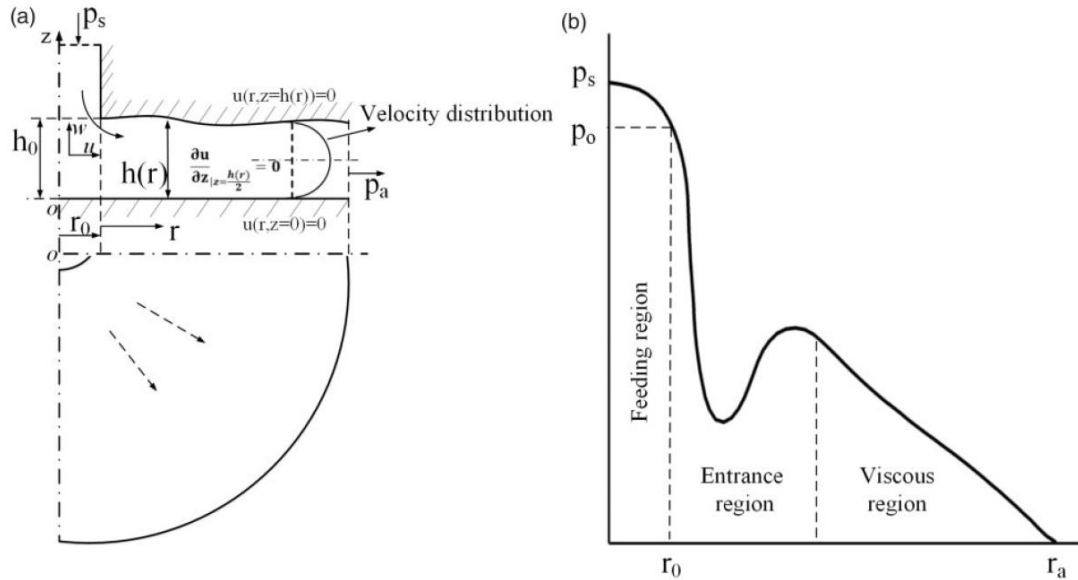


Figura 21. Dipendenza del campo di pressione e di velocità radiale dall'altezza del meato

Il modello matematico usato si fonda sulle equazioni della conservazione della quantità di moto (Eq. 1) e della massa (Eq. 2) nello strato limite per un gas ideale isoterma. A differenza della teoria classica, vengono conservati i termini inerziali nell'equazione della quantità di moto, necessari per descrivere in modo completo il campo di pressione.

$$\begin{cases} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{dp}{dr} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} & (1) \\ \frac{\partial}{\partial r} (\rho u r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w r) = 0 & (2) \end{cases}$$

Per risolvere il sistema in modo efficiente, viene applicato il metodo della separazione delle variabili in modo del tutto simile ad approcci precedenti. La funzione velocità viene scomposta nel prodotto di una funzione di ampiezza e una funzione di forma del profilo. Questa trasformazione permette di passare dalle complesse equazioni alle derivate parziali (PDE) a un sistema di equazioni differenziali ordinarie (ODE) del primo ordine. La soluzione di questo sistema ridotto consente di ottenere il campo di moto completo con un costo computazionale molto contenuto. La correttezza del metodo di è confermata dalla concordanza dei risultati con i dati sperimentali di Belforte et al. [2] e con le simulazioni CFD, sia in termini di distribuzione locale di pressione che di parametri globali come portanza e portata.

I risultati ottenuti tramite il metodo MSV sono stati analizzati per comprendere la dipendenza del comportamento del fluido in funzione dei principali parametri di progetto, individuando nell'altezza del meato e nel diametro del restrittore le variabili di maggior interesse. Lo studio evidenzia come l'aumento dello spessore del film d'aria h provochi un'intensificazione degli effetti inerziali come apprezzabile in Figura 22, che si traducono in una *pressure depression* più intensa in prossimità dell'ingresso. Fisicamente, l'accelerazione del gas genera un calo della pressione locale che, pur venendo parzialmente recuperato a valle, penalizza la distribuzione di pressione complessiva portando a una riduzione della capacità di carico totale. Allo stesso tempo, un meato più alto oppone una minore resistenza idraulica al passaggio del fluido, determinando un incremento consumo d'aria.

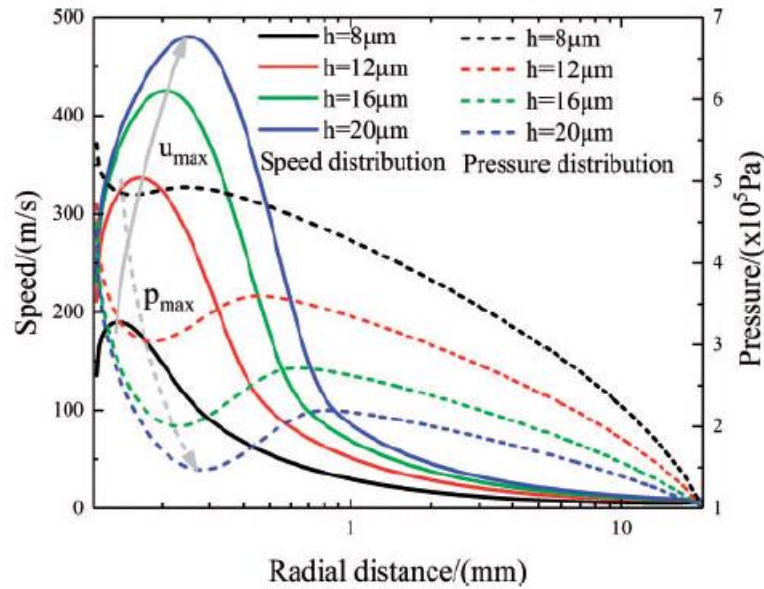


Figura 22. Dipendenza del campo di pressione e di velocità radiale dall'altezza del meato

Un comportamento speculare si osserva agendo sul diametro del restrittore d_0 , fenomeno osservabile in Figura 23: orifizi più grandi tendono ad attenuare la caduta di pressione locale poiché riduce la velocità di picco del gas all'ingresso nel meato. Questa maggiore uniformità del campo di pressione, ottenibile con orifizi di diametro superiore, permette di incrementare la portanza complessiva grazie a un valore più elevato della pressione media all'interno del meato. Inoltre, analogamente a quanto accade per lo

spessore del film, un incremento del diametro comporta anche un aumento del consumo d'aria, giustificato in questo caso dalla minore resistenza fluidodinamica offerta dal restrittore stesso.

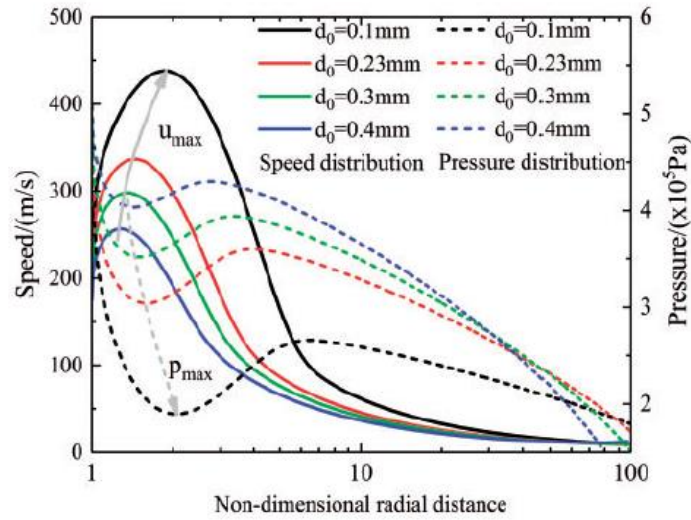


Figura 23. Dipendenza del campo di pressione e di velocità radiale dal diametro del restrittore

L'analisi viene completata considerando l'influenza della pressione di alimentazione p_s e del raggio del cuscinetto r_a , i cui effetti, visibili nei grafici in Figura 24 e Figura 25, delineano ulteriormente il legame tra dinamica locale e prestazioni statiche globali. Un incremento della pressione di alimentazione determina un rafforzamento della *pressure depression*, aumentandone la profondità a causa delle maggiori velocità raggiunte dal gas; tuttavia, si riscontra un miglioramento netto della portanza e della portata massica per un'altezza di meato costante, poiché l'aumento generale del livello energetico nel meato compensa le perdite localizzate. Al contrario, l'aumento del raggio del cuscinetto agisce in modo opposto sulla cinematica del fluido, attenuando la caduta di pressione locale e riducendo l'ampiezza della velocità massima. In questo caso, mentre la portata massica non mostra una particolare sensibilità alle variazioni del raggio, mantenendo la pressione all'uscita dell'orifizio circa costante, la capacità di carico aumenta significativamente, sia per l'indebolimento degli effetti inerziali all'ingresso, sia per la maggior superficie utile su cui agisce il profilo di pressione.

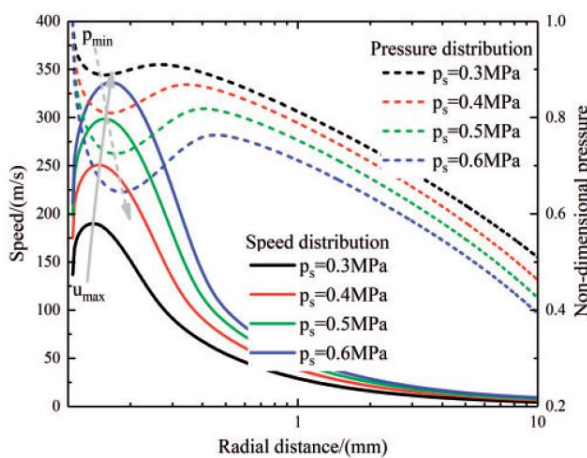


Figura 24. Dipendenza del campo di pressione e di velocità dalla pressione di alimentazione dalla coordinata radiale.

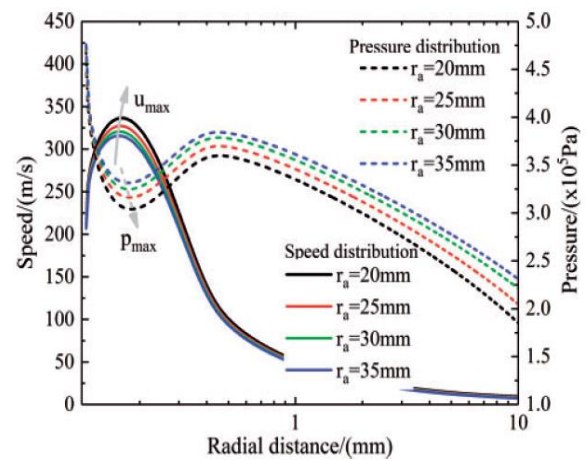


Figura 25. Dipendenza del campo di pressione e di velocità dal raggio dell'orifizio dalla coordinata radiale.

In conclusione, l'analisi conferma che nella regione di *pressure depression* gli effetti inerziali giocano un ruolo primario: ogni variazione dei parametri che comporta un incremento della velocità massima del gas (come l'aumento dell'altezza del meato e della pressione di alimentazione, o la riduzione del diametro dell'orifizio e del raggio del cuscinetto) in accordo con il principio di conservazione dell'energia, corrisponde ad una pressione minima locale più bassa. Inoltre, l'azione combinata di inerzia e viscosità non solo esaspera tale caduta di pressione, ma ne amplia l'estensione radiale spostandone verso l'esterno il punto di minima pressione.

2.4.1.8 Colombo et al. (2021) - Metodo ibrido con soluzione a forma chiusa

Nonostante la letteratura consolidata, la previsione accurata degli effetti del flusso nella regione d'ingresso nel meato dei cuscinetti aerostatici rimane una delle sfide modellistiche più rilevanti. Il passaggio del fluido dalla camera di alimentazione al meato sottile è caratterizzato da forti effetti inerziali che generano il fenomeno della *pressure depression*. Tale comportamento non può essere descritto accuratamente dall'equazione di Reynolds standard, la quale richiede l'adozione di coefficienti di correzione specifici. Per ovviare all'elevato onere computazionale delle simulazioni CFD, la pratica ingegneristica adotta comunemente formulazioni a parametri concentrati basate sul concetto di coefficiente di efflusso C_d . Tuttavia, l'assunzione di un C_d costante rappresenta una semplificazione eccessiva, poiché tale parametro varia significativamente in funzione del numero di Reynolds, del rapporto di pressione, della geometria del restrittore e altezza del meato. Nel contesto descritto emerge la necessità di metodi di identificazione ibridi che, combinando misurazioni sperimentali nella regione di flusso viscoso con le soluzioni analitiche in forma chiusa, permettano di determinare con precisione il valore reale del coefficiente di efflusso per garantire un'accurata previsione delle prestazioni del cuscinetto [8].

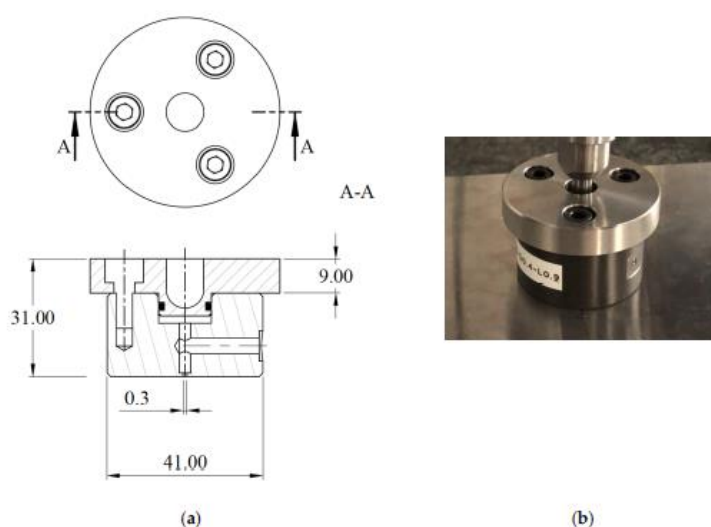


Figura 26. a) Sezione del cuscinetto utilizzato b) fotografia del cuscinetto utilizzato

Le prove sperimentali sono state precedute da un'accurata analisi metrologica dei cuscinetti, visibili in Figura 26, volta a determinare le reali caratteristiche geometriche del componente rispetto ai dati nominali di progetto. Tale indagine si è resa necessaria poiché le tolleranze di fabbricazione possono introdurre scostamenti significativi: le rilevazioni al microscopio elettronico riportate in Figura 27 hanno infatti mostrato un diametro reale dell'orifizio differente da quello nominale e la presenza di evidenti smussi all'imbocco dell'orifizio. Parallelamente le misure eseguite al profilometro, di cui è riportato un esempio in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**28, hanno rilevato errori di planarità della superficie attiva nell'ordine del micrometro, entità non trascurabili se rapportate agli spessori del meato d'aria tipici di queste applicazioni. Simili discrepanze geometriche confermano l'inadeguatezza

dell'uso di parametri puramente teorici e rafforzano l'importanza di un metodo di identificazione ibrido, capace di compensare tali incertezze attraverso un coefficiente di efflusso calibrato sulla reale risposta

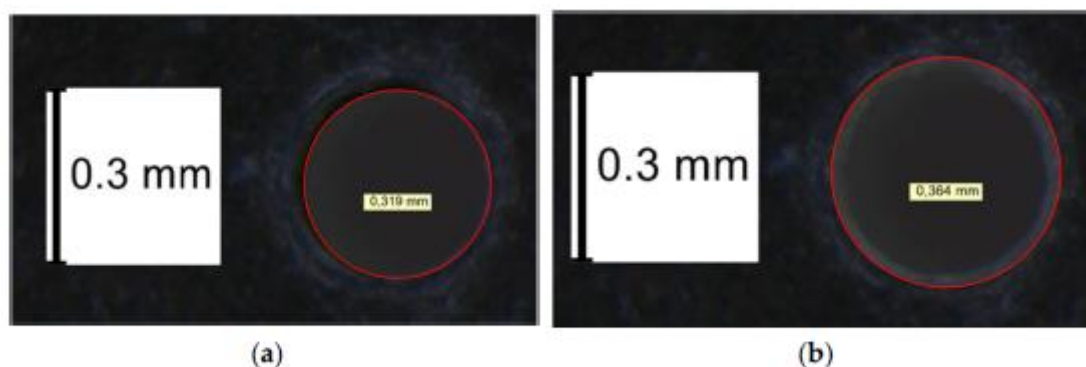


Figura 27. a) Diametro dell'orifizio misurato al microscopio ottico; b) Diametro del bordo esterno dello smusso dell'orifizio misurato al microscopio ottico

fluidodinamica del sistema.

L'apparato sperimentale si avvale di una configurazione evoluta da quella già usata in letteratura [2] e schematizzata in Figura 29, che consente la misurazione simultanea della capacità di carico, del consumo d'aria e del profilo di pressione nel meato. Un aspetto metodologico fondamentale riguarda la determinazione dell'altezza del meato, che viene valutata indirettamente confrontando la posizione del pattino, rilevata da tre sensori capacitivi simmetrici, in presenza e in assenza di alimentazione. Per la mappatura del profilo di pressione, il sistema utilizza una piastra traslante (contropattino) montata su un supporto rotante; tale configurazione permette di definire la posizione della presa di pressione in un sistema di coordinate polari, garantendo una scansione completa di tutto il meato. L'accuratezza di questo studio risiede nell'analisi anche delle superfici e del foro del contropattino, misurati tramite profilometria e microscopia elettronica in modo analogo a quanto fatto per il cuscinetto.

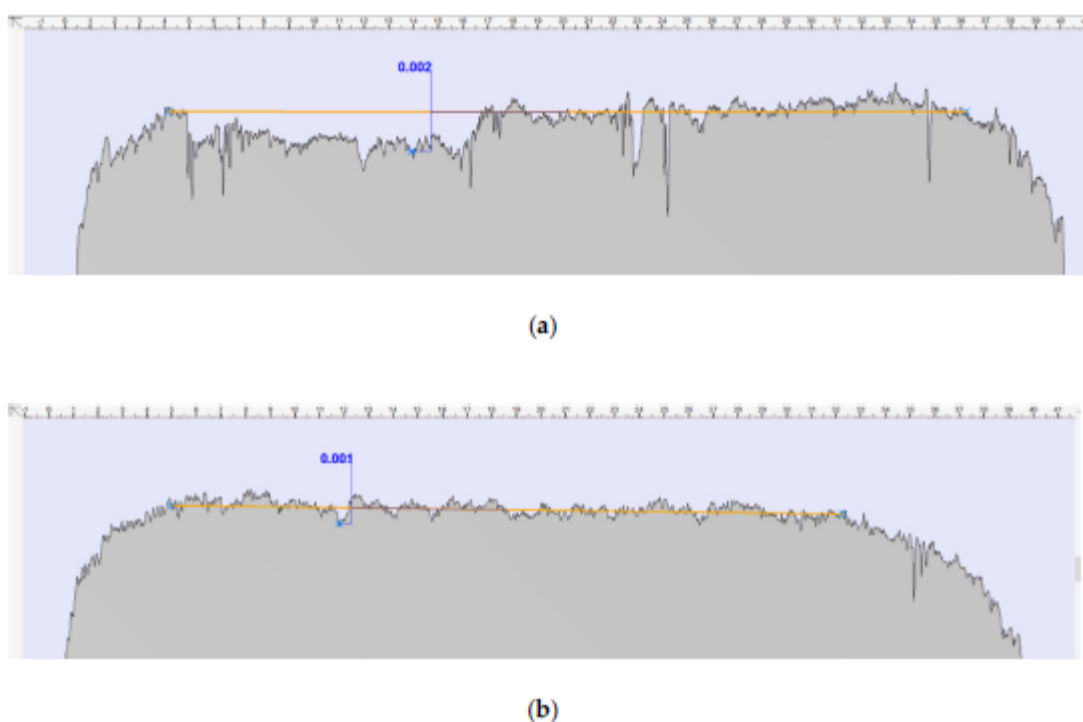


Figura 28. a) Prima misura del profilo del pattino (mm); b) Seconda misura del profilo del pattino (mm)

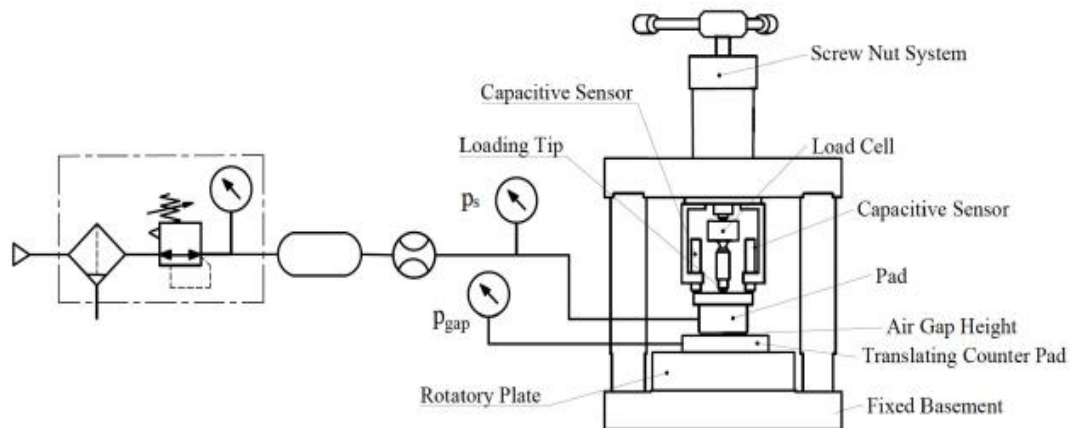


Figura 29. Schema del banco prova utilizzato per misurare le caratteristiche statiche e la curva di pressione del meato di cuscinetto

Le prove sperimentali sono state condotte con diverse pressioni di alimentazione (p_s^{rel} pari a 0.41, 0.51 e 0.61 MPa) e imponendo il carico esterno applicato; la scelta di imporre il carico anziché l'altezza del meato è stata dettata dalla maggiore ripetibilità di questo approccio nelle sessioni di test. Sfruttando l'assialsimmetria del problema, il profilo di pressione, di cui un esempio viene riportato in Figura 30, è stato rilevato lungo la sola direzione radiale r . La densità dei punti di acquisizione è stata incrementata in prossimità del centro del pattino per catturare con maggiore dettaglio i gradienti di pressione più elevati. Per ogni punto della scansione sono stati acquisiti simultaneamente la coordinata radiale, la pressione locale, la portata d'aria, il carico e l'altezza del meato.

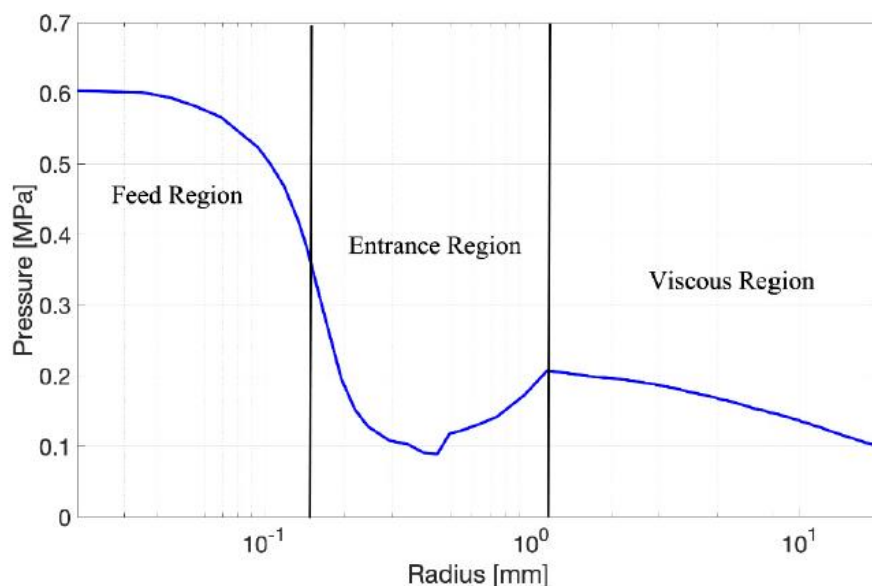


Figura 28. Esempio di profilo di pressione misurato ($p_s^{rel}=0.61$ MPa; $\bar{F}_{exp}=30$ N)

Il metodo di identificazione proposto è di tipo ibrido, poiché sfrutta i dati sperimentali relativi ai profili di pressione misurati nella regione viscosa e le equazioni analitiche per i pattini aerostatici circolari ad alimentazione centrale. Come mostrato in precedenza, il profilo di pressione può essere suddiviso teoricamente in tre zone: regione di alimentazione, regione di ingresso e regione viscosa. L'approccio si basa sulla consapevolezza che la regione viscosa rappresenti la porzione di gran lunga più estesa del meato e che al suo interno i modelli di flusso laminare e isoterma siano in grado di fornire previsioni

estremamente accurate. Sulla base di queste considerazioni, l'intuizione degli autori è stata quella di combinare i rilievi sperimentali con le espressioni analitiche della portata e della forza ottenute per un fluido laminare e isoterma.

L'identificazione viene condotta applicando in parallelo due diverse varianti della procedura, denominate rispettivamente un metodo analitico puntuale e un metodo analitico medio. Nel primo approccio, il calcolo dell'altezza numerica del meato, della pressione all'orifizio viene ripetuto per ogni singolo punto acquisito sperimentalmente nella regione viscosa, permettendo di valutare localmente la coerenza tra il modello e la misura. Nel secondo approccio, si opera invece su una sintesi dei dati, utilizzando i valori medi di portata e forza rilevati nell'intera regione di interesse. Una volta individuati i parametri ottimali (pressione al bordo dell'orifizio calcolata, altezza del meato calcolata, portanza calcolata e portata d'aria sperimentale) che minimizzano l'errore relativo rispetto al carico misurato sperimentalmente dalla cella di carico, il coefficiente di efflusso c_d viene ricavato dal rapporto tra la portata reale e quella teorica dell'espansione isoentropica nel restrittore, secondo la formula:

$$c_d = \frac{G_{exp}^*}{G_{th}}$$

Tale confronto permette infine di mappare il comportamento dell'orifizio sia per la compensazione intrinseca (*inherent compensation*) che per quella dell'orifizio (*orifice compensation*), fornendo una caratterizzazione completa del componente; la distinzione tra i due casi dipende dall'area della sezione di passaggio utilizzata per il calcolo della portata teorica G_{th} , identificata rispettivamente nell'area anulare del meato $2\pi R_o h$ (per *inherent compensation*, ottenendo c_{da} o nell'area del foro di alimentazione πR_o^2 (per *orifice compensation*, ottenendo c_{dc}).

I risultati ottenuti tramite le due varianti del metodo ibrido sono stati confrontati per entrambi i tipi di compensazione. La Figura 31 illustra l'andamento del coefficiente c_{dc} in funzione del rapporto tra l'altezza del meato e il diametro del foro (h/d). Si osserva che i dati presentano una dispersione estremamente ridotta, confermando la precisione della procedura di identificazione. Dall'analisi delle curve è possibile osservare come c_{dc} non sia influenzato in modo significativo dalla pressione di

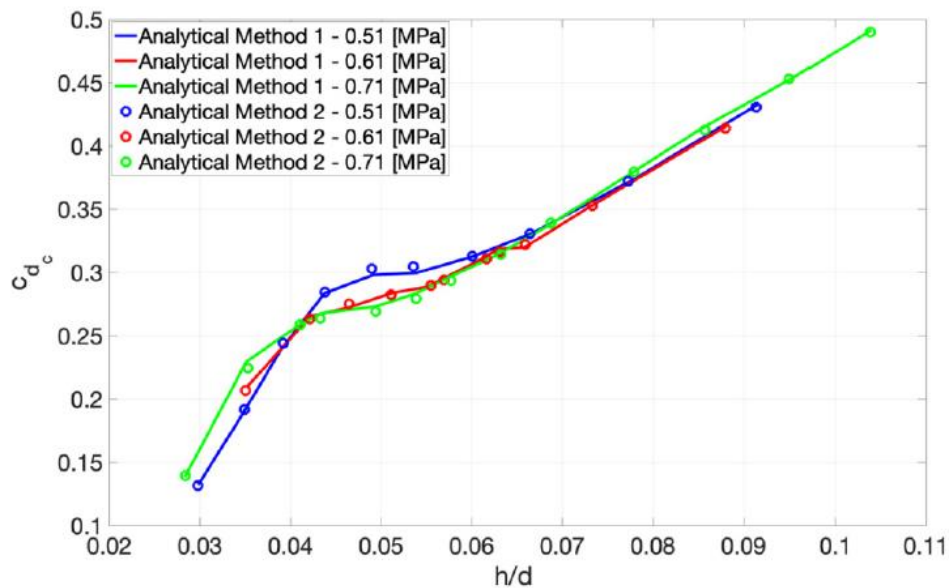


Figura 29. Andamento di c_{dc} in funzione del rapporto tra altezza del meato e diametro dell'orifizio per diverse pressioni di alimentazione.

alimentazione.

Per quanto riguarda il coefficiente c_{da} , la Figura 32 mostra il suo andamento in funzione del numero di Reynolds. Coerentemente con quanto riportato in letteratura, il coefficiente inizialmente cresce al crescere del numero di Reynolds fino a raggiungere un valore massimo, per poi tendere asintoticamente all'unità.

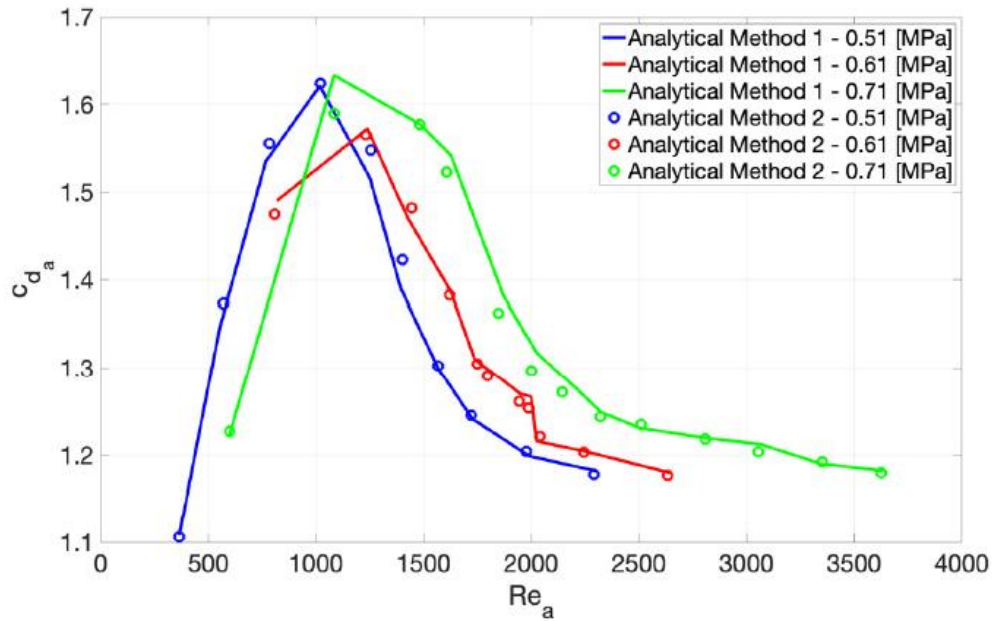


Figura 30. Andamento di c_{da} in funzione del numero di Reynolds per diverse pressioni di alimentazione

A differenza di c_{dc} , l'andamento di c_{da} mostra una lieve dipendenza dalla pressione di alimentazione: all'aumentare della pressione, le curve subiscono uno slittamento verso destra. Questo comportamento suggerisce che la transizione tra i regimi di flusso all'ingresso del meato sia influenzata non solo dalla geometria, ma anche dai parametri termofluidodinamici dell'aria alimentata.

Il confronto tra i risultati ottenuti con i metodi di identificazione proposti e quelli della caratterizzazione statica (Figura 33 e Figura 34) mostra un ottimo accordo per quanto riguarda la capacità di carico e il consumo d'aria; tuttavia, si riscontra una sistematica sovrastima dei valori dell'altezza del meato h .

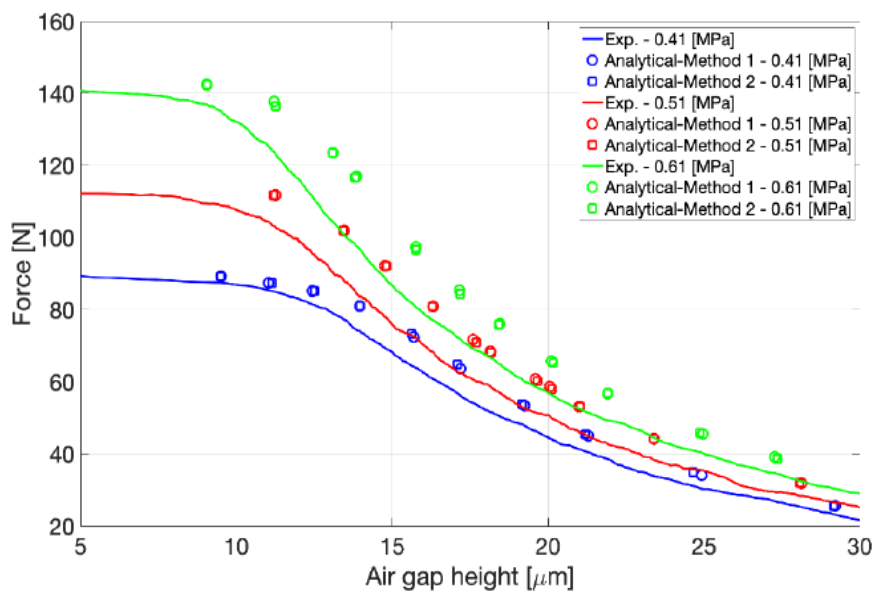


Figura 31. Grafico di confronto tra i risultati dei metodi analitici e i valori sperimentali di forza

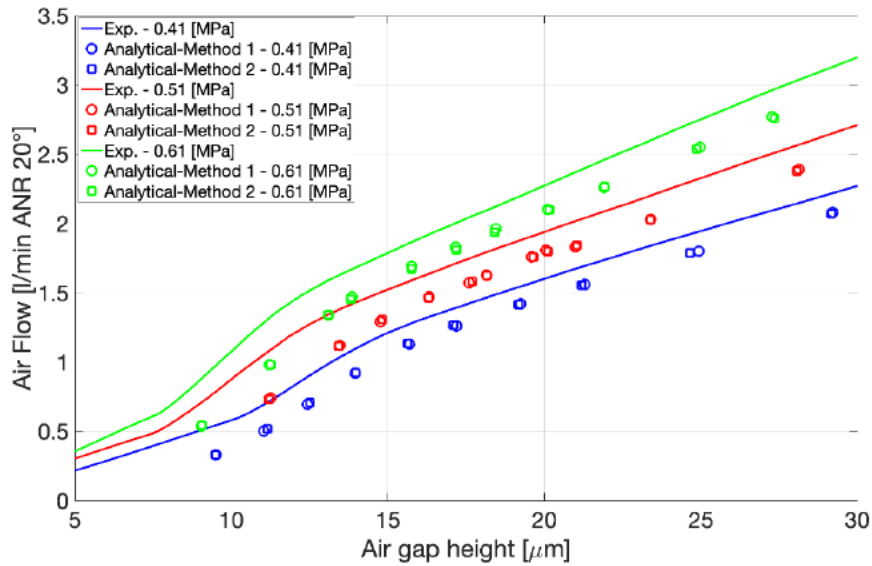


Figura 32. Grafico di confronto tra i risultati dei metodi analitici e i valori sperimentali di portata

Tale discrepanza può essere ricondotta ai difetti di planarità del pattino e del contropattino analizzati precedentemente tramite l'uso del profilometro. In presenza di superfici non perfettamente piatte, il comportamento fluidodinamico del cuscinetto non è più descrivibile tramite l'altezza del meato misurata direttamente, ma deve essere analizzato considerando un'altezza di meato equivalente. Per verificare questa ipotesi, le curve analitiche sono state traslate di un fattore correttivo δ (pari a $1,5 \mu\text{m}$ per $p_s=0,41 \text{ MPa}$ e a $2 \mu\text{m}$ per le pressioni superiori). Come evidenziato nelle Figure 35 e 36, l'applicazione di questo shift permette alle curve teoriche di sovrapporsi quasi perfettamente ai dati sperimentali. Questo risultato conferma che la sovrastima riscontrata non sia imputabile a un limite del modello ibrido proposto, ma sia dovuto agli errori di forma delle superfici reali di pattino e contropattino. Tale evidenza valida ulteriormente l'efficacia del metodo di identificazione, dimostrando come l'accuratezza del modello sia garantita una volta compensati gli scostamenti geometrici intrinseci dei componenti del banco.

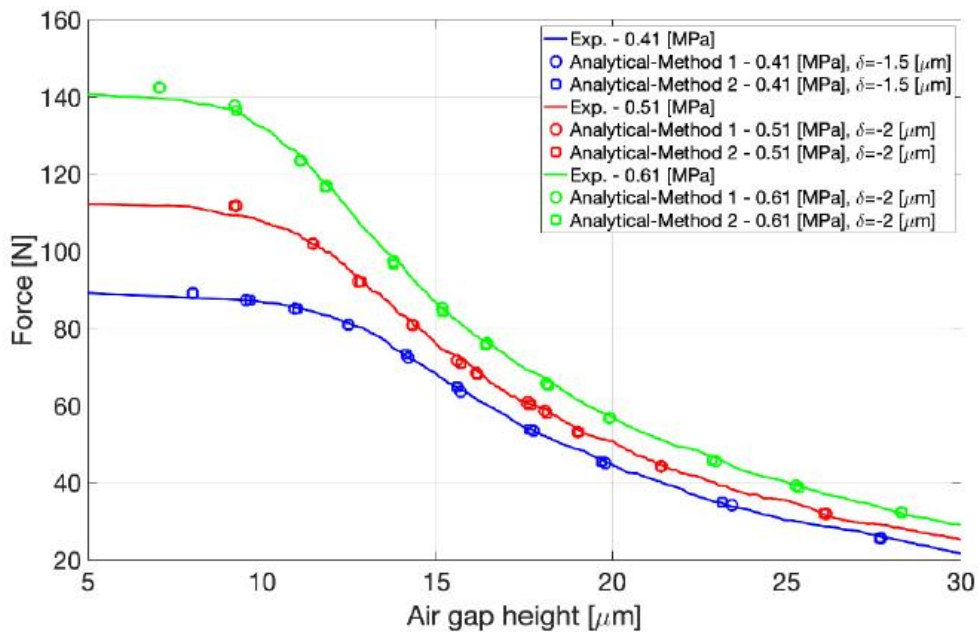


Figura 33. Grafico di confronto tra i risultati dei metodi analitici e i valori sperimentali di forza utilizzando la definizione di altezza di meato equivalente

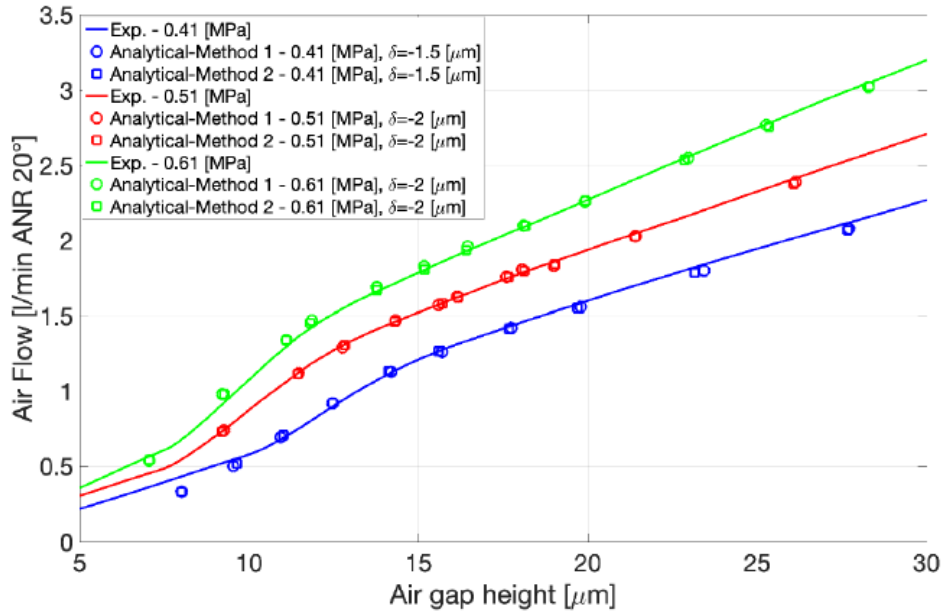


Figura 34. Grafico di confronto tra i risultati dei metodi analitici e i valori sperimentali di portata utilizzando la definizione di altezza di meato equivalente

2.4.1.9 Fatahi-Alkouhi et al.- Calcolo C_d con intelligenza artificiale in applicazioni idrauliche

Parallelamente agli approcci analitici e semi-empirici utilizzati per i cuscinetti aerostatici descritti in precedenza, la ricerca recente nel campo della fluidodinamica ha esplorato l'uso di tecniche di Intelligenza Artificiale per la stima del coefficiente di efflusso in geometrie complesse [6]. Un esempio significativo è rappresentato dallo studio in ambito idraulico sugli stramazzi semicilindrici modificati (Modified Semi-Cylindrical Weirs o MSCW) che presentano una geometria caratterizzata da una cresta semicilindrica e una rampa tangenziale sul profilo di valle, visibili in Figura 37, per i quali il calcolo del C_d è stato affrontato mediante diversi algoritmi di Machine Learning (ANN, MARS, M5 Model Tree, LWPR, SWM)[9].

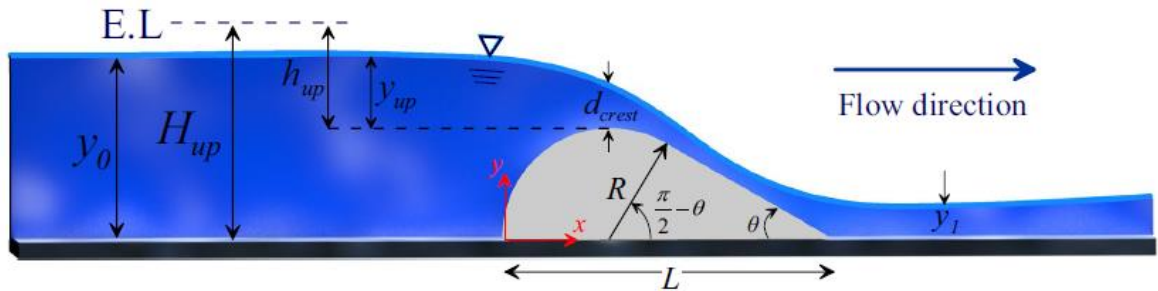


Figura 35. Schema degli stramazzi semicilindrici modificati oggetto di studio

La necessità di ricorrere a un approccio “data-driven” scaturisce dai limiti intrinseci della modellazione analitica tradizionale. In presenza di fenomeni fisici altamente complessi, le equazioni fisiche faticano a descrivere in modo accurato il sistema, oppure richiedono simulazioni numeriche estremamente onerose in termini di tempo e capacità di calcolo. In questo scenario, l'intelligenza artificiale si propone come un'alternativa strategica: invece di risolvere laboriosi sistemi di equazioni per ogni singola configurazione geometrica o di lavoro del sistema, l'algoritmo apprende le correlazioni tra le variabili direttamente dai risultati sperimentali. Ciò permette di ottenere stime del C_d quasi istantanee e con un'elevata precisione, trasformando un problema computazionalmente dispendioso in uno strumento di progettazione rapido e flessibile.

Il processo ha inizio con una fase di campionamento in cui viene costruito un dataset attraverso test sperimentali in un canale idraulico, variando sistematicamente il raggio della cresta e l'angolo della rampa posteriore per coprire un ampio spettro di configurazioni geometriche i cui modelli fisici sono visibili in Figura 38.

Al fine di isolare le variabili indipendenti più significative, viene applicata una procedura di selezione tramite il Gamma Test; questo passaggio è fondamentale per identificare quali parametri influenzino realmente il coefficiente di efflusso, eliminando le informazioni ridondanti che renderebbero il calcolo inutilmente oneroso. Nello specifico, l'analisi ha rivelato che il parametro dominante nella determinazione del C_d sia il rapporto adimensionale tra il carico idraulico a monte (y_{up}) e il raggio della cresta (R), mentre l'inclinazione della rampa ha mostrato un'influenza decisamente più marginale.



Figura 36. Modelli di laboratorio utilizzati in fase di test

Una volta isolati i parametri critici, il dataset viene ripartito tra una fase di addestramento (*training*), in cui l'algoritmo apprende le correlazioni non lineari del sistema, e una fase di verifica (*testing*) su dati indipendenti. Il cuore del metodo risiede nel confronto tra diverse architetture algoritmiche per individuare quale struttura matematica sia in grado di mappare meglio la complessa fluidodinamica introdotta dalla rampa. Il procedimento si conclude con una validazione statistica basata sul coefficiente di determinazione R^2 , che ne certifica l'accuratezza predittiva, dimostrando come il modello sia in grado di emulare il comportamento reale del fluido con uno scarto minimo rispetto ai dati di laboratorio.

In questo contesto di complesse correlazioni non lineari, il confronto tra le diverse architetture di intelligenza artificiale ha eletto il modello LWPR (Locally Weighted Polynomial Regression) come il più performante, di cui i risultati sono riportati in Figura 39. Grazie alla sua capacità di adattare funzioni polinomiali alle variazioni locali dei dati, questo modello ha raggiunto un coefficiente di determinazione $R^2 = 0,98$ e il più alto Indice di Performance PI, dimostrando una precisione superiore nel replicare la fisica del fenomeno rispetto a tutte le altre configurazioni testate.

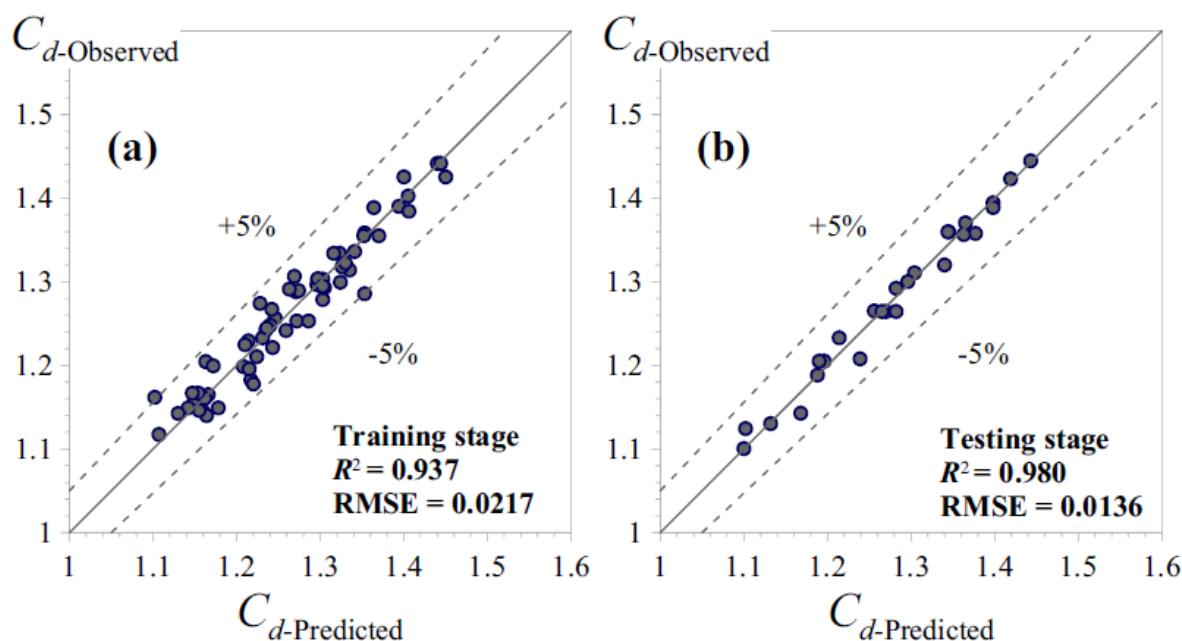


Figura 37. confronto tra i valori di C_d misurati sperimentalmente e ottenuti con il modello LWPR in fase di training e di testing

In conclusione, l'adozione di modelli basati sul Machine Learning si è dimostrata una strategia vincente, capace di superare sia i limiti di accuratezza delle equazioni empiriche, sia l'elevato onere computazionale richiesto dalle simulazioni numeriche CFD. Grazie alla capacità di fornire stime istantanee e altamente affidabili, questo approccio si propone come uno strumento d'eccellenza per la progettazione ingegneristica, garantendo un equilibrio ottimale tra precisione statistica e applicabilità pratica. Sebbene questo studio specifico individui nel modello LWPR la soluzione più performante, è la solidità dell'intero metodo di lavoro a rimanere un riferimento anche per l'analisi di diversi sistemi, tra cui quelli dei cuscinetti aerostatici: il passaggio dall'individuazione delle variabili dominanti alla gestione delle non-linearità tramite algoritmi guidati dai dati rappresenta un approccio metodologico universale, capace di adattarsi a diversi contesti fisici individuando di volta in volta l'architettura computazionale migliore.

2.4.2 Micro-vibrazioni

Lo studio dei coefficienti di scarico ha evidenziato lo stretto legame che intercorre tra l'estensione della zona di depressione all'interno del meato e l'insorgenza dell'effetto 'pneumatic hammer'. Tale fenomeno si manifesta attraverso micro-vibrazioni, ovvero oscillazioni a scala nanometrica che possono compromettere significativamente la precisione di posizionamento in applicazioni di ultra-precisione, come macchine utensili o sistemi di metrologia. Sebbene la ricerca su questo aspetto sia ancora in evoluzione e non esista un consenso unanime sui meccanismi causativi, i due contributi seguenti forniscono importanti spunti sulla fisica sottostante e sui possibili metodi di investigazione.

2.4.2.1 Chen et al. (2010) - Vorticità dell'aria e nano-vibrazioni

Al fine di garantire le tolleranze di posizionamento nanometriche richieste dall'industria dei semiconduttori e dalle macchine utensili di ultra-precisione, questo studio affronta il problema delle nano-vibrazioni indotte nei cuscinetti aerostatici [10]. Il procedimento si focalizza sull'analisi del campo di moto all'interno delle tasche, identificando nei vortici d'aria la causa primaria dell'instabilità dinamica del sistema. Lo schema di lavoro integra una fase di modellazione numerica, tramite la risoluzione delle equazioni complete di Navier-Stokes per fluidi comprimibili, con una fase di validazione sperimentale delle nano-vibrazioni.

L'insufficienza dell'equazione di Reynolds nel catturare i dettagli del campo di moto, specialmente in presenza delle turbolenze che si generano all'uscita del restrittore, ha richiesto la risoluzione delle equazioni complete di Navier-Stokes per flussi stazionari e comprimibili. Il modello numerico, implementato in ambiente FLUENT e semplificato grazie alla simmetria assiale del sistema, ha permesso di mappare il comportamento del fluido per diverse configurazioni di cuscinetto: sono state analizzate geometrie prive di tasca, con tasca cilindrica e con tasca sferica illustrate in (Figura 40). Lo studio ha previsto la variazione sistematica di parametri geometrici e funzionali, tra cui la profondità e il diametro della tasca, il diametro del foro di restrizione e la pressione di alimentazione dell'aria, al fine di quantificare il loro impatto sul campo di moto e sulle nano-vibrazioni generate.

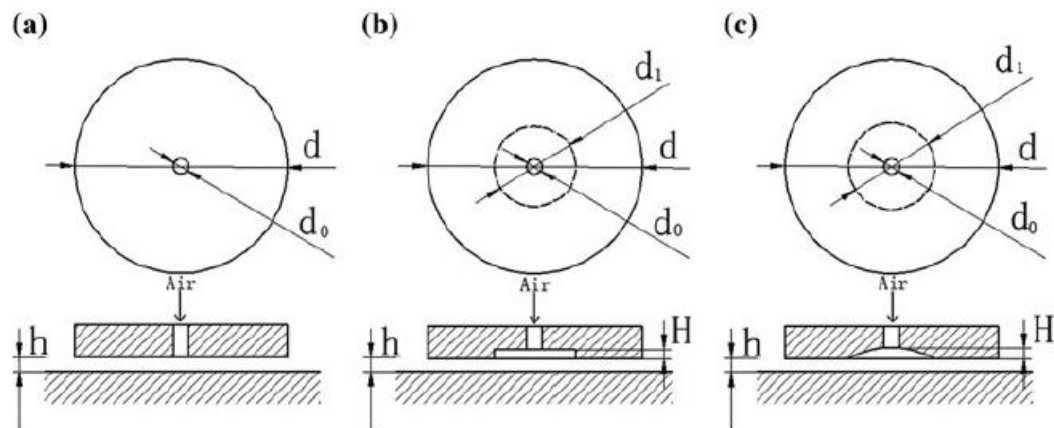


Figura 38. Tipologie di cuscinetto oggetto di studio: a) senza tasca; b) con tasca cilindrica; c) con tasca sferica

Al fine di chiarire la relazione tra il campo di moto e il comportamento dinamico del sistema, l'indagine numerica è stata affiancata da una caratterizzazione sperimentale delle vibrazioni verticali del cuscinetto. Il setup di misura è stato isolato dalle interferenze ambientali mediante l'impiego di una piattaforma antivibrante, garantendo il parallelismo del sistema attraverso l'uso di sensori di spostamento per il monitoraggio costante del meato d'aria. Il controllo dei parametri operativi è stato affidato a una valvola proporzionale ad alta sensibilità per la regolazione della pressione di alimentazione, mentre l'acquisizione dei segnali di accelerazione è stata effettuata tramite un accelerometro di precisione. Tale configurazione sperimentale ha permesso di ottenere dati accurati sulle nano-vibrazioni, fondamentali per confermare la correlazione tra la forza dei vortici calcolata numericamente e l'effettiva risposta dinamica del componente.

L'accuratezza dei risultati numerici è stata preliminarmente validata integrando la pressione calcolata sulla superficie inferiore del cuscinetto e confrontando la capacità di carico ottenuta con i dati sperimentali in funzione del meato d'aria, riscontrando un'ottima corrispondenza. La visualizzazione dei campi di velocità, riportata in Figura 41, evidenzia come la geometria della tasca sia il fattore determinante per la stabilità fluidodinamica: nei modelli con tasca cilindrica e sferica si osserva la chiara formazione di vortici d'aria in prossimità dell'uscita del restrittore, causati dall'improvvisa espansione della sezione di passaggio e dal distacco della vena fluida dalla parete. Al contrario, i cuscinetti privi di tasca non mostrano la formazione di vortici, poiché l'estremo confinamento del film d'aria costringe il flusso a rimanere aderente alle pareti.

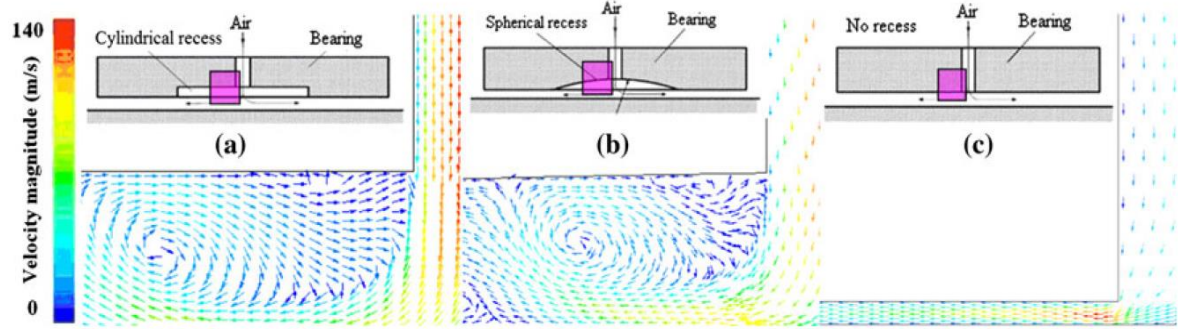


Figura 39. Campi di moto dell'aria simulati numericamente in prossimità dell'uscita del restrittore per diverse morfologie della tasca: (a) tasca cilindrica, (b) tasca sferica, (c) assenza di tasca con pressione di alimentazione pari a 3 bar

Le indagini sperimentali sulle accelerazioni verticali confermano che l'intensità delle nano-vibrazioni è direttamente correlata alla morfologia della tasca, come osservabile dal confronto in Figura 42: le vibrazioni risultano infatti massime nella geometria cilindrica, parzialmente ridotte in quella sferica e minime nei cuscinetti privi di tasca. È stato inoltre osservato che l'ampiezza vibrazionale aumenta proporzionalmente alla pressione di alimentazione e al diametro del foro, mentre decresce al ridursi della profondità della tasca. La forza dei vortici, caratterizzata dal calo di pressione tra il bordo e il centro del vortice stesso, quantificabile dalle mappe di pressione del meato come quella di Figura 43, si è rivelata il parametro chiave per descrivere il fenomeno delle nano-vibrazioni, stabilendo una correlazione univoca tra le strutture turbolente individuate numericamente e la risposta dinamica del sistema misurata sperimentalmente.

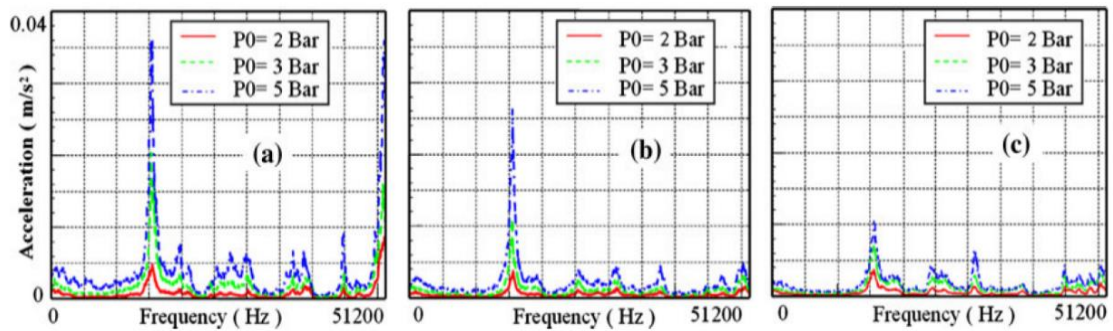


Figura 40. Accelerazione vibrazionale del cuscinetto nel dominio della frequenza per differenti valori della pressione di alimentazione e diverse morfologie della tasca: (a) tasca cilindrica, (b) tasca sferica, (c) assenza di tasca.

Questo studio evidenzia quindi come la presenza di vortici d'aria all'interno delle tasche sia la causa scatenante delle nano-vibrazioni, rappresentando un limite tecnico per l'impiego dei cuscinetti aerostatici in macchine utensili e strumenti di metrologia a precisione sub-nanometrica. Sebbene le configurazioni prive di tasca eliminino tali vortici, la loro scarsa rigidezza e limitata capacità di carico ne precludono l'uso in questi stessi ambiti. La sfida progettuale risiede dunque nella necessità di sopprimere o mitigare queste instabilità fluidodinamiche per ottimizzare la stabilità del sistema, obiettivo fondamentale per l'ulteriore incremento della precisione di posizionamento dei sistemi aerostatici.

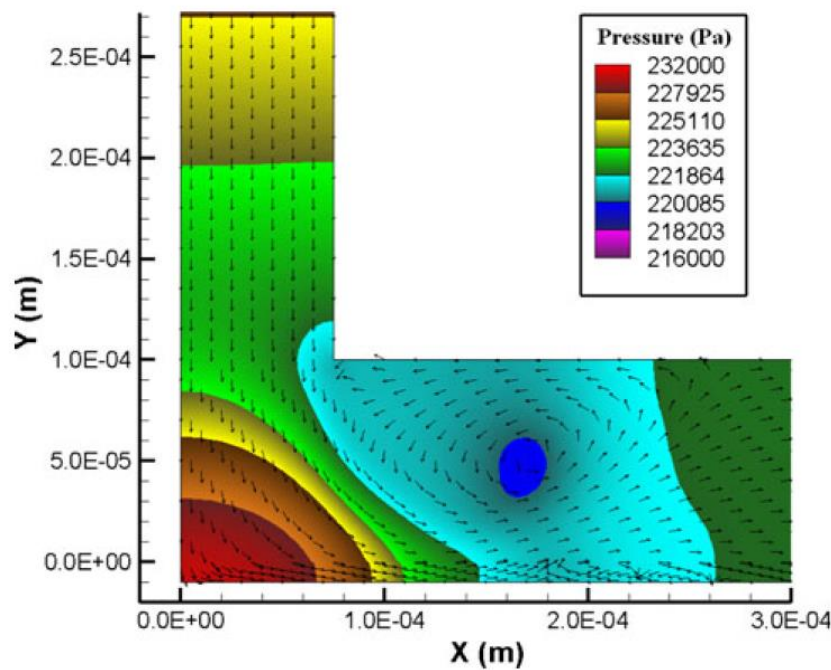


Figura 41. Mappa di pressione nella tasca cilindrica. Profondità della tasca $H = 0.1$ mm, diametro della tasca $d_1 = 0.15$ mm. Le frecce indicano i vettori della velocità del flusso

2.4.2.2 Cheng et al. (2024) - Meccanismo di micro-vibrazione mediante LES e POD

L'impiego dei cuscinetti aerostatici in ambiti di ultra-precisione è motivato dalle loro eccellenti proprietà di attrito quasi nullo e alta precisione di posizionamento. Tuttavia, l'insorgere di micro-vibrazioni nell'ordine dei nanometri rappresenta una sfida critica per la stabilità operativa di tali sistemi. Queste oscillazioni sono riconducibili a fenomeni fluidodinamici complessi che si manifestano quando il gas ad alta pressione viene immesso nel meato, quali il distacco di vortici (*vortex shedding*) e onde d'urto che interagiscono con lo strato limite. Tali instabilità inducono fluttuazioni di pressione sulla superficie del cuscinetto le quali, innescando micro-vibrazioni dell'ordine dei nanometri, ne pregiudicano la stabilità dinamica e la precisione operativa [11].

Il campo di moto è stato modellato attraverso l'approccio LES (*Large Eddy Simulation*), risolvendo direttamente le turbolenze macroscopiche del flusso e affidando alla modellazione numerica il calcolo di quelle con dimensione inferiore alla scala di misura. La stabilità della soluzione numerica è garantita da schemi di discretizzazione del secondo ordine per la variabile temporale. Per isolare le strutture coerenti dal rumore stocastico della turbolenza, è stata impiegata la tecnica POD (*Proper Orthogonal Decomposition*). Tale metodo decompone il campo di moto transitorio in una serie di modi ortogonali, ordinati in base al loro contenuto energetico. Mentre i modi spaziali (u) identificano la morfologia delle strutture turbolente dominanti, i relativi coefficienti temporali (a) ne descrivono l'evoluzione dinamica, permettendo di correlare specifiche frequenze di distacco dei vortici con le micro-vibrazioni del cuscinetto. Oltre a operare una drastica riduzione della mole di dati, la POD isola i pattern fisici dominanti rendendo i risultati della simulazione più immediati e semplici da interpretare.

La configurazione analizzata consiste in un cuscinetto aerostatico anulare con dodici fori con tasca, riportato in Figura 44. Al fine di limitare il costo di calcolo, è stato modellato un solo dodicesimo dell'intera struttura; tale settore, ampio 30° , è stato isolato imponendo opportune condizioni di simmetria lungo i bordi radiali del dominio.

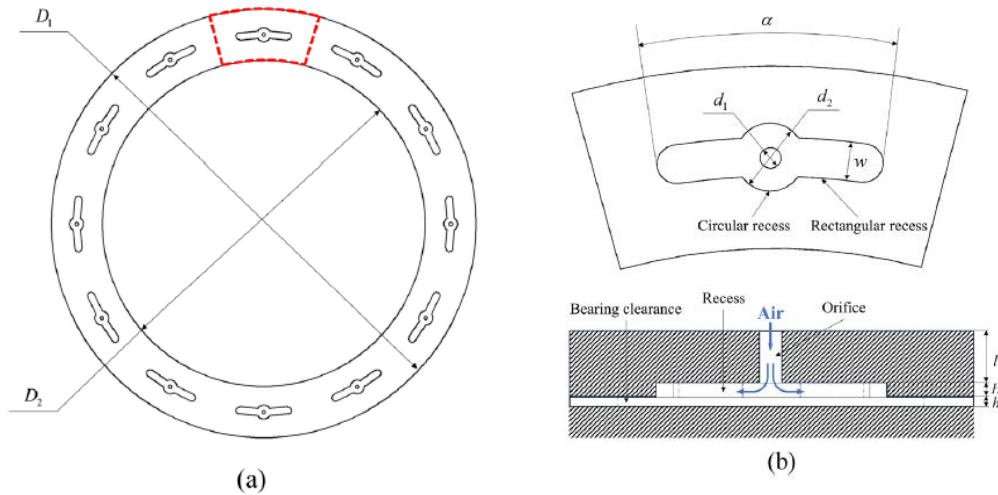


Figura 42. a) Schema del cuscinetto oggetto di studio; b) Dettaglio di un settore del cuscinetto utilizzato come dominio delle simulazioni.

La simulazione LES è stata impostata con una discretizzazione spaziale e un passo temporale ottimizzati per garantire la cattura dei fenomeni transitori ad alta frequenza. La validazione del modello, effettuata confrontando la distribuzione media di pressione con dati sperimentali, ha confermato la capacità della LES di individuare correttamente le zone di depressione provocate dalle strutture vorticosi locali, in accordo con il grafico dei risultati in Figura 45.

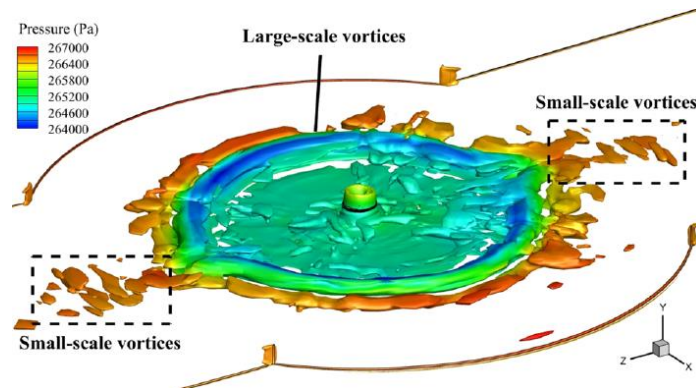


Figura 43. Esempio di risultato delle simulazioni LES alla pressione di alimentazione di $P_s=0,4$ MPa.

L'analisi dei risultati evidenzia una netta correlazione spettrale tra le frequenze di vibrazione del cuscinetto e i coefficienti temporali dei primi modi POD con più energia, di cui il primo è rappresentato in Figura 46. In particolare, è stato identificato che le micro-vibrazioni sono indotte da vortici a grande scala che si generano nella tasca del restrittore a causa degli effetti di espansione e taglio del flusso. Al crescere della pressione di alimentazione, tali strutture diventano più intense e instabili, portando a fluttuazioni di pressione più severe e a uno spostamento delle frequenze dominanti.

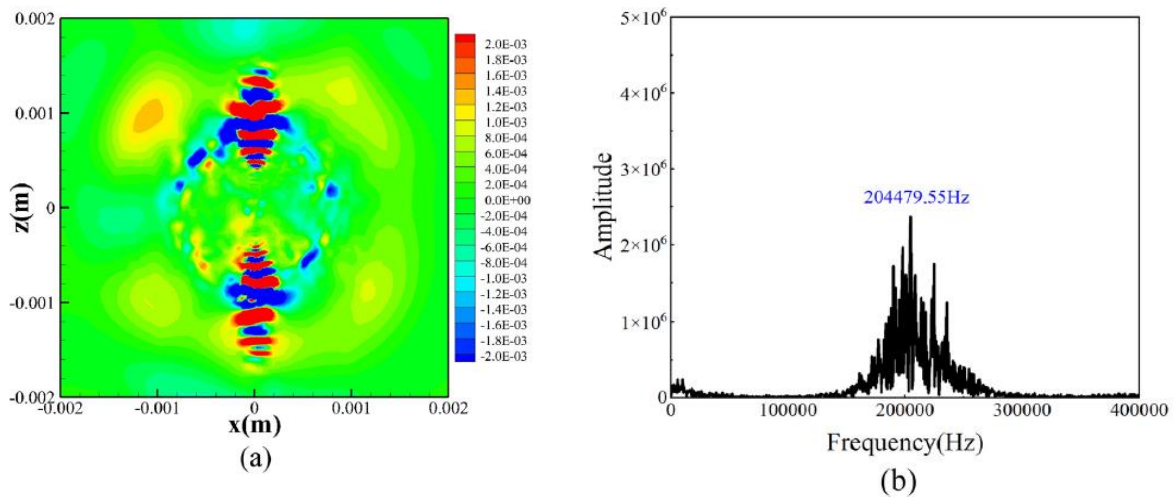


Figura 44. a) Distribuzione spaziale del decimo modo ottenuto con la tecnica POD alla pressione di alimentazione $P_s=0,4$ MPa; b) Coefficienti temporali del decimo modo ottenuto con la tecnica POD alla pressione di alimentazione $P_s=0,4$ MPa

Oltre alle instabilità a bassa frequenza, l'analisi POD ha isolato fluttuazioni di pressione ad alta frequenza (tra 200 kHz dots 1,3 MHz) associate a strutture turbolente di piccola scala con minore energia, delle quali si riporta a titolo di esempio il nono modo in Figura 47. Tali fenomeni sono riconducibili ai processi di convezione e taglio locale: all'aumentare della pressione di alimentazione, l'incremento della velocità del gas all'uscita dell'orifizio innesca instabilità nel campo delle alte frequenze (oltre 1 MHz). Tali fluttuazioni, localizzate nel range degli ultrasuoni, sono il segnale di un regime turbolento estremamente intenso e concentrato in prossimità dello sbocco del restrittore.

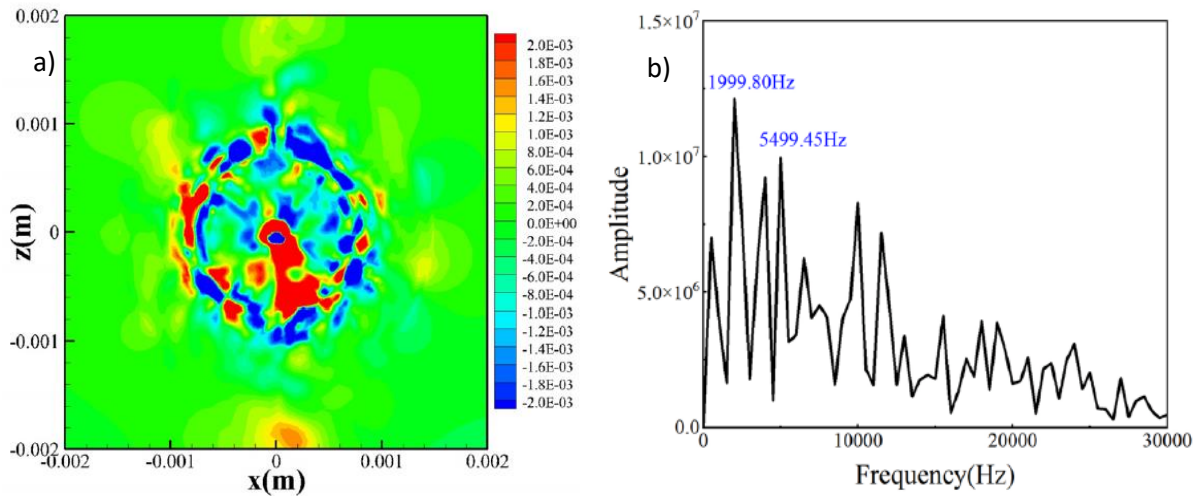


Figura 45. a) Distribuzione spaziale del primo modo ottenuto con la tecnica POD alla pressione di alimentazione $P_s=0,4$ MPa; b) Coefficienti temporali del primo modo ottenuto con la tecnica POD alla pressione di alimentazione $P_s=0,4$ MPa

In definitiva, questo studio dimostra come la stabilità di un cuscinetto aerostatico sia governata da una complessa gerarchia di strutture vorticosi: mentre i vortici a grande scala guidano le micro-vibrazioni meccaniche a bassa frequenza, le instabilità ultrasoniche che emergono ad alte pressioni testimoniano un regime turbolento locale ad alta intensità e frequenza.

3 Strumentazione e metodologia sperimentale

In questo capitolo viene presentato l'apparato sperimentale e l'insieme delle metodologie impiegate per la caratterizzazione dei pattini pneumostatici oggetto di indagine. L'attività di ricerca è stata strutturata

secondo un approccio metodologico che integra l'analisi morfologica dei componenti con la verifica funzionale delle loro prestazioni fluidodinamiche.

In una prima fase, l'attenzione è stata rivolta alla valutazione metrologica delle superfici e delle geometrie degli orifizi di alimentazione. Attraverso l'impiego del microscopio ottico, è stato possibile misurare con precisione i diametri reali dei restrittori, permettendo un confronto diretto con i valori nominali di progetto. Parallelamente, l'utilizzo del profilometro ha consentito di determinare la rugosità e la geometria della superficie attiva del cuscinetto, le quali influenzano significativamente il comportamento del flusso d'aria nel meato. Successivamente, l'indagine si è spostata sulla caratterizzazione sperimentale delle dei cuscinetti mediante l'utilizzo di un banco prova dedicato. Tale sistema ha permesso di quantificare le prestazioni statiche dei cuscinetti in diverse condizioni operative, al fine di determinare i relativi coefficienti di efflusso.

3.1 Pattini pneumostatici

I pattini analizzati in questo studio sono di tipo circolare e presentano un singolo foro di alimentazione centrale. La superficie attiva risulta priva di tasche o scanalature, configurazione osservabile dal disegno riportato in Figura 48.

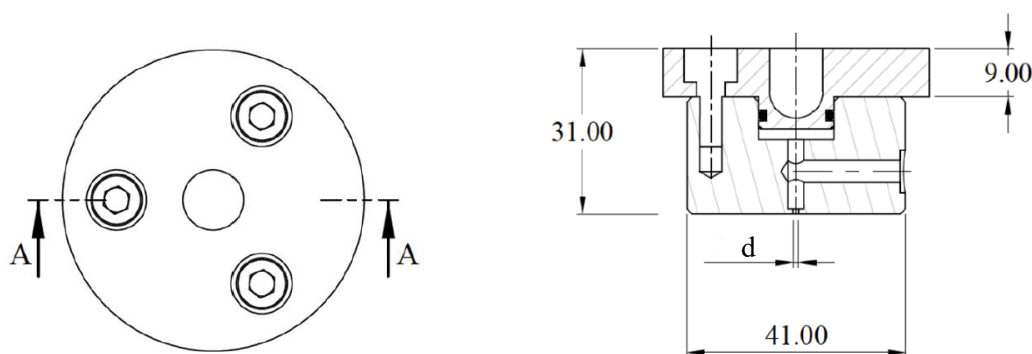


Figura 46. Disegno dei cuscinetti utilizzati

Per ottimizzare il processo produttivo e garantire la precisione delle lavorazioni interne, i pattini sono stati realizzati mediante l'assemblaggio di due componenti distinti: il corpo principale e il coperchio di chiusura.

Il corpo principale ospita il condotto di alimentazione e l'orifizio calibrato. Nella parte superiore è stata ricavata una sede cilindrica destinata ad accogliere il coperchio. L'accoppiamento tra i due elementi è garantito da tre viti di fissaggio, mentre la tenuta pneumatica è assicurata da un O-ring interposto, che impedisce trafilamenti d'aria. Il coperchio superiore, inserito nell'alloggiamento cilindrico, presenta sulla faccia superiore una sede semisferica che funge da punto di contatto per l'applicazione del carico assiale durante le prove al banco, garantendo il parallelismo tra il pattino e il contropattino.

I cuscinetti usati condividono gli ingombri principali esterni riportati nel disegno, mentre si differenziano per la forma della superficie attiva, il diametro dell'orifizio (d) e per il materiale con cui sono stati realizzati. Nello specifico, i cuscinetti sono stati realizzati in acciaio e alluminio, questi ultimi con un trattamento di anodizzazione dura superficiale riconoscibile per la caratteristica colorazione scura visibile in Figura 49. Le superfici attive si distinguono in piane e concave, mentre per quanto riguarda l'alimentazione, sono stati testati orifizi con diametri nominali pari a: 1 mm, 0.7 mm, 0.5 mm, 0.4 mm, 0.3 mm, 0.2 mm e 0.1 mm.



Figura 47. Fotografia di due cuscinetti completi di coperchio: versione in acciaio a sinistra e in alluminio con anodizzazione dura a destra.

Per ragioni di praticità e chiarezza nell'esposizione dei risultati, i cuscinetti sono stati nominati mediante delle sigle identificative che ne riassumono le principali caratteristiche geometriche e il materiale, i cui dettagli sono riportati in Tabella 1. È importante sottolineare che, mentre nelle sigle utilizzate per l'analisi dei dati viene esplicitato il materiale (acciaio o alluminio), le etichette apposte fisicamente sui campioni durante le prove ne omettono l'indicazione, essendo il materiale stesso facilmente distinguibile visivamente.

Tabella 1. Nomenclatura dei cuscinetti utilizzati per i test

ACCIAIO		ALLUMINIO			
PIATTI		PIATTI		CONCAVI	
ETICHETTA	SIGLA COMPLETA	ETICHETTA	SIGLA COMPLETA	ETICHETTA	SIGLA COMPLETA
P 100	M1_S1_D100	P 100	M2_S1_D100	C 100	M2_S2_D100
P 70	M1_S1_D70	P 70	M2_S1_D70	C 70	M2_S2_D70
P 50	M1_S1_D50	P 50	M2_S1_D50	C 50	M2_S2_D50
P 40	M1_S1_D40	P 40	M2_S1_D40	C 40	M2_S2_D40
P 30	M1_S1_D30	P 30	M2_S1_D30	C 30	M2_S2_D30
P 20	M1_S1_D20	P 20	M2_S1_D20	C 20	M2_S2_D20
P 10	M1_S1_D10	P 10	M2_S1_D10	C 10	M2_S2_D10

Le sigle complete elencate seguono la forma generale M(x)_S(y)_D(w)_(z), dove ogni termine definisce una specifica proprietà del componente secondo lo schema seguente:

- Materiale (x): identifica il materiale del corpo del cuscinetto. L'indice x=1 fa riferimento ai campioni in acciaio, mentre x=2 a quelli in alluminio.
- Superficie (y): specifica la geometria della superficie attiva. L'indice y=1 indica una superficie piana, mentre y=2 identifica una superficie concava.
- Diametro (w): indica il diametro nominale dell'orifizio di alimentazione espresso in centesimi di mm (ad esempio, w=40 per un foro da 0,4 mm)
- Indice libero (z): parametro utilizzato per distinguere diverse condizioni di analisi o sessioni di prova effettuate sul medesimo cuscinetto, garantendo la tracciabilità univoca dei dati acquisiti.
- Indice libero (z): è stato utilizzato in alcune prove sperimentali per identificare diverse condizioni di analisi sullo stesso cuscinetto

3.2 Microscopio ottico

Tutti i cuscinetti sono stati preliminarmente analizzati mediante l'impiego di un microscopio ottico equipaggiato con fotocamera digitale per l'acquisizione delle immagini, visibile in Figura 50, con l'obiettivo di documentare nel dettaglio la geometria dei fori di alimentazione. Per consentire un posizionamento accurato dei campioni, il microscopio è equipaggiato con una tavola traslante a due assi, dotata di comandi manuali a vite di precisione per la movimentazione micrometrica visibile nel dettaglio in Figura 50.

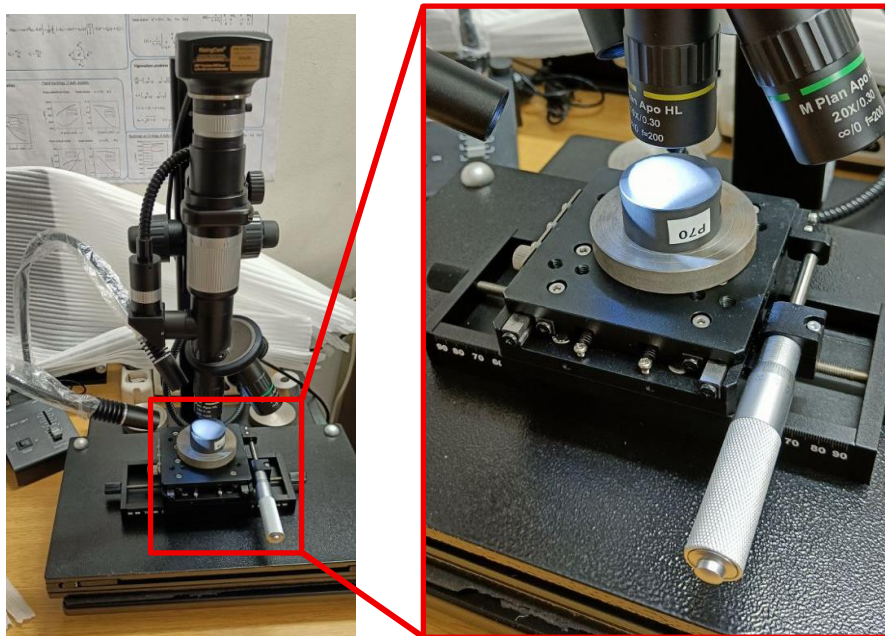


Figura 48. Fotografia del microscopio ottico utilizzato per le misure degli orifizi e dettaglio della tavola a doppio asse.

Al fine di garantire la massima visibilità dei dettagli dei fori, è stata impiegata una sorgente di illuminazione esterna orientata in modo da minimizzare riflessi e ombre indesiderate sulle superfici metalliche lappate. Le immagini così acquisite sono state successivamente elaborate attraverso un software di misurazione digitale, che ha permesso di determinare con estrema precisione i diametri effettivi dei restrittori per confrontarli con i dati nominali di progetto. Oltre alla quantificazione dimensionale, l'indagine al microscopio è stata fondamentale per valutare la qualità delle lavorazioni meccaniche, permettendo di individuare eventuali micro-difetti non visibili a occhio nudo, quali bave residue o irregolarità del bordo dei fori. Tali imperfezioni, riconducibili alla modalità di foratura eseguita tramite punta elicoidale, potrebbero infatti influenzare il comportamento cuscinetto e il regolare efflusso dell'aria nel meato, introducendo turbolenze o perdite di carico localizzate.

Le immagini così acquisite sono state elaborate tramite un software di misurazione digitale, consentendo di determinare con precisione i diametri effettivi dei restrittori e di confrontarli con i dati nominali di progetto. Per ogni campione, l'ingrandimento è stato selezionato in funzione del diametro nominale del restrittore: questa scelta ha permesso di ottenere immagini sempre nitide e proporzionate, facilitando la successiva fase di misurazione digitale e l'individuazione di eventuali micro-difetti superficiali. Nel dettaglio gli ingrandimenti utilizzati sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2. Ingrandimenti utilizzati per la misurazione degli orifizi con il microscopio ottico.

Diametro foro (mm)	Ingrandimento utilizzato
1	10x
0,7	10x
0,5	15x
0,4	20x
0,3	20x
0,2	25x
0,1	25x

Le fotografie così acquisite, di cui sono riportati alcuni esempi significativi in Figura 51, sono state analizzate digitalmente mediante una procedura di sovrapposizione geometrica. Nello specifico, al profilo reale del foro è stata sovrapposta una circonferenza ideale di *best-fit* che ne approssimasse con la massima fedeltà possibile il perimetro effettivo. Attraverso la determinazione del diametro di tale circonferenza, è stato possibile rilevare la dimensione reale del passaggio foro e confrontarla con il valore nominale di progetto. Questo confronto ha permesso di calcolare l'errore relativo di lavorazione per ogni restrittore, fornendo un dato quantitativo essenziale per interpretare eventuali scostamenti nelle prestazioni fluidodinamiche dei cuscinetti durante le successive prove sperimentali.

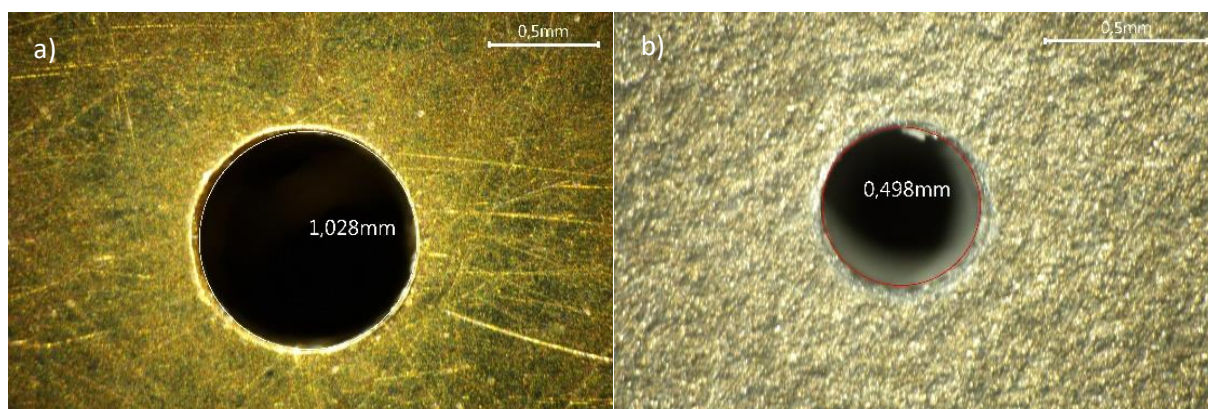


Figura 49. Fotografie al microscopio ottico dei cuscinetti: a) M1_S1_D100; b) M2_S1_D50

I risultati derivanti dall'elaborazione delle immagini sull'intero lotto di campioni sono raccolti nella Tabella 3, mentre la raccolta completa delle immagini acquisite è riportata nell' Appendice [A]. Al fine di valutare l'accuratezza delle lavorazioni meccaniche, la tabella pone a diretto confronto i diametri nominali di progetto con i valori effettivi rilevati, esplicitando per ciascun restrittore l'entità dello scostamento assoluto e il relativo errore percentuale.

Tabella 3. Tabella riassuntiva dei diametri misurati con il microscopio e relativi errori.

NOMENCLATURA	ACCIAIO PIATTI	D nominale (mm)	D misurato (mm)	scostamento (mm)	errore relativo
M1_S1_D100	P 100	1,000	1,028	0,028	2,80%
M1_S1_D70	P 70	0,700	0,722	0,022	3,14%
M1_S1_D50	P 50	0,500	0,660	0,160	32,00%
M1_S1_D40	P 40	0,400	0,482	0,082	20,50%
M1_S1_D30	P 30	0,300	0,375	0,075	25,00%
M1_S1_D20	P 20	0,200	0,237	0,037	18,50%
M1_S1_D10	P 10	0,100	0,115	0,015	15,00%
	ALLUMINIO PIATTI	D nominale (mm)	D misurato (mm)	scostamento (mm)	errore relativo
M2_S1_D100	P 100	1,000	1,015	0,015	1,50%
M2_S1_D70	P 70	0,700	0,708	0,008	1,14%
M2_S1_D50	P 50	0,500	0,498	-0,002	-0,40%
M2_S1_D40	P 40	0,400	0,425	0,025	6,25%
M2_S1_D30	P 30	0,300	0,348	0,048	16,00%
M2_S1_D20	P 20	0,200	0,196	-0,004	-2,00%
M2_S1_D10	P 10	0,100	0,110	0,010	10,00%
	ALLUMINIO CONCAVI	D nominale (mm)	D misurato (mm)	scostamento (mm)	errore relativo
M2_S2_D100	C 100	1,000	1,010	0,010	1,00%
M2_S2_D70	C 70	0,700	0,691	-0,009	-1,29%
M2_S2_D50	C 50	0,500	0,510	0,010	2,00%
M2_S2_D40	C 40	0,400	0,433	0,033	8,25%
M2_S2_D30	C 30	0,300	0,291	-0,009	-3,00%
M2_S2_D20	C 20	0,200	0,211	0,011	5,50%
M2_S2_D10	C 10	0,100	0,114	0,014	14,00%

3.3 Profilometro

3.3.1. Strumentazione e procedura di misura

Per l'analisi quantitativa della finitura superficiale e della geometria delle facce attive dei cuscinetti, è stato utilizzato un profilometro (marca: Metrology System; modello: PSG200) a contatto visibile in Figura 52. Lo strumento opera attraverso un tastatore che, scorrendo sulla superficie del campione con una forza di contatto controllata, ne rileva le variazioni di quota traducendole in un profilo digitale ad alta risoluzione.



Figura 50. Profilometro utilizzato per la misurazione delle superfici attive dei cuscinetti

Per l'esecuzione delle misure, i campioni sono stati posizionati all'interno di una morsa di fissaggio, a sua volta montata su una tavola traslante dotata di viti di regolazione per il posizionamento fine nel piano, lungo due direzioni perpendicolari. In fase di preparazione iniziale, l'insieme tavola-morsa è stato accuratamente allineato rispetto all'asse di misurazione e successivamente bloccato. Tale posizionamento è stato mantenuto fisso e invariato per l'intera durata della campagna di prove: durante le misurazioni, infatti, il campione rimane stazionario mentre a scorrere è esclusivamente il tastatore motorizzato del profilometro.

Al fine di ottenere una mappatura rappresentativa della faccia attiva, per ogni cuscinetto sono state eseguite due scansioni diametrali in direzioni reciprocamente perpendicolari. Come riferimento angolare per l'orientamento del pezzo è stato utilizzato l'asse della porta di alimentazione dell'aria compressa, come illustrato in Figura 53, in cui sono evidenziate le due traiettorie di misurazione.

Per l'esecuzione della prima scansione di ciascun pattino, il tastatore è stato posizionato tramite comando manuale in prossimità del perimetro esterno del cuscinetto, sul lato più distante, procedendo poi alla lettura continua lungo l'intero asse diametrale parallelo all'asse del foro di alimentazione (direzione 1 in Figura 53). Al fine di preservare l'integrità dello strumento, l'avanzamento motorizzato è stato interrotto manualmente in corrispondenza del margine opposto della superficie, evitando che la punta perdesse il contatto con il pezzo cadendo oltre il bordo della faccia.

Completata questa prima acquisizione, il campione è stato sbloccato dalla morsa, ruotato manualmente di 90 gradi e nuovamente serrato, avendo cura di mantenere inalterata la posizione del gruppo tavola-morsa. La procedura di scansione è stata quindi ripetuta con le medesime modalità operative per acquisire il profilo ortogonale (direzione 2 in Figura 53).

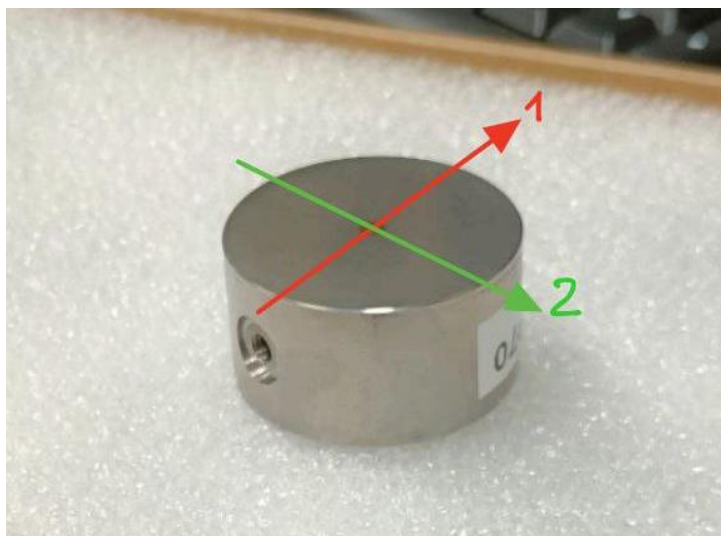


Figura 51. Dettaglio della superficie attiva di un pattino dove sono evidenziati gli assi di scansione diametrale lungo i quali è stata rilevata la geometria del cuscinetto

3.3.2. Analisi dei risultati

I dati raccolti dal profilometro sono stati importati nel software dedicato per la loro elaborazione e analisi. Al fine di facilitare le operazioni di ispezione visiva e mettere in risalto le micro-irregolarità della superficie, è stato applicato un rapporto di scala (*ratio*) dell'asse verticale pari a 500:1. Questa amplificazione della coordinata verticale rispetto alla coordinata orizzontale di scansione è fondamentale per visualizzare chiaramente l'andamento morfologico del profilo, che altrimenti risulterebbe indistinguibile da una linea retta a causa del rapporto tra la lunghezza della scansione (nell'ordine dei millimetri) e l'entità delle irregolarità (nell'ordine dei micrometri).

Una volta importati i profili, di cui un esempio è visibile nella Figura 54 la procedura di analisi è stata adattata in base alle caratteristiche morfologiche riscontrate nella zona centrale del cuscinetto. In particolare, è stato necessario gestire dove presenti le discontinuità generate dal foro di alimentazione o dalla leggera depressione riscontrata in corrispondenza dell'inserito in ottone presente nei cuscinetti con corpo in acciaio.

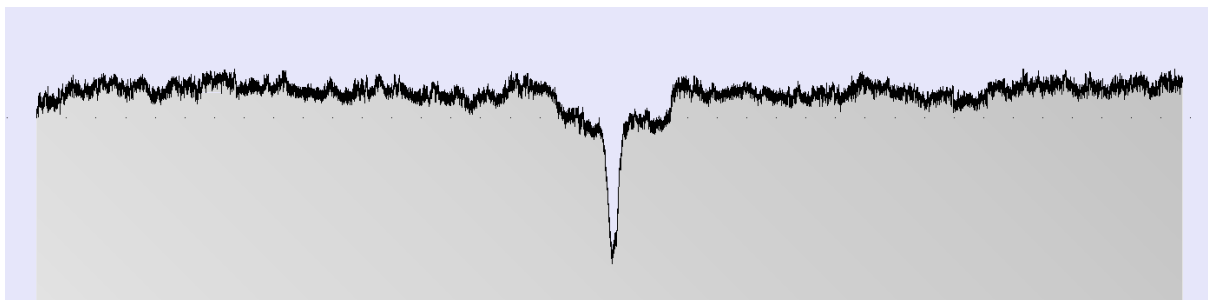


Figura 52. Profilo ottenuto dalla misurazione in direzione 2 del cuscinetto in acciaio p70 (M1_S1_P70_2)

Per ovviare a tali interruzioni della superficie attiva e non alterare il calcolo della planarità, il profilo è stato suddiviso in due segmenti distinti. Su ciascuna porzione è stata applicata una linea di *best-fit* indipendente, permettendo di determinare con precisione gli scostamenti massimi di picco e di valle per le sole aree di effettivo interesse. In questa fase, si è proceduto inoltre a escludere dall'analisi anche le porzioni di profilo in prossimità dei bordi esterni, laddove presentavano irregolarità geometriche localizzate. Le linee di *best-fit* così ottenute nelle due porzioni della superficie sono visibili in colore viola nella Figura 55.

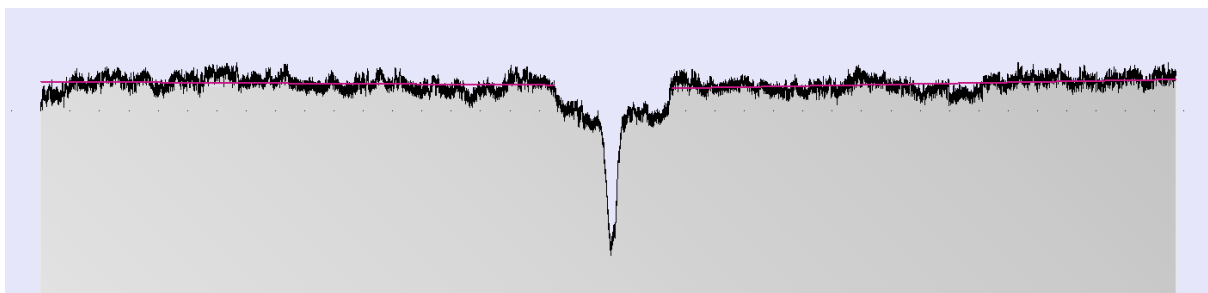


Figura 53. Costruzione delle linee di *best-fit* sul profilo del cuscinetto in acciaio p70 (M1_S1_P70_2)

La procedura di analisi ha quindi previsto l'utilizzo della funzione di linee interrotte (*interrupted lines*): questo comando permette di ricostruire un'unica linea media di riferimento partendo dalle due linee di *best-fit* calcolate indipendentemente sulle porzioni di profilo. Tale linea sintetizzata costituisce lo zero relativo per il calcolo degli scostamenti: i valori di picco e di valle riportati nei risultati rappresentano, infatti, la distanza massima rilevata tra il profilo reale delle aree di effettivo interesse e questa linea di riferimento globale riportata in giallo nella Figura 56.

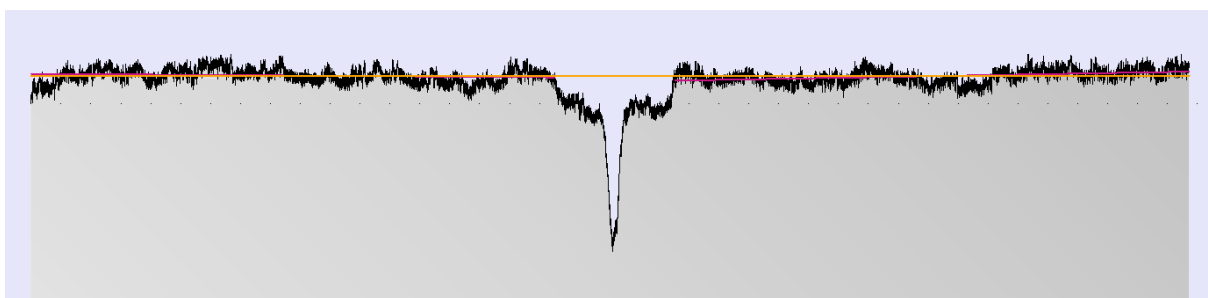


Figura 54. Costruzione della linea media a partire da quelle di *best-fit* sul profilo del cuscinetto in acciaio p70 (M1_S1_P70_2)

Per l'identificazione finale dei valori di planarità, è stato adottato il seguente criterio nella scelta degli scostamenti rappresentativi per ogni direzione di scansione: per quanto riguarda le valli, sono stati analizzati i minimi locali di entrambi i segmenti, selezionando il valore massimo in modulo (ovvero lo scostamento negativo più marcato); per i picchi, data la natura della geometria e la continuità del profilo nelle zone d'interesse, è stato sufficiente identificare il massimo assoluto rilevato lungo l'intera estensione utile della scansione, come visibile in Figura 57.

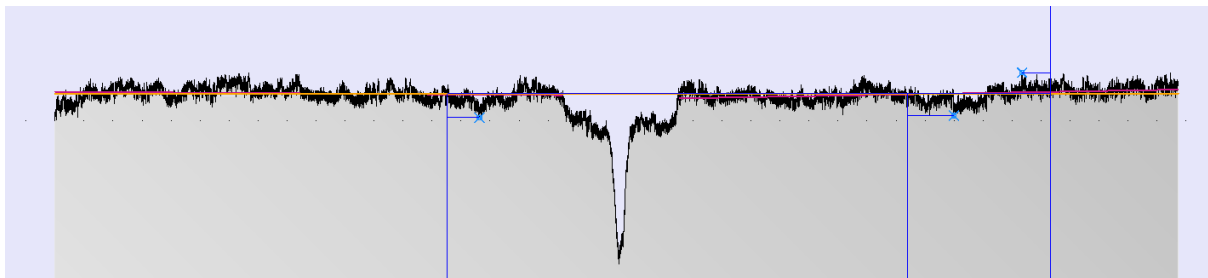


Figura 55. Rilevazione degli scostamenti massimi dalla linea media sul profilo del cuscinetto in acciaio p70 (M1_S1_P70_2)

I valori dei massimi scostamenti rilevati da tutte le misure sono riportati nella Tabella 4, mentre la raccolta completa delle immagini acquisite è consultabile in Appendice [B]. Per la nomenclatura dei dati, si è adottata la nomenclatura M(x)_S(y)_D(w)_ (z), in cui l'indice z identifica l'orientamento della scansione: nello specifico, z=1 indica la Direzione 1 (longitudinale), mentre z=2 si riferisce alla Direzione 2 (trasversale).

Tabella 4. Tabella riassuntiva degli scostamenti massimi rilevati al profilometro.

ACCIAIO PIATTI	MIN (mm)	MAX (mm)	ALLUMINI O PIATTI	MIN (mm)	MAX (mm)	ALLUMINIO CONCAVI	MIN (mm)	MAX (mm)
M1_S1_D100_1	-0,003	0,002	M2_S1_D100_1	-0,002	0,002	M2_S2_D100_1	-0,002	0,002
M1_S1_D100_2	-0,003	0,002	M2_S1_D100_2	-0,002	0,002	M2_S2_D100_2	-0,002	0,003
M1_S1_D70_1	-0,001	0,002	M2_S1_D70_1	-0,002	0,002	M2_S2_D70_1	-0,002	0,002
M1_S1_D70_2	-0,002	0,001	M2_S1_D70_2	-0,002	0,002	M2_S2_D70_2	-0,002	0,003
M1_S1_D50_1	-0,002	0,002	M2_S1_D50_1	-0,002	0,002	M2_S2_D50_1	-0,004	0,003
M1_S1_D50_2	-0,003	0,002	M2_S1_D50_2	-0,002	0,002	M2_S2_D50_2	0,003	0,003
M1_S1_D40_1	-0,003	0,002	M2_S1_D40_1	-0,003	0,004	M2_S2_D40_1	-0,003	0,003
M1_S1_D40_2	-0,002	0,002	M2_S1_D40_2	-0,004	0,003	M2_S2_D40_2	-0,003	0,003
M1_S1_D30_1	-0,002	0,002	M2_S1_D30_1	-0,002	0,002	M2_S2_D30_1	-0,002	0,003
M1_S1_D30_2	-0,002	0,002	M2_S1_D30_2	-0,002	0,002	M2_S2_D30_2	-0,002	0,003
M1_S1_D20_1	-0,002	0,003	M2_S1_D20_1	-0,002	0,002	M2_S2_D20_1	-0,003	0,003
M1_S1_D20_2	-0,002	0,002	M2_S1_D20_2	-0,002	0,002	M2_S2_D20_2	-0,003	0,003
M1_S1_D10_1	-0,003	0,002	M2_S1_D10_1	-0,002	0,002	M2_S2_D10_1	-0,003	0,003
M1_S1_D10_2	-0,002	0,003	M2_S1_D10_2	-0,002	0,002	M2_S2_D10_2	-0,003	0,003

3.4 Prova a getto libero

Le prove a getto libero rappresentano una fase preliminare e necessaria per la caratterizzazione fluidodinamica dei cuscinetti in esame. L'obiettivo di tale analisi è isolare il comportamento del solo orifizio di alimentazione, eliminando l'influenza dello spessore del meato e del carico applicato, al fine di determinare il coefficiente di efflusso C_d validare il comportamento del flusso in condizioni di espansione diretta in atmosfera. Dal punto di vista della modellazione analitica, l'esecuzione di una prova a getto libero equivale a operare in una condizione di meato infinito, dove la contropressione

esercitata dal velo d'aria è nulla e la resistenza al flusso è determinata esclusivamente dalla geometria dell'ugello.

Per l'acquisizione dei dati sono state adottate due differenti metodologie sperimentali, che differiscono per la modalità di variazione della pressione di alimentazione e per la procedura di registrazione dei dati: una procedura automatica e una manuale. Tale distinzione si è resa necessaria per ovviare a fenomeni di mancate coincidenze nei valori di portata rilevati sui diametri più piccoli durante i transitori di pressione in salita e discesa rilevati con l'utilizzo della procedura automatica.

3.4.1 Configurazione sperimentale per la misura automatica

3.4.1.1 Circuito pneumatico e componentistica

Per la caratterizzazione dei cuscinetti con orifizi di diametro maggiore (1mm, 0.7mm, 0.5mm e 0.4mm), è stato predisposto un sistema di alimentazione progettato per gestire rampe di pressione automatizzate e la contestuale acquisizione dei valori di consumo d'aria, il cui schema è visibile in Figura 58. L'aria compressa, prelevata dalla rete del laboratorio a una pressione nominale di 10 bar tramite la valvola di intercettazione V1, attraversa una sezione di condizionamento composta da un gruppo filtro (F), un riduttore di pressione (R1) e dal manometro M1 per la verifica della pressione in uscita dal regolatore di pressione e in ingresso nel sistema a valle.

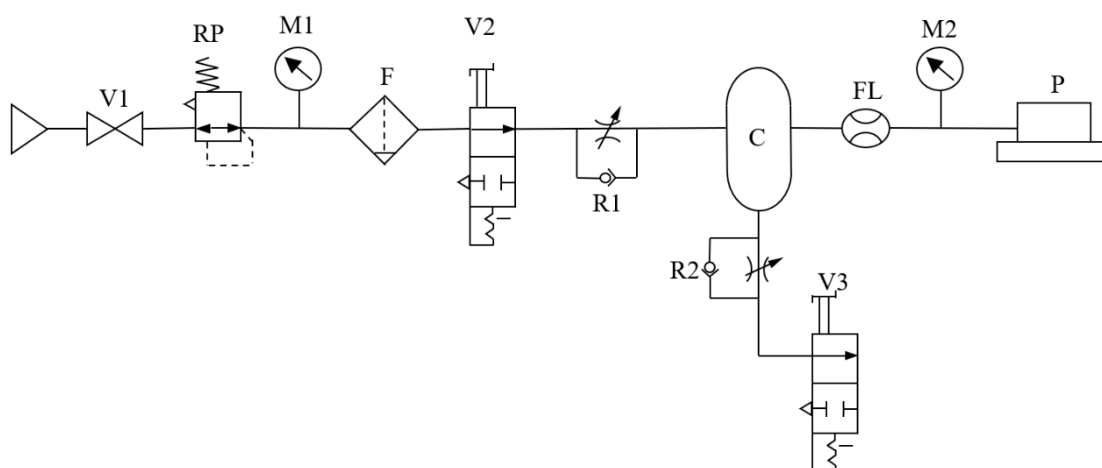


Figura 56. Schema del circuito pneumatico di alimentazione e di misura dei cuscinetti per le prove a getto libero automatiche

Il layout specifico del circuito per le prove a getto libero prevede l'impiego di una valvola bistabile ad azionamento manuale (V2) preposta al riempimento della capacità C, la quale funge da sorgente a pressione variabile per i cuscinetti; tra la valvola V2 e la capacità C è interposta una resistenza regolabile R1 per regolare la velocità di salita della pressione nelle fasi di carica. La fase di scarico in atmosfera ambiente della capacità è gestita da una seconda valvola bistabile (V3) posta in serie a una resistenza regolabile R2; quest'ultima permette di calibrare con precisione la velocità di svuotamento del serbatoio, definendo la velocità del transitorio di pressione durante le curve in discesa.

Il flusso d'aria in uscita dalla capacità attraversa un flussimetro digitale (FL), deputato alla rilevazione del consumo d'aria del cuscinetto in test (P). Al fine di garantire la massima risoluzione e accuratezza della misura, sono stati impiegati tre flussimetri di diversa taglia (con range di misurazione di 50, 5 e 1 l/min), selezionati di volta in volta in funzione del diametro dell'orifizio e della portata attesa. La pressione effettiva di alimentazione è rilevata in tempo reale dal trasduttore di pressione M2, posizionato immediatamente a monte dell'ingresso del pattino al fine di minimizzare eventuali perdite di carico residue tra il punto di misura e il foro di alimentazione del pattino, garantendo che i segnali inviati al sistema di acquisizione rispecchino più fedelmente possibile le condizioni di efflusso durante il test.

I segnali provenienti dal flussimetro digitale e dal trasduttore di pressione sono stati convogliati a una scheda di acquisizione direttamente collegata al PC. La gestione e la registrazione dei dati sono state affidate a un apposito progetto sviluppato in ambiente LabVIEW, configurato per acquisire ad ogni campionamento del sistema i valori istantanei di pressione e portata.

L'obiettivo di tale configurazione è la generazione automatica di una mappatura caratteristica per ogni cuscinetto, correlando la portata alla pressione di alimentazione. Il software permette di tracciare la risposta del sistema sia durante la fase di salita (pressione crescente) che nella successiva fase di discesa (pressione decrescente), consentendo di verificare la ripetibilità della misura e l'eventuale presenza di isteresi.

3.4.1.2 Procedura di test

La metodologia di prova è stata standardizzata per tutti i cuscinetti analizzati, al fine di garantire la confrontabilità dei risultati. Preliminarmente al test, si procede al montaggio del cuscinetto sul supporto e alla selezione del flussimetro più corretto. La selezione è stata operata per garantire che la portata attesa ricadesse nel campo di massima sensibilità dello strumento, adottando gli accoppiamenti diametro-taglia riportati in Tabella 5.

Tabella 5. Tabella riassuntiva dei flussimetri utilizzati per le prove a getto libero in relazione dei diametri dei restrittori

DIAMETRO ORIFIZIO	flussimetro
1,00 mm	50 l/min
0,7 mm	50 l/min
0,5 mm	50 l/min
0,4 mm	50 l/min
0,3 mm	5 l/min
0,2 mm	5 l/min
0,1 mm	1 l/min

Una volta completato il setup strumentale con il flussimetro idoneo, la procedura sperimentale si articola in due fasi distinte e consecutive, volte a mappare l'intero comportamento dinamico del componente: la registrazione della curva di carico (salita) e della successiva curva di scarico (discesa).

All'inizio del test, le valvole V1, V2 e V3 si trovano in posizione di chiusura. La procedura ha inizio con l'apertura della valvola a saracinesca V1 e la regolazione della pressione di linea tramite il riduttore RP, impostando il valore di picco desiderato (circa 7 bar relativi). Dopo aver avviato la registrazione dei segnali in ambiente LabVIEW, si procede all'apertura manuale della valvola bistabile V2. L'aria fluisce attraverso la resistenza R1, incrementando gradualmente la pressione all'interno della capacità C e, di conseguenza, la pressione di alimentazione del pattino, fino alla conclusione della registrazione.

La resistenza regolabile R1 viene preventivamente tarata affinché il transitorio di riempimento sia sufficientemente lento da permettere una mappatura densa di punti; in particolare, la regolazione è finalizzata a far sì che la pressione nella capacità raggiunga il valore di stasi (pressione di linea) solo in prossimità della conclusione della finestra temporale di registrazione, garantendo così l'acquisizione dell'intera rampa di carico.

Raggiunta la pressione di regime, si procede alla chiusura di V2 per isolare il ramo di carica. Immediatamente dopo, viene avviata la seconda acquisizione e aperta la valvola V3. In questa fase, la capacità C si svuota verso l'atmosfera attraverso la resistenza regolabile R2. La taratura di quest'ultima è fondamentale per definire la durata del transitorio: essa viene regolata in modo da garantire uno

svuotamento del serbatoio sufficientemente lento, permettendo al software di campionare un numero elevato di punti sperimentali prima che la pressione di alimentazione torni al valore atmosferico.

Al termine della procedura sperimentale si sono ottenuti, per ogni cuscinetto, due set di dati contenenti i valori istantanei di pressione e portata. Le acquisizioni sono state effettuate con una frequenza di campionamento pari a 20 Hz con 2000 punti sperimentali per ogni curva per una durata totale di 100 secondi ciascuna.

I file generati sono stati archiviati seguendo la nomenclatura completa già descritta in precedenza, usando il formato M(x)_S(y)_D(w)_(z). In questa configurazione, il parametro aggiuntivo z è stato utilizzato per identificare univocamente la fase del transitorio:

- $z = 1$: identifica la curva di salita;
- $z = 2$: identifica la curva di discesa.

Tale struttura dei nomi dei file dati è stata definita per ottimizzare la gestione parametrica in ambiente MATLAB, permettendo allo script di visualizzazione delle curve di richiamare e confrontare automaticamente le due fasi del test per ogni specifico prototipo, facilitando l'analisi della ripetibilità e dell'isteresi del sistema.

L'output dello script di MATLAB citato è un grafico di sintesi che riporta la portata Q in ordinata in funzione della pressione di alimentazione assoluta P_s in ascissa. Come mostrato nell'esempio in Figura 59, i dati sperimentali di salita e discesa vengono sovrapposti alla curva teorica di De Laval (espansione isoentropica) di riferimento per consentire un'immediata verifica metodologica.

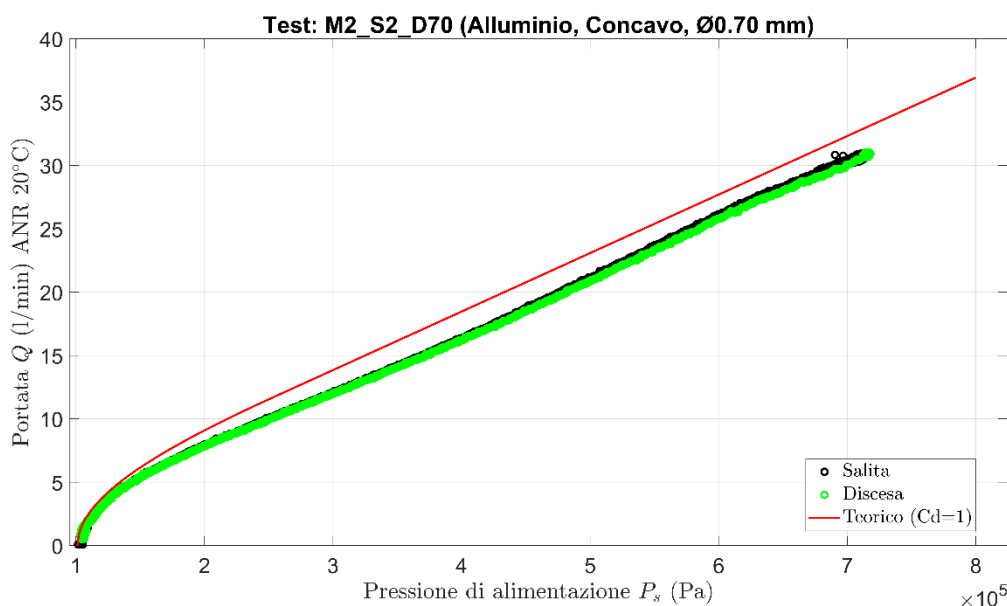


Figura 57. Grafico delle curve di efflusso ottenute con la procedura automatica per il cuscinetto in alluminio con geometria concava e diametro dell'orifizio di 0,7 mm (M2_S2_D70)

Dall'analisi del grafico è possibile osservare, in primo luogo, la quasi perfetta sovrapposizione tra i punti della rampa di salita (neri) e quelli di discesa (verdi); tale riscontro conferma l'assenza di fenomeni capacitivi residui o di ritardi significativi nella risposta della strumentazione, validando di fatto la scelta dei tempi di scansione impostati a 100 secondi. Oltre alla ripetibilità, si nota come l'andamento dei punti sperimentali segua abbastanza fedelmente il profilo della curva teorica di De Laval, evidenziando con

precisione il passaggio dal regime subsonico a quello sonico in corrispondenza del ginocchio ($b_{cr}=0,4$) della curva rossa. Infine, lo scostamento verticale tra i dati misurati e la modellazione teorica (quest'ultima tracciata assumendo un coefficiente di efflusso C_d unitario) permette di valutare visivamente l'efficienza dell'orifizio, rendendo manifeste le perdite di carico causate dalle imperfezioni geometriche che distinguono il foro reale dal modello ideale.

Sebbene la procedura automatica abbia fornito risultati eccellenti per i diametri di restrittore maggiori, compresi tra 1 mm e 0.4 mm, la sua applicazione ai cuscinetti con restrittori di diametri inferiori a 40 centesimi di millimetro ha evidenziato alcune criticità sperimentali significative. In questi casi, come mostrato nell'andamento tipico riportato in Figura 60, si è riscontrata una marcata non coincidenza tra le curve di salita e di discesa, manifestando un fenomeno di isteresi apparente non riconducibile a una caratteristica fisica reale del cuscinetto. È stato inoltre osservato che l'entità di tali scostamenti aumenta progressivamente al ridursi del diametro dell'orifizio.

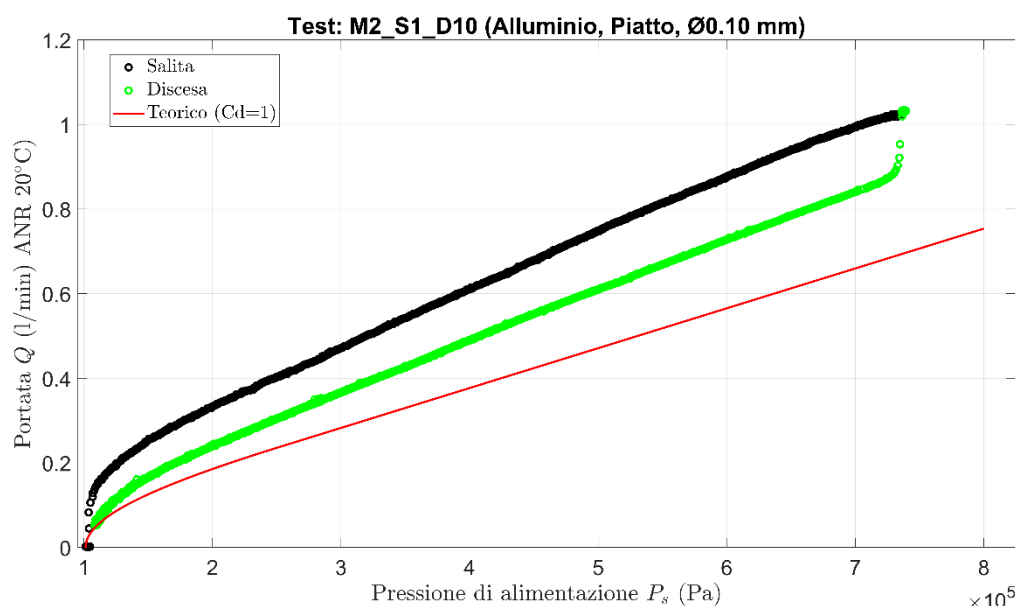


Figura 58. Grafico delle curve di efflusso ottenute con la procedura automatica per il cuscinetto in alluminio con geometria piatta e diametro dell'orifizio di 0,1 mm (M2_S1_D10)

Al fine di ovviare a tali problematiche e garantire l'accuratezza dei dati, per i diametri più piccoli (0.3 mm, 0.2 mm e 0.1 mm) si è resa necessaria l'adozione di una procedura manuale a punti di misura stazionari. In questa modalità operativa, la pressione di alimentazione viene incrementata a step discreti e, per ogni singolo punto di misura, si attende la completa stabilizzazione dei segnali prima di procedere alla registrazione. Tale approccio statico permette di ottenere curve di salita e discesa coerenti con l'andamento teorico, garantendo la qualità dei risultati anche per i cuscinetti caratterizzati dai fori con diametri minori.

3.4.2 Configurazione sperimentale per la misura manuale

3.4.2.1 Circuito pneumatico e componentistica

La sezione iniziale di condizionamento del circuito è rimasta invariata rispetto a quella utilizzata per le prove automatiche: il flusso d'aria attraversa la valvola di intercettazione V1, il primo riduttore di pressione RP1 (che stabilizza la pressione di linea riducendola da 10 a 7 bar), il manometro di controllo M1 e il filtro F. Successivamente, come illustrato nello schema di Figura 61, il layout è stato modificato per consentire un controllo manuale dei parametri. È stato infatti inserito un secondo riduttore di pressione manuale (RP2) dedicato all'impostazione precisa della pressione per ogni singolo punto di misura della prova a getto libero. Il circuito prosegue poi con una resistenza variabile R, utilizzata per

stabilizzare ulteriormente il flusso, e termina con la strumentazione di misura composta dal flussimetro per la lettura diretta della portata FL e dal sensore di pressione M2, posto in prossimità del cuscinetto sotto test.

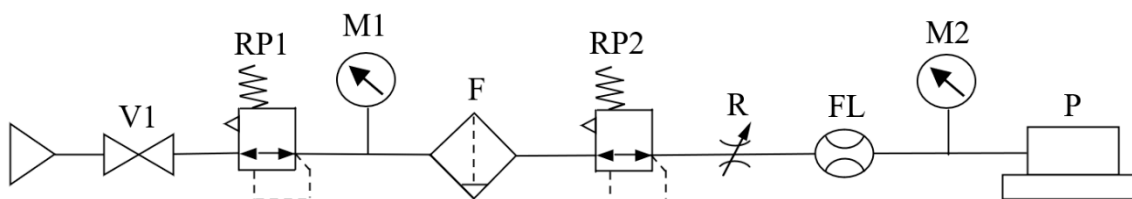


Figura 59. Schema del circuito pneumatico di alimentazione e di misura dei cuscinetti per le prove a getto libero automatiche

L'adozione di questo layout specifico è finalizzata a garantire che ogni valore misurato corrisponda a una condizione di funzionamento puramente statica del cuscinetto in prova. A differenza della procedura a rampa, in cui la pressione variava con continuità, questo approccio permette di stabilizzare il sistema su step discreti di pressione, annullando ogni possibile sfasamento temporale tra le letture dei sensori.

Per questa serie di prove sui pattini con orifizi di diametro minore (0.3 mm, 0.2 mm e 0.1 mm), non è stato utilizzato il software di acquisizione LabVIEW. I dati sono stati invece trascritti manualmente su un foglio di calcolo Excel, effettuando la lettura diretta dei valori stazionari dai display della strumentazione: la portata è stata rilevata dal display integrato nel flussimetro digitale, scelto di volta in volta tra quelli indicati nella Tabella 5 e in base al diametro del restrittore, mentre la pressione di alimentazione P_s è stata letta sul display dell'amplificatore di segnale collegato al trasduttore di pressione M2. Questo metodo, sebbene più oneroso in termini di tempo, ha permesso di monitorare visivamente la perfetta stabilità di ogni punto di misura prima della sua registrazione, garantendo la massima accuratezza dei risultati.

3.4.2.2 Procedura di test

Analogamente a quanto previsto per le prove automatiche, per ogni cuscinetto è stata effettuata una caratterizzazione completa composta da una curva a pressione di alimentazione crescente (salita) e una successiva curva decrescente (discesa).

Nello specifico, la prova in salita ha inizio dopo aver installato il cuscinetto nel circuito, si procede con l'apertura della valvola di intercettazione V1 e la regolazione del primo riduttore RP1 a un valore costante di 7 bar, garantendo così un'alimentazione stabile a monte del sistema. La fase di misura vera e propria comincia con il secondo riduttore, RP2, inizialmente in posizione di completa chiusura, condizione a cui corrispondono pressione di alimentazione e consumo d'aria nulli.

Successivamente, agendo manualmente sul riduttore di pressione RP2, si incrementa gradualmente la pressione di alimentazione p_s , monitorandone il valore in tempo reale sul display del trasduttore di pressione M2. In questa fase è necessario operare con estrema cautela: la rotazione del pomello di regolazione deve essere molto lenta per assecondare l'inerzia del sistema, poiché i valori di pressione e portata richiedono alcuni secondi per stabilizzarsi correttamente. Questa accortezza operativa è fondamentale per evitare fenomeni di overshoot di pressione; superare il valore di target prefissato costringerebbe infatti l'operatore a una manovra di scarico, che potrebbe compromettere la linearità della sequenza di salita.

Al fine di mappare con estrema precisione l'andamento della curva portata-pressione, è stata adottata una strategia di campionamento a intervalli variabili: nel tratto iniziale del grafico, dove la pendenza della curva è più accentuata (regime subsonico), sono stati utilizzati step di incremento della pressione estremamente ridotti, pari a 0,05 bar. Man mano che la curva tende a stabilizzarsi verso il regime sonico,

assumendo un andamento più lineare, l'ampiezza degli step è stata gradualmente aumentata fino a raggiungere incrementi di 0,2 bar nel tratto lineare. Questa modulazione del passo di campionamento ha permesso di ottimizzare i tempi complessivi della prova senza sacrificare la risoluzione della misura nei tratti di curva di maggiore interesse fluidodinamico. La procedura è proseguita con questa metodologia fino al raggiungimento della pressione di alimentazione massima di 7 bar, garantendo così una caratterizzazione completa dell'orifizio su tutto il range di funzionamento previsto.

La prova di discesa di ogni cuscinetto è stata effettuata immediatamente a seguire quella di salita, garantendo la continuità temporale della misura. La sequenza è ripartita dal valore massimo di pressione relativa di alimentazione di 7 bar, raggiunto nell'ultimo punto di campionamento della fase di carico. Per permettere un confronto diretto e rigoroso tra i due cicli, i valori di pressione ai quali sono state effettuate le misurazioni in discesa sono stati mantenuti identici a quelli utilizzati in salita, ma percorsi in ordine inverso.

Analogamente a quanto avvenuto nella fase precedente, la riduzione della pressione di alimentazione p_s è stata gestita agendo manualmente sul regolatore RP2. Anche in questo caso, la manovra è stata eseguita con estrema lentezza per evitare bruschi cali di pressione che avrebbero potuto portare il sistema al di sotto del valore target di pressione, richiedendo poi una nuova stabilizzazione. La procedura è proseguita ripercorrendo gli step di 0,2 bar e successivamente quelli più fitti, fino a 0,05 bar nel tratto subsonico, riportando infine il sistema alla condizione di riposo con pressione e portata nulle.

Questo approccio a ciclo chiuso ha permesso di verificare la perfetta sovrapponibilità dei dati e l'assenza di scostamenti significativi, confermando che il comportamento fluido-dinamico dei cuscinetti rimane costante indipendentemente dalla storia del carico.

Tale riscontro risulta particolarmente rilevante se confrontato con i risultati delle prove effettuate precedentemente con la procedura automatica. Mentre per i diametri maggiori la procedura automatica aveva fornito risultati privi di isteresi, l'applicazione della stessa metodologia ai diametri minori aveva evidenziato una marcata isteresi tra la curva di salita e quella di discesa. Al contrario, la coincidenza tra la curva di salita e quella di discesa ottenuta con la procedura manuale testimonia l'assenza di effetti di isteresi giustificabili dalla fisica del problema.

I dati raccolti manualmente sono stati successivamente organizzati e rielaborati in un foglio di calcolo Excel. Per ogni cuscinetto, i valori di pressione relativa di alimentazione p_s e di portata Q registrati durante le due fasi del test sono stati organizzati per la generazione di grafici per la visualizzazione dei risultati. Come mostrato in Figura 62, la visualizzazione dei risultati prevede la sovrapposizione della curva di salita e di quella di discesa; tale rappresentazione permette di apprezzare visivamente la quasi perfetta coincidenza dei punti sperimentali, confermando l'assenza di isteresi e la bontà della procedura statica adottata.

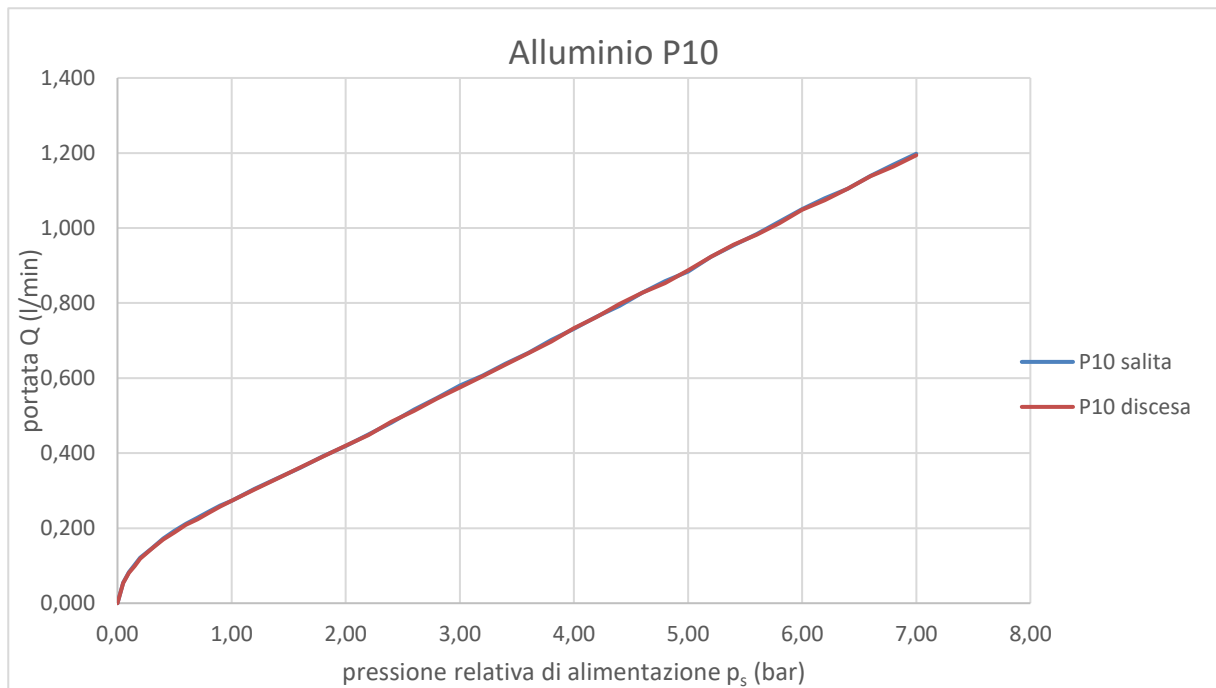


Figura 60. Grafico delle curve di efflusso ottenute con la procedura manuale per il cuscinetto in alluminio con geometria piatta e diametro dell'orifizio di 0,1 mm (M2_S1_D10)

I risultati numerici ottenuti da entrambe le tipologie di prova (automatica e manuale) sono stati successivamente impiegati come base per il calcolo dei coefficienti di efflusso c_d dei cuscinetti. Si osservi inoltre che, per comodità operativa legata alla strumentazione utilizzata, i grafici delle prove automatiche riportano la pressione di alimentazione in termini assoluti (P_s), mentre nei grafici delle prove manuali i valori sono espressi in pressione relativa (p_s). Tale distinzione è stata opportunamente considerata in fase di post-processing per garantire l'omogeneità dei confronti con il modello teorico.

3.5 Banco prova profili di pressione

3.5.1 Finalità del banco prova

Il banco prova per pattini pneumostatici è stato ideato per consentire una caratterizzazione completa delle prestazioni statiche dei cuscinetti. Nello specifico, il sistema permette di acquisire e registrare i valori di carico applicato, spessore del meato d'aria e distribuzione radiale della pressione, mappando il comportamento del cuscinetto al variare delle condizioni operative. La strumentazione del banco include una cella di carico per la misurazione del carico applicato, sensori di spostamento capacitivi per il monitoraggio degli spostamenti verticali del cuscinetto. La distribuzione della pressione lungo la coordinata radiale è rilevata mediante un trasduttore di pressione collegato ad un foro di scansione presente nel contropattino. La scelta di eseguire il rilievo esclusivamente lungo la direzione radiale è dettata dalla simmetria assiale del sistema: trattandosi di pattini ad alimentazione singola centrale, il singolo profilo pressorio rilevato lungo un raggio è rappresentativo dell'intero campo di pressioni all'interno del meato, permettendo così una caratterizzazione fluidodinamica completa ed efficiente.

3.5.2 Struttura meccanica

La struttura portante del banco prova, visibile in Figura 63, è costituita da un *basamento* in acciaio, sul quale sono fissate tre *colonne* cilindriche, collegate tra loro nella parte superiore da una massiccia *traversa* a tre bracci a formare una configurazione a portale. Questa specifica architettura è stata progettata per garantire un'elevata rigidità strutturale, permettendo al sistema di resistere ai carichi applicati ai cuscinetti in fase di test senza introdurre deformazioni elastiche che comprometterebbero l'accuratezza dei risultati sperimentali.

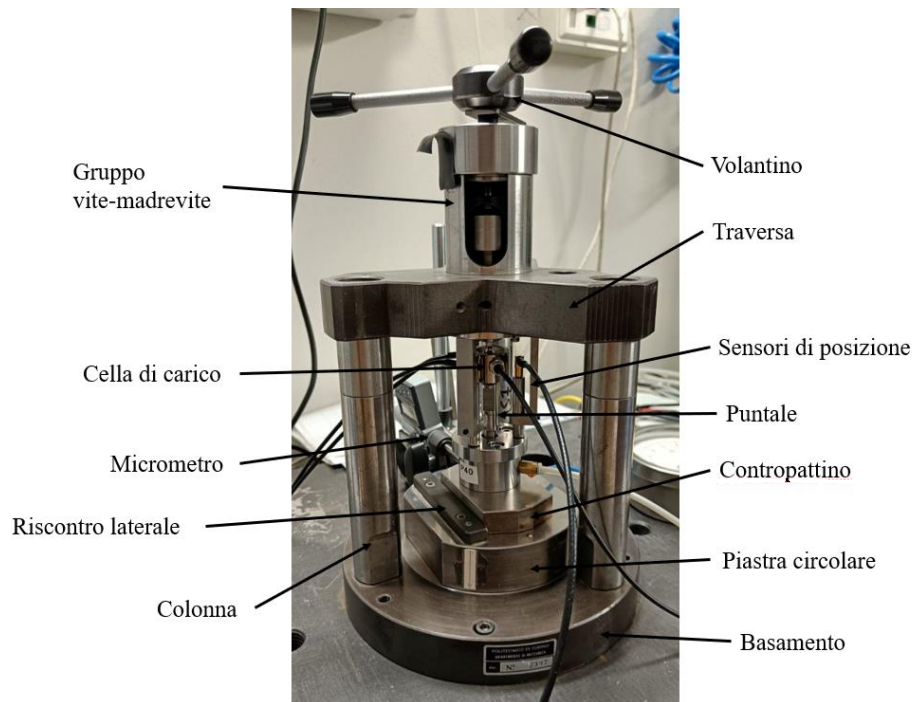


Figura 61. Banco prova per la misurazione dei profili di pressione

Al di sopra del basamento è posizionata una *piastra circolare*, alloggiata all'interno di una sede cilindrica ricavata nel basamento stesso, grazie alla quale ha la possibilità di ruotare attorno al proprio asse verticale. L'interfaccia tra la piastra rotante e la sede cilindrica è stata realizzata con tolleranze tali da permettere un agevole orientamento manuale del componente, garantendo al contempo l'assenza di giochi residui che potrebbero causare disallineamenti o oscillazioni indesiderate durante le fasi di misura. Questa stabilità è fondamentale per assicurare che la superficie della piastra rimanga perfettamente ortogonale all'asse di carico e parallela alla faccia attiva del pattino.

Sopra la piastra circolare è posizionato il *contropattino*, l'elemento che rende possibili le misure dei profili di pressione. Questa acquisizione avviene grazie a un foro di scansione (con diametro nominale di 0,2 mm) ricavato sulla faccia superiore del contropattino. Il foro è a sua volta collegato tramite un tratto di tubo a un trasduttore di pressione, che permette di rilevare il segnale di pressione locale all'interno del meato e convertirlo in segnale elettrico. Per consentire la mappatura radiale, il contropattino è libero di traslare sulla piastra circolare; tale movimento è gestito tramite un *micrometro* digitale a vite (micrometro Rupac con sensibilità 0,001 mm) che permette di impostare con precisione gli incrementi della posizione radiale durante i test. La precisione del movimento è garantita da un *riscontro laterale* che assicura una traiettoria rigorosamente rettilinea durante la traslazione, mantenendo l'allineamento tra il foro e l'asse del cuscinetto. Inoltre, il sistema è dotato di un finecorsa meccanico che ne determina la massima escursione, definendo così il limite del campo di misura e prevenendo possibili interferenze meccaniche durante le prove.

L'unione del moto angolare della piastra circolare e di quello rettilineo del contropattino permette di spostare virtualmente il foro di misura all'interno di tutto il dominio disponibile; la sua posizione risulta quindi facilmente descrivibile in coordinate polari (r, θ). Tuttavia, per la già citata assialsimmetria del sistema, nelle prove eseguite verrà sfruttato esclusivamente il grado di libertà radiale. Tale configurazione consente di mappare l'andamento della pressione lungo il raggio del cuscinetto.

Nella zona superiore del banco, al di sopra della traversa, è alloggiato il *gruppo vite-madrevite* preposto all'applicazione e alla misura del carico sui cuscinetti in fase di test. Questo assieme, la cui sezione dettagliata è riportata in Figura 64, è composto da una madrevite solidale alla colonna centrale a sua volta fissata alla struttura a portale e da una vite di manovra, azionata manualmente tramite un volantino a tre bracci. Quest'ultimo permette di regolare con precisione la discesa del *puntale* e, di conseguenza, la forza esercitata sul cuscinetto. Il puntale di carico è stato progettato con una struttura modulare: esso è infatti costituito da più elementi meccanici (interfaccia vite - cella di carico, interfaccia cella - puntalino e puntalino in Figura 64) assemblati in serie, al fine di interporre tra di essi la *cella di carico* (HBM U9C AV 1kN). Tale configurazione permette di misurare in tempo reale, e con elevata accuratezza, la forza premente trasmessa dalla vite direttamente al cuscinetto.

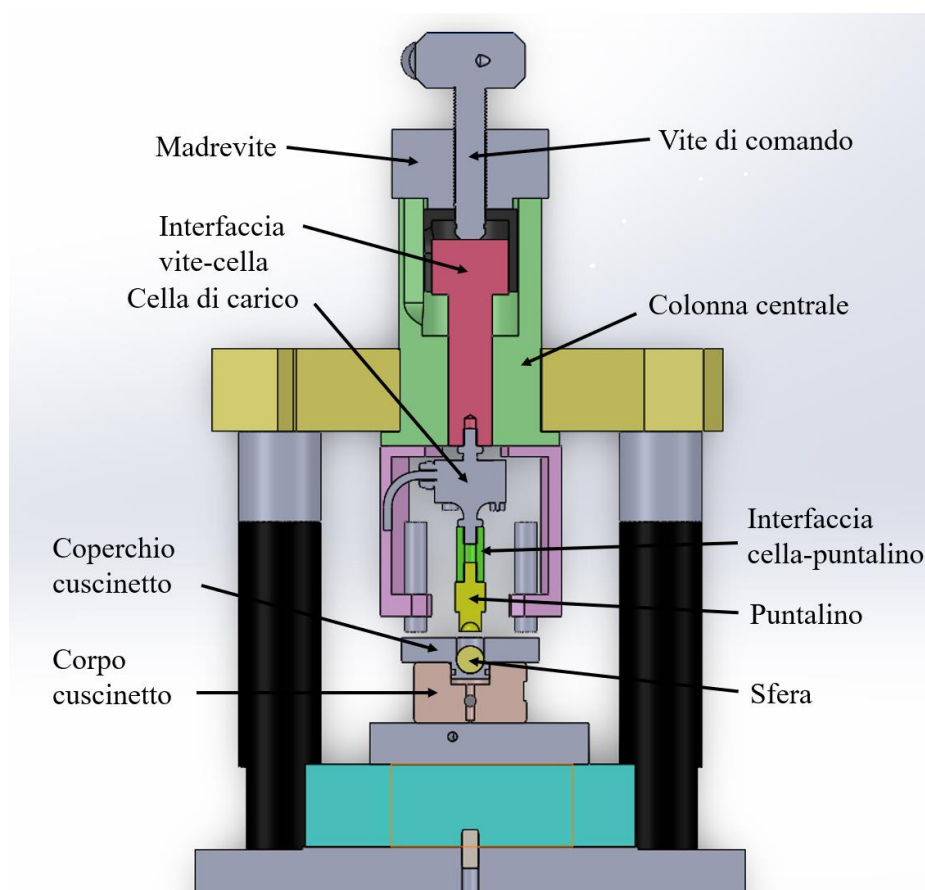


Figura 62. Sezione del banco prova

La porzione terminale del puntale, situata al di sotto della cella di carico, costituisce l'elemento di interfaccia con il cuscinetto. Al fine di assicurare un'applicazione del carico puramente assiale, tra il puntale e il cuscinetto è interposta una sfera in acciaio. Questa si accoppia con apposite sedi complementari ricavate sulla faccia inferiore puntale e sul coperchio superiore del cuscinetto, realizzando un vincolo a cerniera sferica. Tale configurazione garantisce un sistema di autocentramento

e, soprattutto, lascia al cuscinetto la libertà di inclinarsi per mantenersi spontaneamente parallelo alla superficie del contropattino sotto l'azione del campo di pressione del meato d'aria, compensando eventuali minimi disallineamenti della catena di carico.

Per il monitoraggio dello spessore del meato d'aria e degli spostamenti verticali del cuscinetto, il banco è equipaggiato con tre sensori di posizione capacitivi (la cui gamma di misura si estende da 0 a 500 μm). I sensori sono disposti a 120° al di sopra del coperchio del cuscinetto, fissati tramite appositi supporti alla struttura fissa della traversa. Questa configurazione non solo permette di rilevare l'altezza media del meato con maggiore precisione, ma consente anche di monitorare l'assetto del cuscinetto, verificandone il costante parallelismo rispetto al contropattino durante le fasi di carico. I segnali analogici in uscita dai sensori vengono inviati al sistema di acquisizione per essere convertiti, tramite le opportune curve di taratura, in valori di spostamento lineare.

3.5.3 Circuito pneumatico di alimentazione

Il circuito pneumatico preposto all'alimentazione dei cuscinetti, il cui schema funzionale è riportato in Figura 65, è stato progettato per garantire un flusso d'aria costante durante le prove per la rilevazione dei profili di pressione.

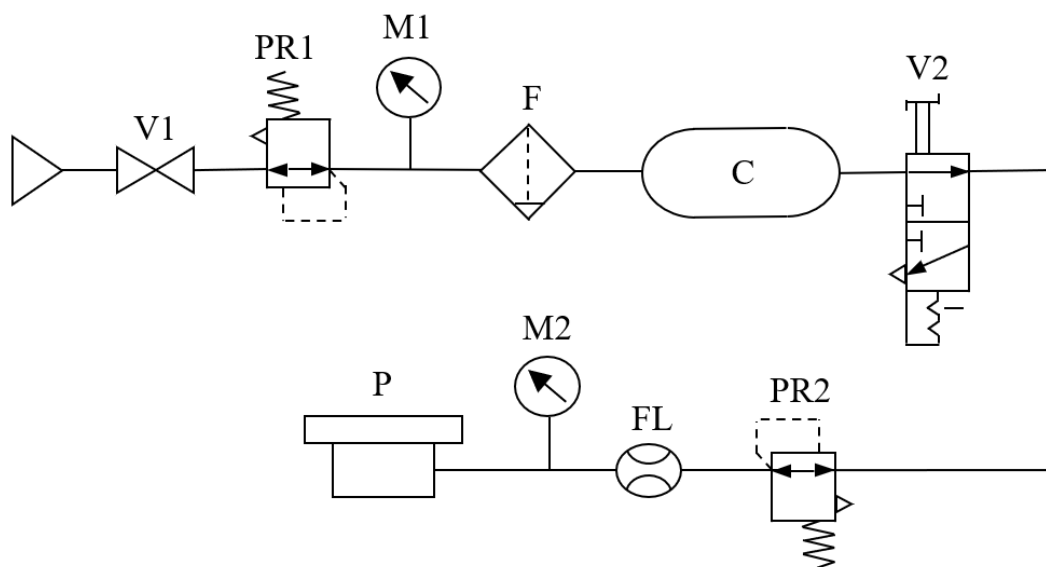


Figura 63. Schema del circuito pneumatico di alimentazione dei cuscinetti in funzione nel banco prova

L'aria compressa viene prelevata dalla rete del laboratorio a una pressione di 10 bar tramite una valvola a saracinesca (V1). Il layout della sezione di ingresso è riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, dove si osserva il percorso del fluido verso i componenti di regolazione. Immediatamente a valle del riduttore e prima del filtro (F), è installato un primo manometro (M1), la cui funzione è la verifica della pressione della linea in ingresso al filtro di trattamento (F). Il filtro è necessario per eliminare impurità solide e residui di condensa che potrebbero ostruire i micro-ugelli di alimentazione dei pattini.

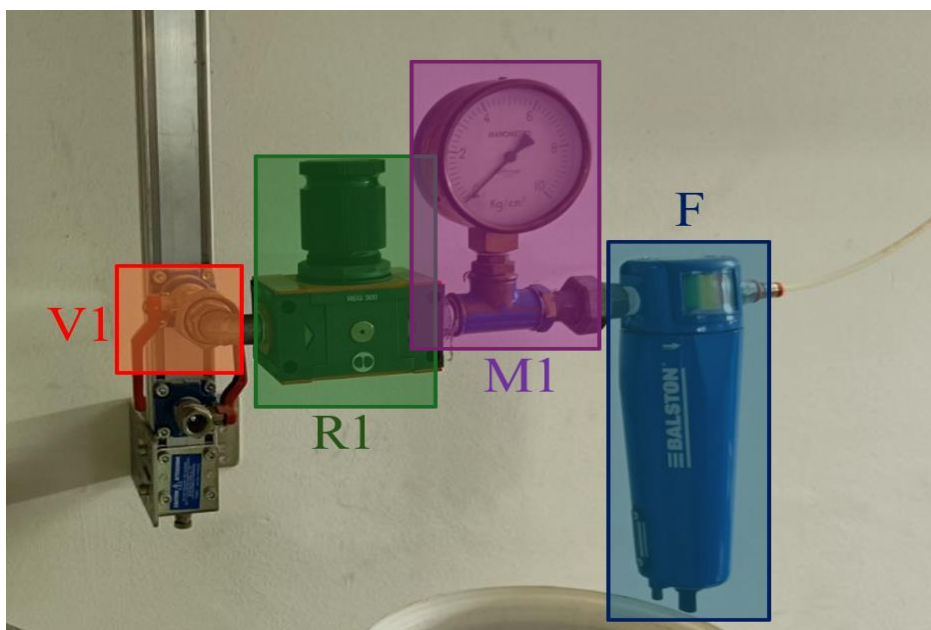


Figura 66. Fotografia della sezione di ingresso del circuito di alimentazione dei cuscinetti

A valle del filtraggio, l'aria viene accumulata in un serbatoio polmone (C) posto al di sotto del banco prova, la cui funzione è smorzare eventuali fluttuazioni di pressione provenienti dalla rete. La sezione di controllo e misura che precede l'utenza del cuscinetto è illustrata in Figura . Qui, il flusso in uscita dal serbatoio è gestito da una valvola 3/3 bistabile ad azionamento manuale (V2), che funge da interruttore generale del banco. La regolazione fine della pressione di esercizio viene effettuata tramite un secondo riduttore di pressione (R2), utilizzato per imporre la pressione di alimentazione del cuscinetto richiesta dalle specifiche fasi di test. L'ultimo tratto della linea, prima del collegamento al pattino (P), ospita la strumentazione di misura: un flussimetro digitale (FL) per il rilievo della portata e un manometro di precisione analogico (M2) per il monitoraggio preciso della pressione di alimentazione effettiva al meato.

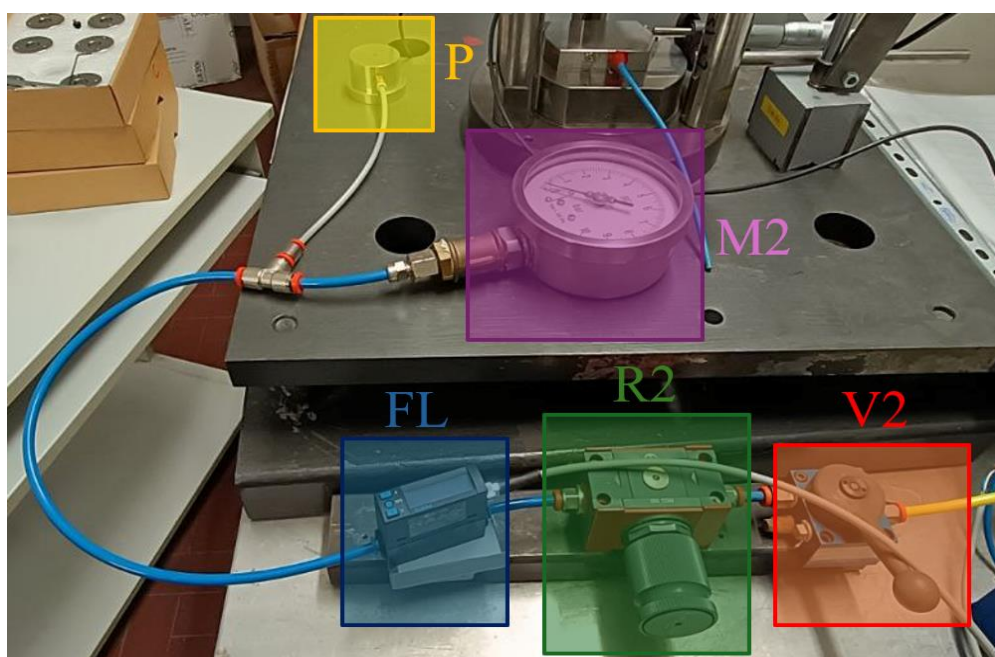


Figura 67. Fotografia della sezione di controllo e misura del circuito di alimentazione dei cuscinetti

3.5.4 Sensoristica

Il sistema di acquisizione dati permette di raccogliere ed elaborare i segnali provenienti dalla diversa sensoristica installata sul banco: i tre sensori capacitivi, il trasduttore di pressione, la cella di carico e il flussimetro.

Dal punto di vista funzionale, la catena di misura segue un percorso di condizionamento del segnale differenziato a seconda della tipologia di sensore. I sensori capacitivi, la cella di carico e il trasduttore di pressione (visibile in Figura con il suo amplificatore) inviano i propri segnali ai rispettivi condizionatori di segnale; questi ultimi hanno il compito di filtrare e amplificare i segnali ricevuti prima di inoltrarli alla scheda di acquisizione (DAQ) collegata direttamente al PC. Un'eccezione è rappresentata dal flussimetro, il quale integra internamente l'elettronica necessaria al condizionamento: esso non richiede quindi l'utilizzo di un amplificatore esterno ed è collegato direttamente alla scheda di acquisizione. Quest'ultima converte i segnali analogici in ingresso in dati digitali, rendendoli disponibili per l'elaborazione tramite il software di gestione del banco.



Figura 68. Sensore di pressione (in basso) e il relativo amplificatore di segnale (in alto)

La gestione e la visualizzazione in tempo reale dei dati acquisiti avvengono tramite il software LabVIEW 2020. All'interno di questo ambiente è stato sviluppato un apposito file di progetto (.lvproj), contenente VI (*virtual instrument*), che permettono di monitorare e salvare l'andamento numerico e grafico di tutte le grandezze in gioco.

Come visibile nello screenshot dell'interfaccia riportato in Figura 69, i segnali provenienti dai sensori sono stati mappati e rinominati per una rapida identificazione durante le prove:

- x1, x2, x3: identificano i segnali dei tre sensori di posizione capacitivi;
- P: indica il valore della pressione rilevata nel meato misurata dal sensore di pressione;
- Q: indica la portata d'aria misurata dal flussimetro;
- F: indica il carico verticale applicato al cuscinetto e rilevato dalla cella di carico.

L'interfaccia grafica consente di verificare la stabilità del sistema durante il test ma e anche di leggere i dati grezzi numerici che verranno successivamente utilizzati per ottenere le curve caratteristiche del cuscinetto.

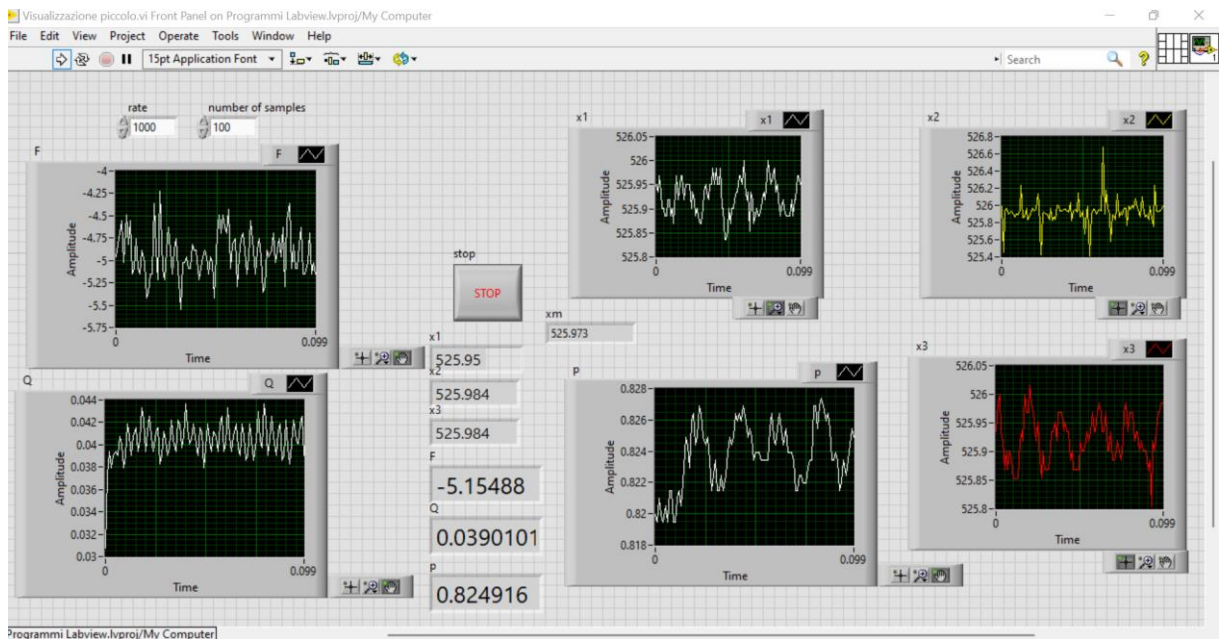


Figura 64. Interfaccia utente in ambiente LabVIEW 2020 per il monitoraggio in tempo reale dei segnali dei sensori del banco prova

L'architettura logica implementata in LabVIEW è sintetizzata nello schema a blocchi di Figura 70, che illustra il flusso di elaborazione dei segnali dei sensori del banco prova a partire dalla configurazione iniziale dell'hardware.

Il sistema sfrutta il modulo *DAQ Assistant* per l'interfaccia diretta con la scheda di acquisizione; tramite i parametri di *rate* e *number of samples*, viene definita la frequenza di campionamento e il numero di campionamenti totali per ogni ciclo di lettura. Il segnale in uscita viene quindi ripartito da una serie di blocchi *Select Signals*, che permettono di isolare i canali relativi ai diversi trasduttori: x1, x2, x3 per la posizione, F per il carico, Q per la portata e P per la pressione.

L'unica elaborazione applicata ai segnali acquisiti consiste nel calcolo della media aritmetica dei tre valori di posizione (x1, x2, x3), eseguita per ottenere istantaneamente il valore del meato medio (xm). Tutte le grandezze processate sono infine inviate simultaneamente agli indicatori numerici e ai grafici temporali (*Waveform Chart*), consentendo la lettura diretta e il monitoraggio costante della stabilità del sistema durante l'intera sessione di prova.

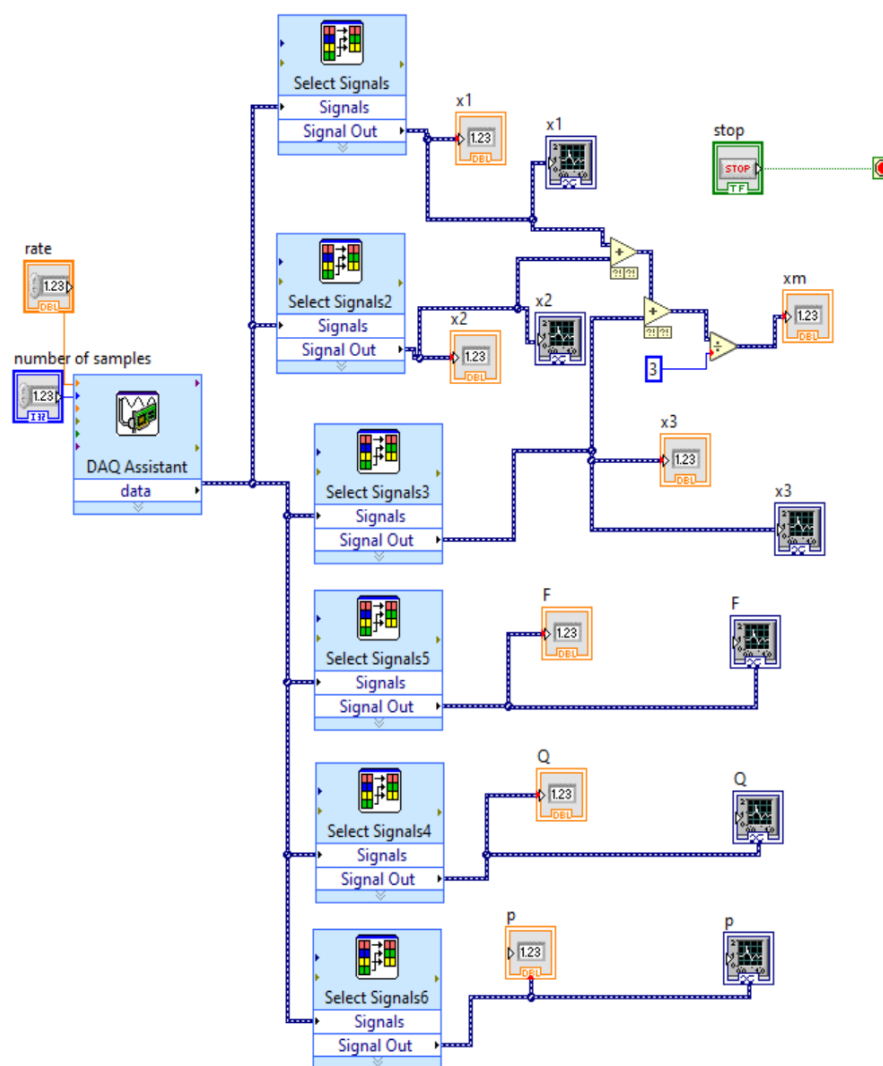


Figura 70. Schema a blocchi dell'architettura software in ambiente LabVIEW

3.5.5 Procedura sperimentale

La conduzione dei test ha seguito un protocollo rigoroso, finalizzato a garantire la ripetibilità delle misure e la protezione delle superfici rettificate dei componenti.



Figura 71. Componenti necessari al completo assemblaggio del cuscinetto

La procedura sperimentale si articola nelle seguenti fasi cronologiche:

3.5.5.1 Preparazione del cuscinetto e del circuito

Prima dell'inizio della sessione di misura, si procede all'assemblaggio del cuscinetto selezionato montando il coperchio universale tramite tre viti di fissaggio facendo attenzione a non pizzicare l'o-ring durante l'inserimento. Si installa quindi il raccordo pneumatico nel foro laterale del corpo del cuscinetto e si inserisce in esso il tubo di alimentazione. Infine, viene posizionata la sfera in acciaio nell'apposita sede ricavata sul coperchio, elemento fondamentale per garantire l'autocentramento del carico e minimizzare eventuali momenti flettenti indesiderati. I componenti necessari a tale operazione di assemblaggio sono illustrati in Figura 71.

Una volta ultimato l'assemblaggio del cuscinetto, si passa alla messa in pressione della linea di alimentazione: si apre la valvola a saracinesca V1 per caricare il serbatoio polmone e, tramite il riduttore R1, si imposta una pressione di linea pari a 8 bar, verificandone il valore sul manometro M1.

3.5.5.2 Preparazione del cuscinetto e del circuito

L'inserimento del cuscinetto all'interno del banco prova avviene agendo sul volantino superiore per sollevare il gruppo composto dalla cella di carico e dal puntale, creando lo spazio necessario al posizionamento sul contropattino. Durante questa fase è importante fare attenzione a tenere aperta la valvola V2 per alimentare il cuscinetto; tale accorgimento assicura l'immediato sostentamento aerostatico del pattino, condizione necessaria per evitare il contatto metallico tra le superfici rettifiche del cuscinetto e del contropattino. In questo modo si previene l'insorgenza di fenomeni di usura per strisciamento o micro-rigature che potrebbero compromettere la planarità dei componenti e l'affidabilità delle misure di portata.

Dopo aver centrato il componente, si agisce sul volantino per abbassare progressivamente il puntale fino a impegnare la sfera di carico; questo accoppiamento è fondamentale per vincolare stabilmente il cuscinetto nella sua sede, mantenendolo in posizione corretta per tutta la durata del test senza la necessità di ulteriori interventi manuali. Una volta stabilizzato il contatto meccanico e verificata l'immobilità del sistema, si procede alla regolazione fine della pressione di alimentazione agendo sul riduttore R2, monitorando il valore di prova sul manometro M2 fino al raggiungimento della pressione desiderata.

3.5.5.3 Setup del micrometro e dei sensori

Una volta vincolato il cuscinetto, si procede alla configurazione della strumentazione di misura. Il micrometro (riportato in dettaglio in Figura 72), dedicato allo spostamento radiale del contropattino per la scansione del profilo di pressione, viene reintrodotto quasi completamente (altrimenti la corsa potrebbe essere non sufficiente) e impostato alla quota di 'zero' in corrispondenza del perimetro esterno del pattino tramite il tasto "set". Il contropattino viene quindi accostato al micrometro assicurando il perfetto contatto con il riscontro laterale, condizione necessaria per garantire la precisione millimetrica degli spostamenti durante il test.



Figura 72. Fotografia del micrometro digitale RUPAC utilizzato per il posizionamento radiale del contropattino

La scelta della quota di zero è stata effettuata portando il foro di misura, ricavato sulla superficie del contropattino, in corrispondenza del bordo esterno del cuscinetto. Tale posizione è stata inizialmente individuata in modo visivo, definendo l'origine del sistema di riferimento per lo spostamento del micrometro. Tuttavia, per eliminare eventuali incertezze derivanti da questo posizionamento manuale, in fase di post-elaborazione dei dati è stata eseguita una correzione della coordinata radiale. Sfruttando la geometria nominale del componente e l'esatta posizione del picco di pressione registrato (corrispondente all'asse di simmetria del restrittore), è stato possibile riallineare i profili sperimentali, garantendo l'accuratezza necessaria per il confronto con i modelli teorici.

In questa fase si procede alla regolazione della posizione dei sensori capacitivi. Le sonde di misura vengono posizionate affinché la distanza dalla faccia superiore del coperchio ricada circa a metà del loro campo di misura (pari a 0-500 μm). Tale scelta è motivata dalla necessità di far operare i trasduttori nel tratto di massima linearità della loro curva di risposta, garantendo al contempo un margine sufficiente per rilevare gli spostamenti sotto carico del cuscinetto, evitando fenomeni di saturazione del segnale. Una volta stabilita la posizione ottimale durante la sessione iniziale, essa è stata mantenuta invariata per i test successivi, data l'omogeneità geometrica dei componenti testati.

Contestualmente, all'interno del software di acquisizione, è stata verificata la corretta associazione delle scale di conversione per ogni canale (parametri di pendenza e intercetta), assicurando la corretta trasformazione del segnale elettrico in tensione in unità fisiche. A titolo di esempio, in Figura 73 viene riportata la finestra di impostazione utilizzata per il sensore di pressione, dove è possibile osservare i coefficienti applicati per la conversione del segnale; configurazioni analoghe sono state applicate e verificate per tutti gli altri sensori impiegati nel banco.

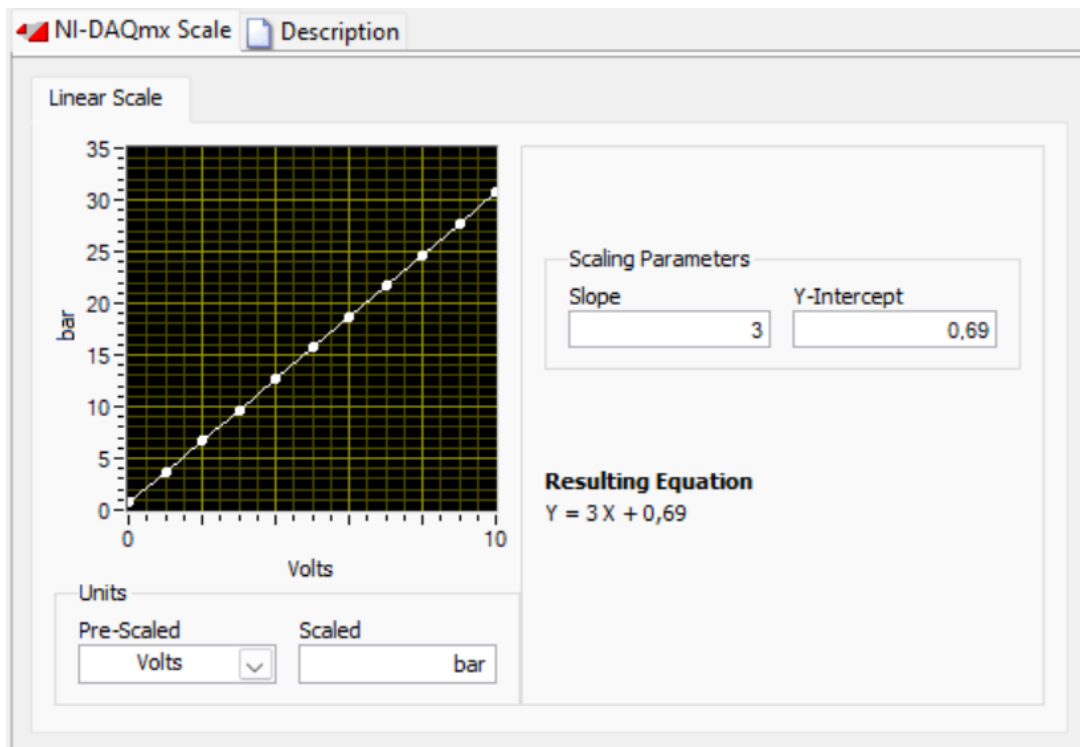


Figura 653. Finestra di configurazione della scala di conversione del sensore di pressione in LabVIEW

Per quanto riguarda la misura della portata, è stato necessario selezionare e collegare di volta in volta il flussimetro di taglia idonea al range di consumo previsto per lo specifico cuscinetto in esame. Tale accorgimento è fondamentale per garantire che la misura avvenga sempre all'interno della zona centrale del campo di misura dello strumento; in questo modo si massimizza la risoluzione e si minimizza l'incertezza, evitando letture prossime allo zero o in saturazione che comprometterebbero l'accuratezza dei dati di consumo d'aria raccolti.

Nello specifico, sono stati impiegati due diversi flussimetri, illustrati in Figura 74: un flussimetro per bassi consumi con range $0.2 \div 10$ l/min e uno per portate superiori con range $1 \div 50$ l/min. Coerentemente con l'utilizzo di flussimetri di differente taglia, si è provveduto ad aggiornare nel software di acquisizione la relativa scala di conversione, garantendo così la corretta corrispondenza tra il segnale elettrico in uscita e il valore di portata effettiva.



Figura 664. Flussimetri utilizzati per la misura dei consumi d'aria: a sinistra il modello per portate ridotte (0.2-10 l/min) e a destra quello per portate elevate (1-50 l/min)

3.5.5.4 Esecuzione dei test e raccolta dati

Completata la configurazione della strumentazione, si procede alla fase operativa del test. Inizialmente, si impone il carico obiettivo agendo sul volantino superiore e monitorando il valore reale tramite l'interfaccia LabVIEW. Questa operazione richiede una regolazione fine e unidirezionale: è fondamentale approssicare il valore di carico desiderato con cautela, incrementandolo lentamente fino alla quota prefissata. Bisogna infatti evitare accuratamente di superare l'obiettivo per poi dover ridurre il carico applicato sul cuscinetto; tale accorgimento è necessario per eliminare eventuali incertezze dovute a fenomeni di isteresi meccanica o a giochi residui negli accoppiamenti tra la vite di carico e la madrevite, garantendo così la massima ripetibilità della misura.

Per determinare con precisione lo spessore del meato (h), viene quindi definito il riferimento di meato nullo: chiudendo temporaneamente la valvola V2, si interrompe l'alimentazione pneumatica portando il cuscinetto a collassare sul contropattino. La posizione registrata dai sensori capacitivi in questa condizione di contatto rappresenta lo 'zero meccanico', parametro necessario per il successivo calcolo dello spessore del velo d'aria. Una volta ripristinata l'alimentazione tramite la riapertura della valvola V2, il velo d'aria si ripristina sollevando il componente; effettuato un ultimo controllo sulla stabilità del valore di carico e della pressione, e una volta stabilizzati i segnali di posizione (x1, x2 e x3), si procede alla registrazione dei dati sperimentali e all'esecuzione della scansione radiale per il rilievo del profilo di pressione.

3.5.5.3 Risultati sperimentali

La campagna sperimentale ha interessato quattro diverse geometrie di cuscinetti piatti in alluminio, precedentemente descritti, denominati P100, P70, P50 e P40. Per ciascun componente, le prove sono state eseguite a tre diversi livelli di pressione di alimentazione: 4 bar, 5 bar e 6 bar, al fine di caratterizzare il comportamento pneumatico al variare delle condizioni operative. La procedura di raccolta dati è stata gestita in modo sistematico per ogni combinazione di cuscinetto e pressione di alimentazione. Partendo da un carico iniziale di 30 N, la forza è stata incrementata con un passo costante di 10 N. È importante sottolineare che per ogni singolo incremento di carico e per ogni livello di pressione impostato, è stata eseguita un'intera scansione radiale del profilo di pressione.

Per quanto concerne la metodologia di scansione radiale, la procedura è iniziata posizionando il foro di misura del contropattino in corrispondenza del bordo esterno del cuscinetto; in questa condizione di pressione relativa nulla (pressione atmosferica), la quota del micrometro è stata impostata come zero di riferimento relativo. L'avanzamento verso il centro è stato eseguito in modo rigorosamente

unidirezionale: è stato infatti evitato di oltrepassare la quota desiderata per ogni punto di misura, poiché l'inversione del moto del micrometro introdurrebbe incertezze dovute ai giochi meccanici dello strumento, alterando la precisione dei valori misurati.

Il passo radiale della scansione è stato modulato in funzione dei gradienti di pressione caratteristici di ogni prova. È opportuno precisare che la procedura non ha previsto l'acquisizione dei dati in corrispondenza di raggi fissi e predefiniti per tutte le condizioni operative; al contrario, la risoluzione spaziale è stata adattata in modo dinamico di curva in curva per ottimizzare la qualità della misura. Nelle zone periferiche, dove le pendenze sono contenute, si è adottato un passo iniziale di 0.5 mm, riducendolo progressivamente in base all'andamento locale fino a un minimo di 0.01 mm nel tratto di massima pendenza, compreso tra la zona di depressione e il foro di alimentazione. Questa flessibilità nella scelta dei punti di campionamento si è resa necessaria per identificare con precisione millesimale sia i valori che le posizioni esatte dei massimi e minimi di pressione, permettendo di ricostruire con la massima fedeltà i tratti a maggiore gradiente. Per ogni curva, la misurazione è stata interrotta nel momento in cui, superato l'asse del restrittore, si osservava il chiaro superamento del valore massimo e l'inizio della successiva fase di decrescita del profilo. Un esempio rappresentativo del risultato di questa procedura è riportato di seguito nella Figura 75.

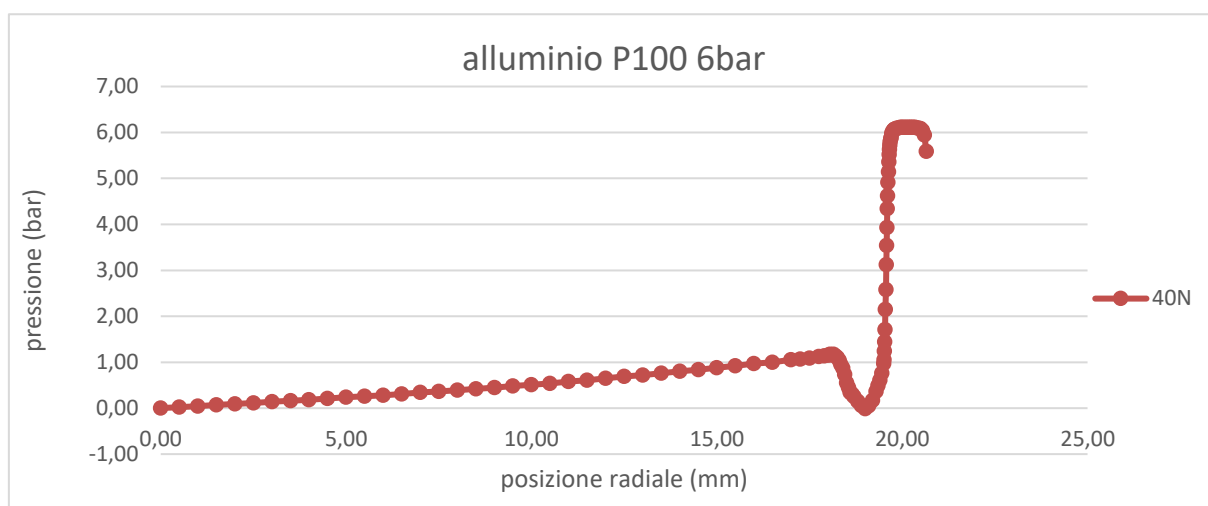


Figura 675. Profilo di pressione ottenuto per il cuscinetto in alluminio piatto P100 alla pressione di 6 bar e con un carico di 40N

L'intera base dati è stata quindi organizzata in famiglie di curve per consentire un'analisi comparativa sistematica. Nello specifico, la presentazione dei risultati segue una struttura gerarchica: per ogni cuscinetto è stata isolata una singola pressione di alimentazione, raggruppando in un unico grafico i profili radiali ottenuti al variare del carico applicato.

In Figura 76 viene riportato un set di profili grezzi acquisiti durante i test. In questa fase, i profili non sono ancora stati sottoposti alla procedura di allineamento; si può infatti notare come i picchi di pressione risultino leggermente sfasati tra loro a causa della citata incertezza nel posizionamento manuale del micrometro all'inizio di ogni scansione.

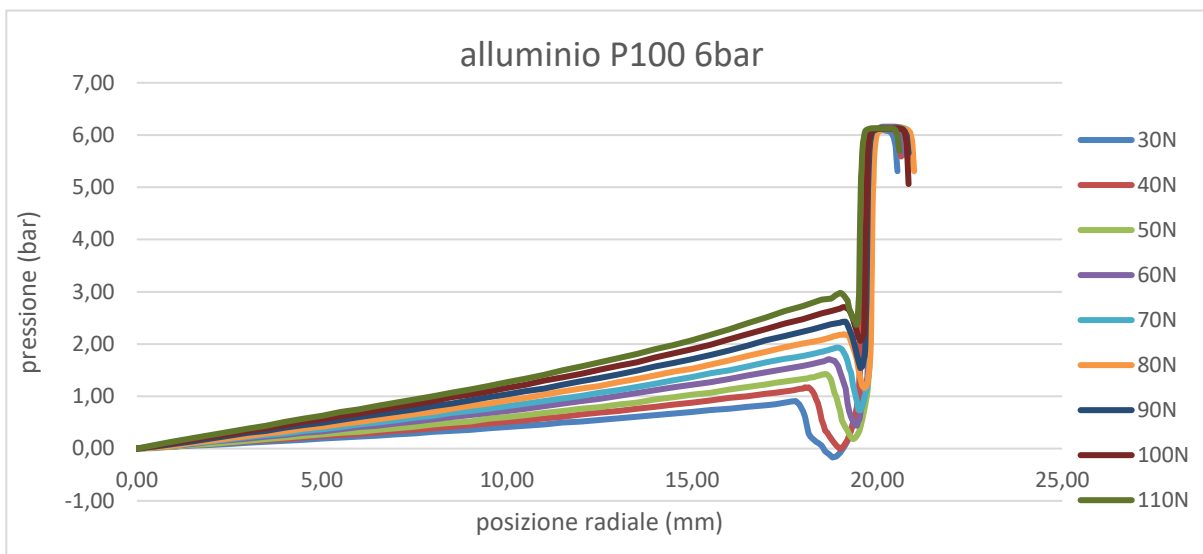


Figura 686. Set di profili di pressione ottenuto per il cuscinetto in alluminio piatto P100 alla pressione di 6 bar per diversi livelli di carico applicato

Per eliminare gli sfasamenti tra le curve ottenute e rendere i dati confrontabili, è stata eseguita una procedura di allineamento su ogni set di curve. Poiché il foro di alimentazione ha un diametro finito, la pressione misurata in corrispondenza del centro del cuscinetto non si presenta con un singolo punto di picco, bensì come un plateau di pressione massima.

Per identificare con rigore l'asse di simmetria del componente, è stata analizzata l'estensione di tale intervallo: il centro geometrico del profilo è stato fissato nel punto medio del plateau. Questo criterio ha permesso di compensare le piccole variazioni di posizionamento del micrometro tra una scansione e l'altra, garantendo che lo 'zero' di ogni curva corrispondesse esattamente all'asse fisico del restrittore. Una volta determinato il centro di tutte le curve, i dati sono stati allineati e specchiati: la coordinata radiale è stata ridefinita affinché l'origine ($r=0$) coincidesse con il punto medio individuato, con valori crescenti verso il bordo esterno. Tale trasformazione è stata utilizzata per uniformare i risultati alle coordinate cilindriche standard, rendendo i grafici direttamente confrontabili con i modelli analitici presenti in letteratura.

In Figura 77 viene mostrato il risultato di tale elaborazione, in cui i profili precedentemente sfasati risultano ora allineati e specchiati.

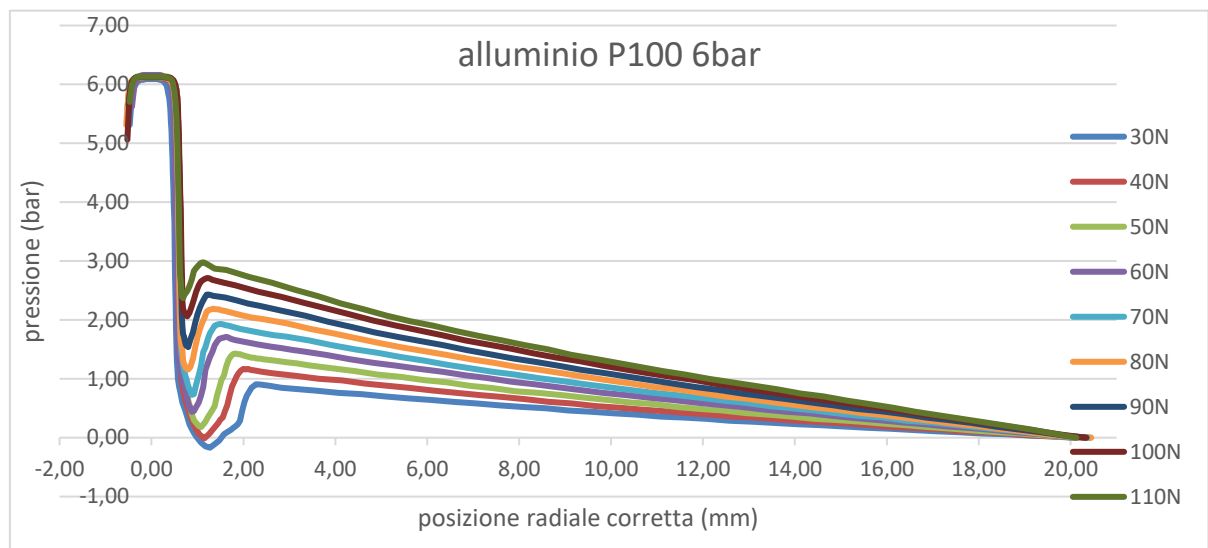


Figura 697. Set di profili di pressione ottenuto per il cuscinetto in alluminio piatto P100 alla pressione di 6 bar per diversi livelli di carico applicato dopo la procedura di modifica della coordinata radiale

L'andamento complessivo delle curve ottenute risulta pienamente coerente con quanto riportato nella letteratura scientifica di riferimento per i cuscinetti aerostatici a foro centrale. I profili sperimentali confermano infatti che la morfologia della distribuzione di pressione è strettamente dipendente dalle condizioni cinematiche del fluido nel meato.

Nello specifico, si osserva che il fenomeno della “pressure depression” (la caduta di pressione locale subito dopo l'immissione) tende ad accentuarsi all'aumentare della pressione di alimentazione e dell'altezza del meato. Nelle prove eseguite, tale spessore è direttamente correlato al carico applicato: per carichi ridotti, il meato risulta infatti più ampio, favorendo l'accelerazione del fluido. Al contrario, aumentando il carico, il meato si riduce, agendo come una strozzatura che rallenta il flusso e attenua gli effetti inerziali; questo porta a una graduale riduzione della depressione e a un profilo di pressione più uniforme, prossimo a quello puramente viscoso. La perfetta corrispondenza tra questi risultati e i modelli teorici presenti in letteratura valida la bontà della metodologia di misura adottata e la precisione del sistema di acquisizione utilizzato.

Un aspetto di particolare rilievo emerso durante la fase avanzata della sperimentazione, nello specifico durante i test sui cuscinetti P40 e P70 piatti in alluminio, riguarda l'insorgere di fenomeni dinamici non previsti dai modelli puramente statici. È stata infatti rilevata una marcata instabilità del segnale della pressione, che si manifesta sotto forma di oscillazioni periodiche della pressione localizzate con precisione nella zona circoscritta al minimo locale di pressione della pressure depression. La natura di queste fluttuazioni è riconducibile alla complessità del campo di moto in prossimità dell'ingresso nel meato dove si ha la transizione da moto inerziale a viscoso: in quest'area, l'elevata energia cinetica del fluido e i bruschi gradienti di pressione possono innescare fenomeni di distacco della vena fluida o vorticità localizzate che rendono il flusso non stazionario.

Al fine di verificare l'estensione radiale di tale fenomeno, sono state effettuate diverse acquisizioni stazionarie in corrispondenza di differenti raggi all'interno della medesima regione di depressione per ogni sessione di test. L'analisi comparativa di queste registrazioni ha evidenziato leggere ma sistematiche differenze sia nell'ampiezza che nella frequenza delle oscillazioni al variare della posizione radiale all'interno della stessa curva.

La registrazione di tali oscillazioni dopo la loro prima identificazione è stata ritenuta necessaria poiché esse rappresentano un segnale precursore delle instabilità dinamiche che possono compromettere il comportamento del supporto, portando fino in casi estremi all'insorgere del fenomeno del pneumatic

hammer. L'obiettivo è quello di indagare gli eventuali legami tra l'ampiezza e la frequenza di tali fluttuazioni e i principali parametri di funzionamento, quali il carico applicato e la pressione di alimentazione. Si ipotizza infatti che la variazione dello spessore del meato influenzi direttamente la stabilità del sistema, agendo sulla capacità di smorzamento del velo d'aria e determinando l'allontanamento o l'avvicinamento alla condizione critica di instabilità.

In Figura 79 viene riportata la schermata completa dell'interfaccia di acquisizione dei dati di LabVIEW durante una condizione di instabilità per il cuscinetto P70. In questa visualizzazione d'insieme, che comprende i segnali di posizione dei tre sensori capacitivi, la lettura del carico applicato, la portata e il valore di pressione, è possibile osservare come la vibrazione interessi l'intero comportamento dinamico del sistema. Il fenomeno si manifesta in modo particolarmente evidente sul tracciato della pressione relativa al punto di misura. Per una migliore visualizzazione in Figura 7 viene riportato il solo dettaglio del segnale di pressione, permettendo di apprezzare con maggiore precisione la natura periodica e l'ampiezza delle oscillazioni.

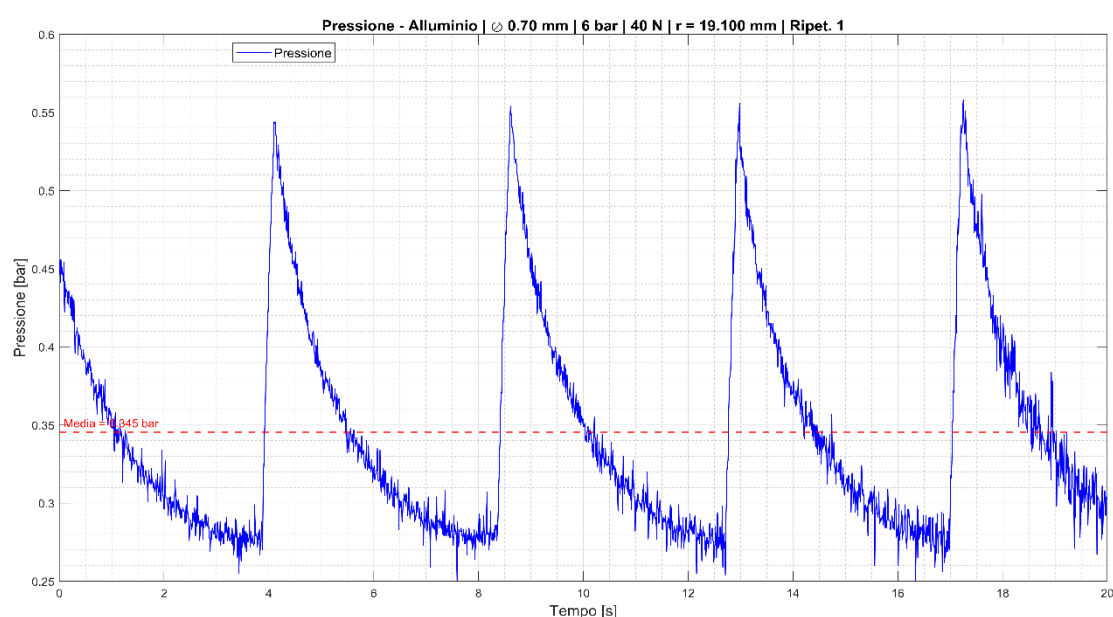


Figura 708. Dettaglio del segnale di pressione acquisito durante i test per il cuscinetto in alluminio piatto P70, con pressione di alimentazione pari a 6 bar e carico applicato di 40 N, rilevato alla coordinata radiale di 1.05 mm

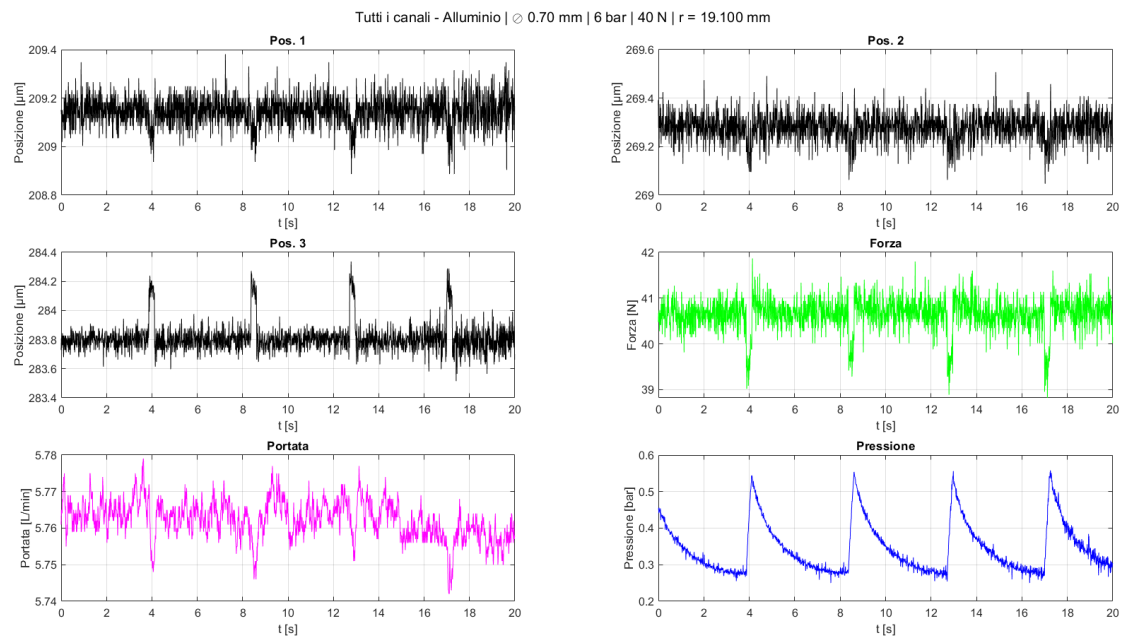


Figura 719. Segnali di posizione, forza, portata e pressione acquisiti durante i test per il cuscinetto in alluminio piatto P70, con pressione di alimentazione pari a 6 bar e carico applicato di 40 N, rilevato alla coordinata radiale di 1.05 mm

Analizzando congiuntamente i tracciati sopra riportati, si osserva una chiara corrispondenza temporale tra i picchi presenti nei diversi grafici. La sincronia tra le oscillazioni della pressione locale e i microspostamenti registrati dai sensori capacitivi (soprattutto il sensore di posizione 3) conferma che l'instabilità non è un disturbo isolato del segnale, ma una risposta dinamica coerente dell'intero sistema. In particolare, è possibile notare come ogni fluttuazione del segnale di pressione sia accompagnata anche da una variazione corrispondente nella portata e nella forza di carico, evidenziando un accoppiamento fluido-struttura che caratterizza lo stato di instabilità del cuscinetto in queste specifiche condizioni operative.

4. Elaborazione dati

In questo capitolo viene illustrato il procedimento di analisi utilizzato per l'elaborazione dei dati raccolti durante le prove sperimentali. Il processo di trasformazione dei dati grezzi in risultati significativi è stato eseguito mediante lo sviluppo di algoritmi in ambiente MATLAB. L'architettura del sistema di calcolo è strutturata per garantire la ripetibilità dell'analisi e la corretta correlazione tra le grandezze registrate al banco prova per profili di pressione, fondamentali per la successiva determinazione dei coefficienti di efflusso.

La metodologia di calcolo è stata applicata a un dataset complessivo di 12 configurazioni sperimentali, derivanti dalla combinazione di quattro diversi diametri dei restrittori (0.4, 0.5, 0.7 e 1 mm) testati a tre differenti livelli di pressione nominale relativa di alimentazione (4, 5 e 6 bar). Per ogni combinazione, l'analisi ha previsto l'elaborazione di molteplici livelli di carico, rendendo necessaria una gestione automatizzata dei flussi di dati per la gestione della mole di dati acquisiti.

Un aspetto centrale nello sviluppo di tali script è stata la ricerca di una struttura flessibile e parametrizzata. Gli algoritmi sono stati concepiti per essere indipendenti dal singolo set di dati qui presentato, garantendo la validità della procedura anche per future campagne sperimentali su diverse configurazioni di cuscinetti o differenti condizioni operative. Ciò pone le basi per una caratterizzazione

sistematica che si estenda oltre i casi studio analizzati in questa tesi, fornendo uno strumento di analisi già consolidato e pronto all'uso.

4.2 Acquisizione e pre-processing dei dati sperimentali

L'elaborazione dei risultati ottenuti sperimentalmente ha richiesto lo sviluppo di una procedura di calcolo strutturata, volta a trasformare i dati grezzi registrati dalla strumentazione in grandezze fruibili per i successivi procedimenti di calcolo. Prima di procedere alla determinazione dei coefficienti caratteristici dei cuscinetti, è stato infatti necessario implementare una fase di importazione e pulizia del dataset.

4.2.1 Lettura e salvataggio dati

Il primo codice MATLAB (riportato nell'appendice C.1) è dedicato alla lettura e al salvataggio sistematico dei dati provenienti dal banco prova per profili di pressione. Data la mole di informazioni raccolta, è stata definita una procedura di acquisizione automatizzata che sfrutta la nomenclatura parametrica dei file Excel (già descritta in precedenza) per identificare univocamente ogni sessione di prova e i suoi valori registrati.

L'algoritmo esegue una scansione sistematica dei file Excel selezionati, analizzando in modo automatico i diversi fogli di lavoro che compongono ogni file, ciascuno dei quali dedicato a un differente livello di forza nominale applicata al cuscinetto durante la prova.

Per ogni foglio, lo script estrae e memorizza in appositi vettori le grandezze registrate durante la rilevazione dei profili di pressione:

- **Posizione** radiale del foro del contropattino;
- **Forza** applicata al cuscinetto;
- **Portata** sperimentale misurata dal flussimetro;
- **Pressione** relativa misurata nel meato.

A completamento di questo dataset sperimentale, lo script associa a ogni sessione di lettura i parametri geometrici e costruttivi specifici del componente testato, estratti direttamente dai metadati del file. Nello specifico, vengono acquisiti il diametro nominale del restrittore, il materiale del cuscinetto, la morfologia della superficie (distinguendo tra superfici piate o concave) e la pressione nominale di alimentazione prevista per quel set di prove.

Infine, viene integrato il valore del diametro reale del restrittore, misurato preventivamente tramite microscopia ottica. Questa integrazione del dato geometrico reale e delle proprietà del componente all'interno della struttura di calcolo rappresenta un passaggio chiave: permette all'algoritmo di determinare con estrema precisione l'area della sezione di efflusso e di correlare correttamente i risultati alle condizioni al contorno, parametri che risulterebbero altrimenti approssimativi se basati esclusivamente sui valori nominali di progetto.

Una volta completata l'estrazione dei parametri, i valori di interesse di ciascun file vengono salvati in variabili strutturate con estensione nativa MATLAB. Questa operazione permette di archiviare i dati in un formato ottimizzato, pronti per essere richiamati ed elaborati senza la necessità di ripetere la procedura di importazione dai fogli di calcolo originali.

4.2.2 Preparazione dei dati

Una volta archiviati i dati di output del primo codice, è stato sviluppato un secondo script (riportato in Appendice C.2) con l'obiettivo di preparare le variabili per la fase di calcolo numerico. Questa routine funge da ponte logico tra l'acquisizione e l'elaborazione: il suo compito principale è richiamare i file salvati in precedenza e convertirne i valori nelle unità di misura del Sistema Internazionale (SI). Nello specifico, lo script assicura che tutte le lunghezze siano espresse in metri [m], tutte le pressioni siano convertite da relative ad assolute ed espresse in Pascal [Pa] e che le portate volumetriche siano trasformate in portate massiche in chilogrammi al secondo [kg/s].

Ciò garantisce che ogni grandezza sia pronta per l'analisi fluidodinamica, caricando nel workspace i dati pre-processati necessari come input per il modulo di calcolo finale. L'automazione di questo passaggio elimina la necessità di ulteriori interventi manuali sui dataset o sui codici, prevenendo potenziali fonti di errore legate alla trascrizione o alla conversione dei dati e assicurando la ripetibilità del processo di analisi.

Oltre alla gestione dei dati sperimentali, lo script provvede all'inizializzazione delle costanti fisiche fondamentali per la successiva fase di calcolo, impostando i parametri dell'aria standard necessari per la corretta modellazione del fluido:

- Temperatura assoluta ($T_s = 293\text{ K}$);
- Costante del gas ($R_g = 287.053\text{ J/(Kg/K)}$);
- Pressione atmosferica ($P_{amb} = 101325\text{ Pa}$);
- Indice adiabatico ($k = 1.4$);
- Viscosità dinamica ($\mu = 1.81 \cdot 10^{-5}\text{ Pa/s}$).

Il risultato di questa procedura è un ambiente di calcolo normalizzato in cui tutte le variabili (pressione assoluta, portata massica e parametri geometrici) sono espresse in unità coerenti e pronte per essere elaborate dagli algoritmi di determinazione del coefficiente di efflusso.

4.3 Metodologia di calcolo e determinazione sperimentale del coefficiente di efflusso C_d

4.3.1 Identificazione della zona viscosa e calcolo della forza e della portata medie

La prima fase dell'algoritmo, che comprende i primi tre passaggi logici dello script, è dedicata alla selezione della porzione di dati sperimentali più significativa per la successiva caratterizzazione fluidodinamica del meato. Durante la scansione effettuata dal banco prova, il foro del sensore di pressione attraversa l'intera estensione radiale del pattino. Per isolare il comportamento puramente viscoso del fluido, nello script è stata definita una zona viscosa compresa tra i raggi di 3 mm e 16 mm.

L'imposizione di questi limiti radiali è necessaria per garantire l'esclusione di regioni caratterizzate da fenomeni di possibili instabilità: escludendo la regione prossima al restrittore si evita la zona di forte accelerazione e potenziali turbolenze in prossimità del centro del pattino (per raggi inferiori a 3 mm), mentre escludendo la regione più esterna si eliminano i possibili fenomeni di bordo e le instabilità legate allo scarico in atmosfera (per raggi superiori a 16 mm). Tale restrizione del dominio d'indagine risulta inoltre necessaria in quanto le formulazioni teoriche adottate per l'analisi dei dati sono valide esclusivamente all'interno della regione a regime viscoso del meato. La validità di questa scelta metodologica è confermata dall'analisi dei grafici della forza applicata al cuscinetto durante i test visibile in Figura 80 e della portata massica visibile in Figura 81. Andamento della forza globale misurata dalla cella di carico in funzione della posizione radiale del foro di misura del contropattino, ottenuto per il cuscinetto P50 alimentato a 5 bar relativi e con una forza nominale applicata di 90 N.

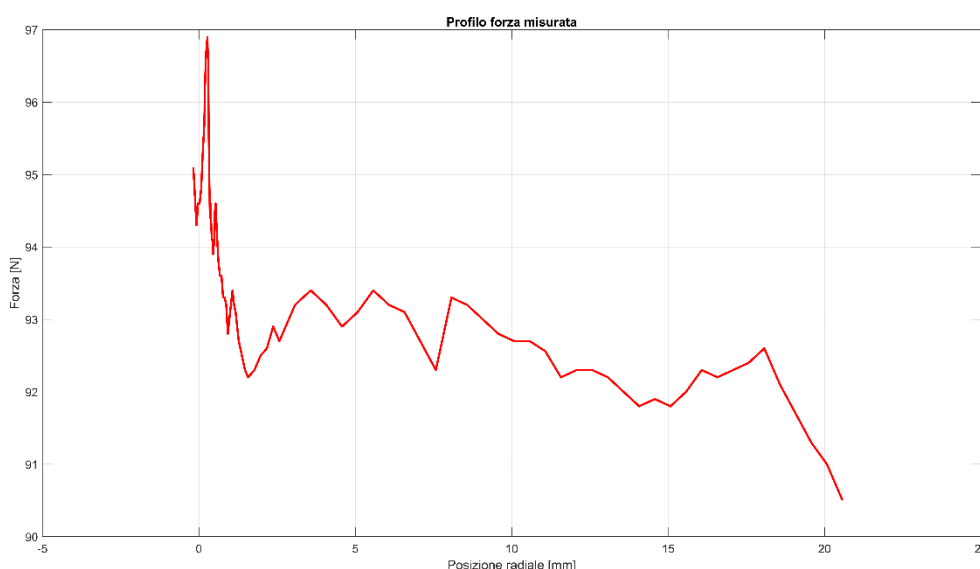


Figura 80. Andamento della forza globale misurata dalla cella di carico in funzione della posizione radiale del foro di misura del contropattino, ottenuto per il cuscinetto P50 alimentato a 5 bar relativi e con una forza nominale applicata di 90 N

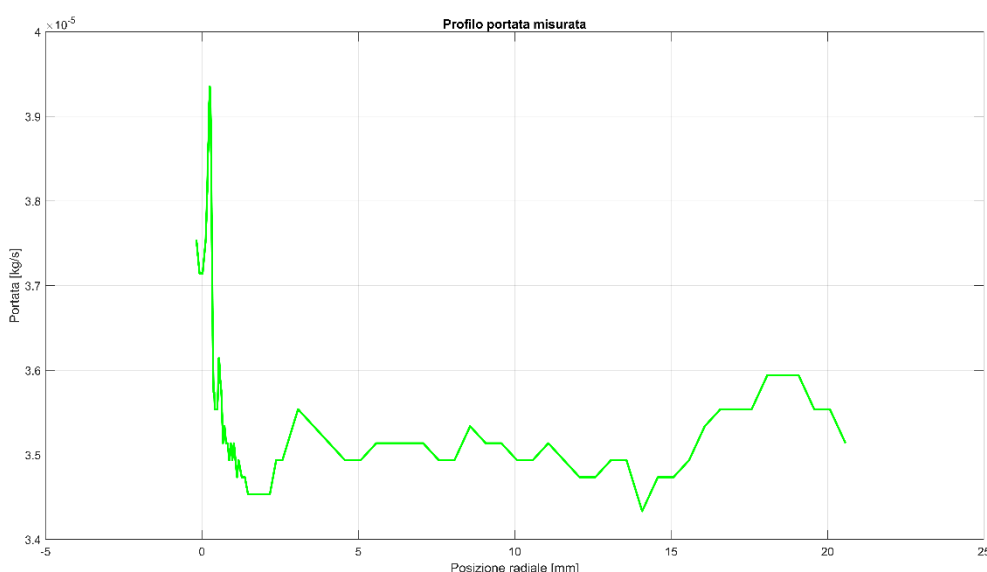


Figura 81. Andamento della portata massica misurata dalla cella di carico in funzione della posizione radiale del foro di misura del contropattino, ottenuto per il cuscinetto P50 alimentato a 5 bar relativi e con una forza nominale applicata di 90 N

In tali immagini si osserva chiaramente come, nell'intervallo 3-16 mm, entrambi i segnali presentino un andamento stabile e con fluttuazioni ridotte, garantendo che il cuscinetto operi in una condizione di equilibrio durante il passaggio del sensore.

Identificato l'intervallo definito descritto in precedenza, l'algoritmo procede all'estrazione dei parametri necessari per la prima fase della modellazione numerica. Per tutti i punti di misura compresi tra i raggi di 3 mm e 16 mm, lo script esegue una media aritmetica dei valori acquisiti, definendo così la portata media sperimentale ($\bar{G}_{sperim}$) e la forza media sperimentale ($\bar{F}_{sperim}$), rispettivamente:

$$\bar{G}_{sperim} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{sperim,i}$$

$$\bar{F}_{sperim} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{sperim,i}$$

Dove N rappresenta il numero di punti con coordinata radiale compresa nell'intervallo viscoso ristretto tra 3 e 16 mm.

4.3.2 Determinazione numerica dell'altezza del meato

Una volta selezionati i segnali e definiti i valori medi di riferimento di forza e portata, l'algoritmo procede alla determinazione dell'altezza del meato h . Questa grandezza rappresenta lo spessore del film d'aria tra il pattino e il contropattino ed è un parametro critico, poiché da esso dipendono il comportamento globale e le performance complessive del sistema.

Data la difficoltà di misurare direttamente h con precisione micrometrica durante la scansione radiale, lo script adotta l'approccio proposto in letteratura [8], basato sulla combinazione dei dati sperimentali con l'espressione analitica per flussi laminari e isotermi in cuscinetti aerostatici circolari. La relazione che lega la portata massica (G_{gap}) al profilo di pressione è la seguente:

$$G_{gap} = \frac{\pi \cdot h^3 \cdot (p_0^2 - p_a^2)}{12 \cdot \mu \cdot R_g \cdot T_s \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}$$

Per determinare l'altezza numerica locale ($h_{num,i}$), lo script inverte questa espressione applicandola a ogni punto della scansione radiale all'interno della zona viscosa selezionata. In questo modo, l'altezza viene ricavata imponendo che la portata teorica coincida con la portata media sperimentale ($\bar{G}_{sperim}$) calcolata in precedenza:

$$h_{num,i} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \mu \cdot R_g \cdot T_s \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \cdot \bar{G}_{sperim}}{\pi \cdot (p_{sperim,i}^2 - p_a^2)}}$$

I termini che compaiono nell'espressione sono così definiti:

- $p_{sperim,i}^2$ e rappresentano i valori di pressione misurata sperimentalmente alla rispettiva coordinata radiale r_i all'interno della zona viscosa;
- p_a^2 indica la pressione ambiente di scarico;

- R e R₀ identificano, rispettivamente, il raggio esterno del cuscinetto (per i test eseguiti sempre pari a 20 mm) e il raggio del restrittore preso in esame.

Al termine del ciclo di calcolo esteso a tutti i punti dell'intervallo viscoso compreso tra 3 e 16 mm, lo script genera un vettore di altezze locali la cui media aritmetica definisce l'altezza media numerica ($\bar{h}_{num}$):

$$\bar{h}_{num} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{num,i}$$

Questo valore, espresso in micrometri (μm), rappresenta la stima più accurata dell'altezza del meato d'aria per la specifica prova. Esso costituisce il parametro geometrico fondamentale per le fasi successive, in particolare per la ricerca iterativa della pressione di imbocco nel meato p_0 e la determinazione finale del coefficiente di efflusso.

L'andamento dei valori locali di h è riportato nella Figura 82, dove è possibile osservare la distribuzione delle altezze ricavate punto per punto lungo il raggio del meato rappresentato dai punti blu e il valore medio evidenziato dalla linea rossa tratteggiata.

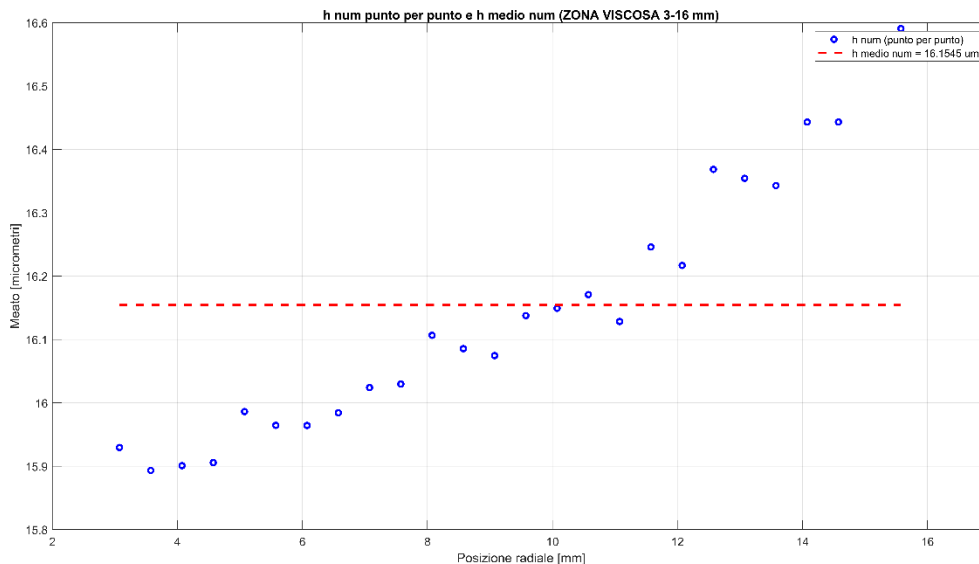


Figura 722. Distribuzione dei valori locali dell'altezza del meato ($h_{num,i}$) e altezza media del meato ($\bar{h}_{num}$) calcolati nell'intervallo radiale 3-16 mm, ottenuti per il cuscinetto P50 alimentato a 5 bar relativi e con una forza nominale applicata di 90 N

4.3.3 Bilancio di forza e calcolo della pressione di imbocco

I successivi step dell'algoritmo rappresentano la fase di chiusura del bilancio energetico e meccanico del sistema. Sebbene l'altezza del meato sia stata ricavata nel paragrafo precedente, la reale capacità di carico dipende direttamente dalla pressione effettiva all'interno del meato.

A tal fine, lo script eguaglia la forza media sperimentale ($\bar{F}_{sperim}$), calcolata nei passaggi precedenti, alla forza numerica (F_{num}) derivante dall'integrale del profilo di pressione ideale su tutta la superficie del cuscinetto. L'espressione analitica utilizzata per il calcolo della forza teorica, coerentemente con il modello di flusso isoterma e comprimibile, è la seguente:

$$F_{num} = \int_{R_0}^R p(r) \cdot 2\pi r \cdot dr$$

Sviluppando l'integrale del profilo di pressione viscoso, si ottiene la formulazione esplicita che lo script impiega nel ciclo iterativo per la ricerca del valore di pressione p_0 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{F}_{sperim} = F_{num} \\ F_{num} = \pi \cdot p_{0,num} \cdot R_0^2 \cdot e^{2/A} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot A}{8}} \cdot \left[erf\left(\sqrt{\frac{2}{A}}\right) - erf\left(\sqrt{\frac{2}{A}} \cdot \frac{p_a}{p_{0,num}}\right) \right] \\ A = \frac{1 - \left(\frac{p_a}{p_{0,num}}\right)^2}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} \end{array} \right.$$

L'ipotesi semplificativa fondamentale in questa fase è che la forza numerica sia ottenuta considerando che l'intero meato operi in regime puramente viscoso: si assume, cioè, che le equazioni analitiche della lubrificazione aerostatica siano valide dal raggio del restrittore fino al bordo esterno del cuscinetto senza discontinuità.

Poiché nella realtà il profilo di pressione vicino all'imbocco è distorto da effetti inerziali e turbolenze che riducono la portanza rispetto a un caso ideale (fenomeno della depressione all'imbocco del meato), l'algoritmo ricerca iterativamente il valore di pressione di imbocco equivalente (p_0). Questo parametro rappresenta il valore di pressione ideale che dovrebbe esistere all'ingresso del meato per generare una forza totale pari a quella misurata sperimentalmente, sotto l'ipotesi di flusso puramente viscoso.

Per risolvere questa uguaglianza e determinare il valore incognito di p_0 lo script implementa il metodo numerico iterativo della Regula Falsi. L'algoritmo opera minimizzando una funzione obiettivo definita come lo scarto tra la forza media sperimentale e la forza teorica calcolata analiticamente. Il processo di calcolo prosegue ricorsivamente fino a quando il valore assoluto di tale scarto non risulta inferiore alla tolleranza impostata nel codice, pari a $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6} N$:

$$f(p_0) = |F_{num}(p_{0,num}, \bar{h}_{num}) - \bar{F}_{sperim}| < \varepsilon$$

Una volta individuato il valore di p_0 che soddisfa l'equilibrio di forze, lo script lo utilizza per ricostruire l'intero andamento teorico della pressione lungo il raggio del meato. Sotto l'ipotesi di flusso puramente viscoso, isoterma e comprimibile, il profilo di pressione $p_{num}(r)$ viene descritto dalla seguente espressione analitica:

$$p_{num}(r) = p_{0,num} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{R_0}\right)}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_0}\right)^2 \right]}$$

In questa formulazione, r rappresenta la coordinata radiale che, per la ricostruzione dell'intero profilo di pressione, varia con continuità dal raggio del restrittore (R_0) fino al bordo esterno del cuscinetto (R). Tale profilo rappresenta la distribuzione di pressione ideale che, pur non tenendo conto delle perturbazioni locali all'imbocco, garantisce la medesima capacità di carico misurata sperimentalmente dal banco prova. Come illustrato nella Figura 83, la curva di pressione teorica (p_{th}) funge da riferimento per la validazione del modello.

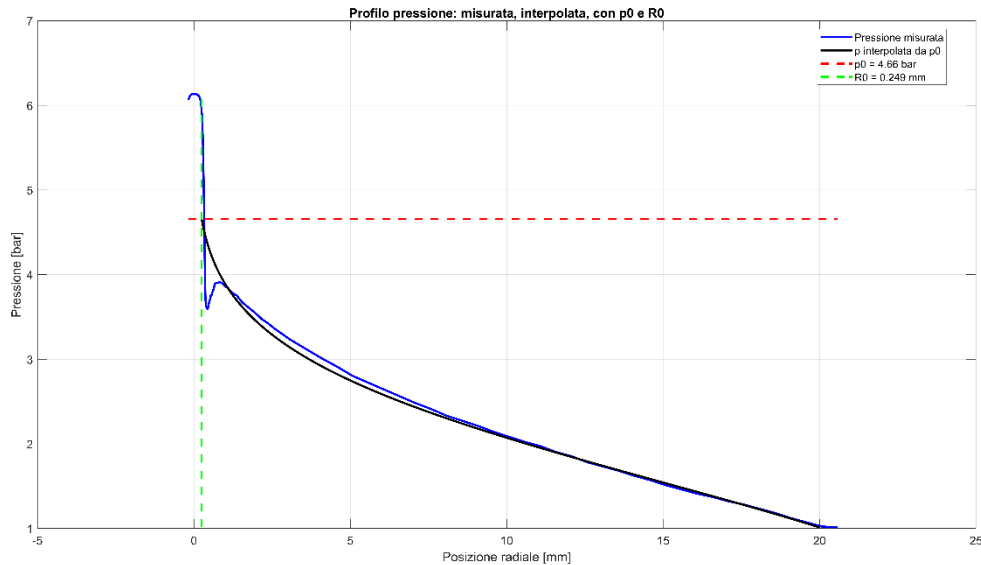


Figura 733. Confronto tra il profilo di pressione sperimentale (blu) e teorico $p(r)$ ricostruito analiticamente (nero), ottenuti per il cuscinetto P50 alimentato a 5 bar relativi e con una forza nominale applicata di 90 N. La linea verticale verde tratteggiata indica il valore del raggio del restrittore R_0 mentre la linea orizzontale rossa rappresenta la pressione p_0 calcolata

Dal confronto tra l'andamento teorico della pressione e i punti misurati dal sensore durante la scansione, si evince chiaramente lo scostamento tra realtà e modello nella regione centrale del meato. In particolare, in corrispondenza del foro di alimentazione, la pressione sperimentale risulta inferiore a quella ideale (p_0) a causa dei fenomeni inerziali e della caduta di pressione localizzata. Questa discrepanza energetica è di fondamentale importanza poiché permetterà, nello step finale, di quantificare correttamente il coefficiente di efflusso (C_d), legando la portata massica effettiva alle reali condizioni di pressione all'imbocco.

4.3.4 Determinazione del coefficiente di efflusso

L'ultima fase dell'algoritmo consiste nella determinazione del coefficiente di efflusso C_d , il parametro adimensionale che sintetizza l'efficienza pneumatica del sistema di alimentazione e quantifica le perdite di carico concentrate nel passaggio tra l'orifizio e il meato.

Il calcolo inizia con la definizione dell'area equivalente di passaggio (A_{eqv}). A differenza di un approccio semplificato, lo script calcola tale sezione tenendo conto della geometria reale del sistema, che prevede il passaggio del fluido prima attraverso il foro del restrittore (sezione circolare) e successivamente attraverso l'ingresso nel meato (sezione anulare). Le due aree vengono definite come:

- **Area circolare del restrittore (A_c):**

$$A_c = \pi \cdot R_0^2$$

dove R_0 rappresenta il raggio reale del restrittore.

- **Area anulare di ingresso (A_a):**

$$A_a = 2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \bar{h}_{num}$$

che rappresenta la superficie laterale del cilindro di raggio R_0 e altezza pari al meato medio calcolato.

L'area equivalente A_{eqv} viene quindi determinata considerando la transizione senza discontinuità tra queste due sezioni, lo script procede al calcolo della portata teorica ideale (G_{th}):

$$\begin{cases} \delta = \frac{A_c}{A_a} \\ A_{eqv} = \frac{A_c}{\sqrt{1 + \delta^2}} \end{cases}$$

Come illustrato in Figura 84, l'area equivalente di passaggio (A_{eqv}) non viene calcolata come semplice valore minimo tra l'area del foro (A_c) e l'area del meato (A_a), bensì tramite una funzione di transizione continua in funzione dell'altezza del meato ($\bar{h}_{num}$). Questo approccio permette di modellare in modo analitico il passaggio graduale tra i due regimi geometrici, evitando discontinuità numeriche nel calcolo del coefficiente di efflusso.

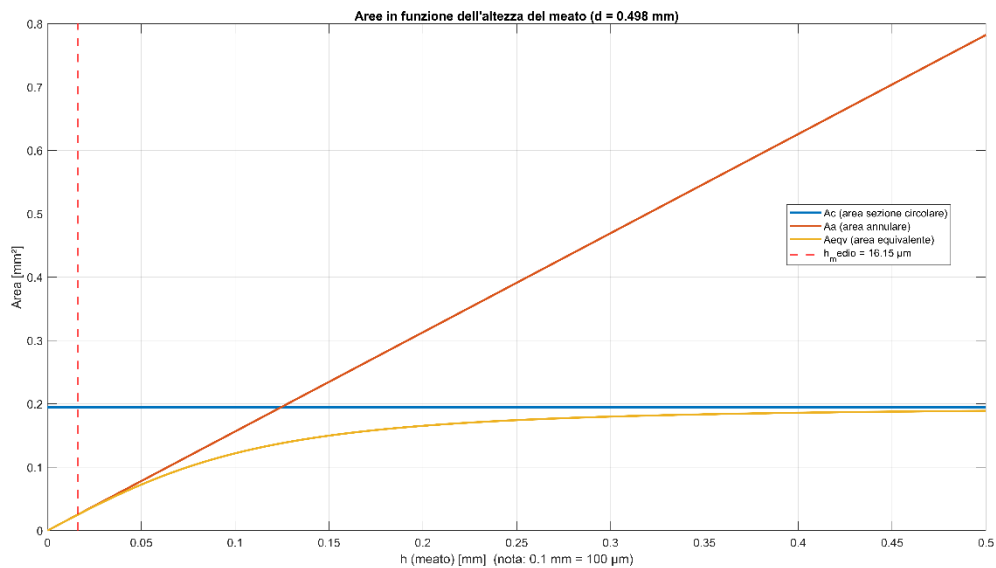


Figura 744. Grafico di confronto tra l'area del foro (A_a), l'area del meato (A_c) e l'area equivalente di passaggio (A_{eqv}) in funzione dell'altezza del meato h .

Per valori ridotti di altezza di meato, l'area anulare di ingresso (A_a) risulta sensibilmente inferiore a quella del foro (A_c); in questa condizione è proprio la superficie del mantello cilindrico a rappresentare il vero strozzamento del sistema, dominando la dinamica dell'efflusso. Al crescere di h , si verifica l'aumento lineare della sezione anulare fino al superamento del valore critico imposto dall'area del foro del restrittore. Per valori elevati di h , infatti, l'area del foro (A_c) che risulta costante in funzione di h diventa la sezione minima di passaggio, assumendo il ruolo di sezione dominante e definendo così il regime di funzionamento del restrittore.

È importante sottolineare che, per l'intero range di altezze di meato investigato durante le prove sperimentali (compreso approssimativamente tra $12 \mu\text{m}$ e $45 \mu\text{m}$), il sistema opera costantemente in una condizione in cui l'area anulare è estremamente più piccola rispetto all'area circolare del foro. Di conseguenza, l'area equivalente risulta quasi coincidente con l'area anulare. Ciò conferma che, nelle

configurazioni testate, lo strozzamento principale avviene sistematicamente all'ingresso del meato, rendendo la portata e il relativo C_d parametri sensibili alla variazione della di altezza del film d'aria sotto il cuscinetto.

Identificata quindi l'area equivalente di passaggio (A_{eqv}), lo script procede al calcolo della portata teorica ideale (G_{th}). Questo valore rappresenta la massa d'aria che transiterebbe nell'unità di tempo attraverso il restrittore in assenza di dissipazioni energetiche (urti, contrazioni della vena o attriti), assumendo un comportamento del fluido comprimibile e un'espansione isoentropica. La formulazione impiegata per G_{th} tiene conto del rapporto tra la pressione di imbocco equivalente (p_0) e la pressione di alimentazione (p_s):

$$G_{th} = \begin{cases} K_t \cdot \Psi \cdot p_s \cdot A_{eqv} & \text{se } b \leq b_c \\ K_t \cdot \Psi \cdot p_s \cdot A_{eqv} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\left(\frac{p_0}{p_s} \right) - b_c}{1 - b_c} \right)^2} & \text{se } b > b_c \end{cases}$$

Per la risoluzione dell'equazione, lo script utilizza i seguenti parametri:

- **Rapporto di pressione attuale (b):** definito come il rapporto tra la pressione di imbocco calcolata numericamente e la pressione di alimentazione:

$$b = \frac{p_{0,num}}{p_s}$$

- **Rapporto di pressione critico (b_{cr}):** valore limite che separa il regime di efflusso subsonico da quello sonico, calcolato come:

$$b_{cr} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.5283$$

dove k rappresenta il rapporto tra i calori specifici dell'aria, pari a 1.4.

- **Coefficiente di temperatura (K_t):** parametro correttivo definito come:

$$K_t = \sqrt{\frac{293}{T_s}}$$

Nel caso specifico, assumendo una temperatura di ristagno T_s pari a 293 K (20°C), il coefficiente assume valore unitario ($K_t = 1$).

- **Parametro di efflusso (Ψ):** costante legata alle proprietà del gas e alle condizioni di ristagno, calcolata come:

$$\Psi = \frac{0,686}{\sqrt{R_g \cdot T_s}}$$

dove R_g è la costante specifica del gas, pari a 287,05 J/(kg·K).

Una volta determinata G_{th} attraverso queste relazioni, l'algoritmo esegue l'ultimo passaggio fondamentale: il calcolo del coefficiente di efflusso (C_d). Questo viene ricavato dal rapporto tra la portata media reale misurata sperimentalmente (G_{sperim}) e la portata teorica ideale appena calcolata:

$$C_d = \frac{\bar{G}_{sperim}}{G_{th}}$$

Il valore di C_d così ottenuto fornisce una misura diretta dell'efficienza del restrittore, permettendo di correggere il modello analitico ideale e di riflettere accuratamente le perdite di carico concentrate, le contrazioni della vena fluida e gli effetti inerziali osservati durante le prove sperimentali. L'algoritmo si conclude con il salvataggio dei risultati in una struttura dati complessiva che associa a ogni condizione di prova il vettore di parametri identificativi minimi: $R_{0\text{ reale}}, \bar{h}_{num}, p_0$ e C_d .

Al fine di mappare il comportamento del componente, il coefficiente di efflusso viene analizzato graficamente in funzione del rapporto geometrico h/d , del rapporto di pressione b , dell'area equivalente A_{eqv} e dei parametri adimensionali di Reynolds (Re_{th}) e Mach (Ma_{th}).

I numeri adimensionali fluidodinamici utilizzati per l'analisi sono calcolati sulla sezione di controllo equivalente del restrittore tramite le seguenti espressioni:

- **Numero di Reynolds teorico (Re_{th}):**

$$Re_{th} = \frac{G_{th} \cdot \bar{h}_{num}}{\mu \cdot A_{eqv}}$$

- **Numero di Mach teorico (Ma_{th}):**

$$Ma_{th} = \frac{G_{th}}{\rho \cdot A_{eqv} \cdot \sqrt{K \cdot R \cdot T}}$$

4.4 Procedura di calcolo iterativa e rappresentazione grafica dei risultati

Al fine di gestire l'elevata mole di dati acquisiti durante l'intera campagna sperimentale e garantire la coerenza dei risultati, l'intera logica di calcolo descritta nei paragrafi precedenti è stata integrata in un unico ambiente di esecuzione automatizzato, denominato Master (riportato nell'appendice C.1). Questo modulo richiama e esegue automaticamente in modo iterativo gli Script 2 e Script 3 per ogni condizione di misura disponibile nel database.

L'implementazione automatica permette di processare simultaneamente tutte le combinazioni di parametri testate al banco prova:

- Le diverse **pressioni di alimentazione (ps)** impostate per il sistema;
- I differenti **diametri dei restrittori (d)** oggetto dello studio;
- L'intera gamma di **carichi applicati** disponibili per ogni configurazione.

La struttura logica dello Script 4 è finalizzata all'organizzazione dei risultati finali dei coefficienti di efflusso in funzione dei parametri adimensionali di interesse (Re_{th} , Ma_{th} , h/d , b e A_{eqv}), necessari per la caratterizzazione del componente.

Per rendere l'analisi dei risultati immediata e facilmente confrontabile, lo script genera automaticamente una serie di grafici dei valori dei coefficienti di efflusso ottenuti, in cui le diverse prove sperimentali vengono differenziate secondo una precisa convenzione visiva: ogni diametro del restrittore (d) è identificato da un simbolo grafico univoco, mentre la pressione di alimentazione (ps) è distinta tramite una scala cromatica dedicata.

Nello specifico, l'andamento del coefficiente di efflusso viene visualizzato in funzione del rapporto geometrico h/d (Figura 85), del numero di Reynolds teorico Re_{th} (Figura 86) e del numero di Mach teorico Ma_{th} (Figura 87). Viene inoltre analizzata la sensibilità del C_d rispetto all'area equivalente di

passaggio Aeqv (Figura 88) e al rapporto di pressione b (Figura 89). Tali rappresentazioni delineano il campo operativo del componente, offrendo una visione d'insieme delle proprietà fluidodinamiche che saranno oggetto di analisi critica e discussione nel capitolo successivo.

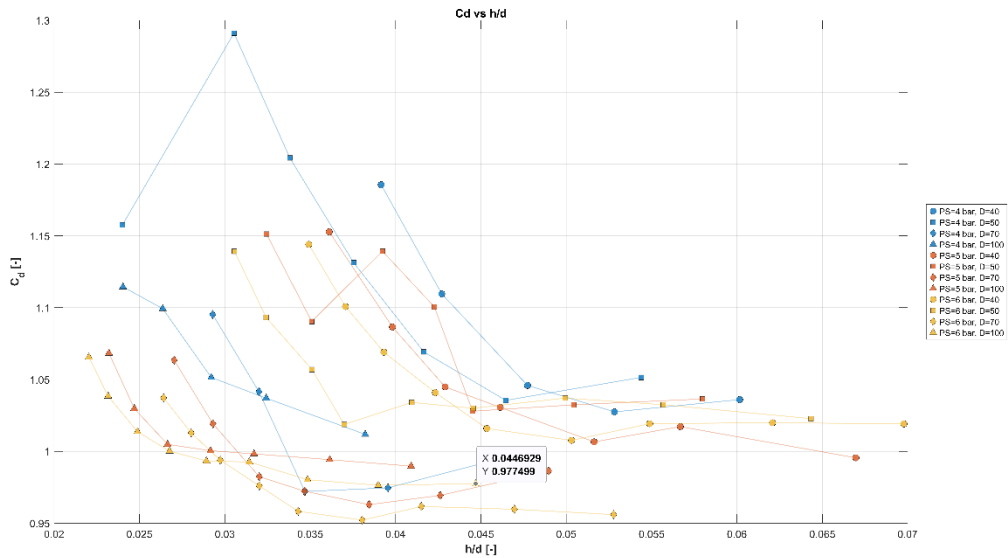


Figura 755. Andamento del coefficiente di efflusso C_d in funzione del rapporto geometrico adimensionale h/d .

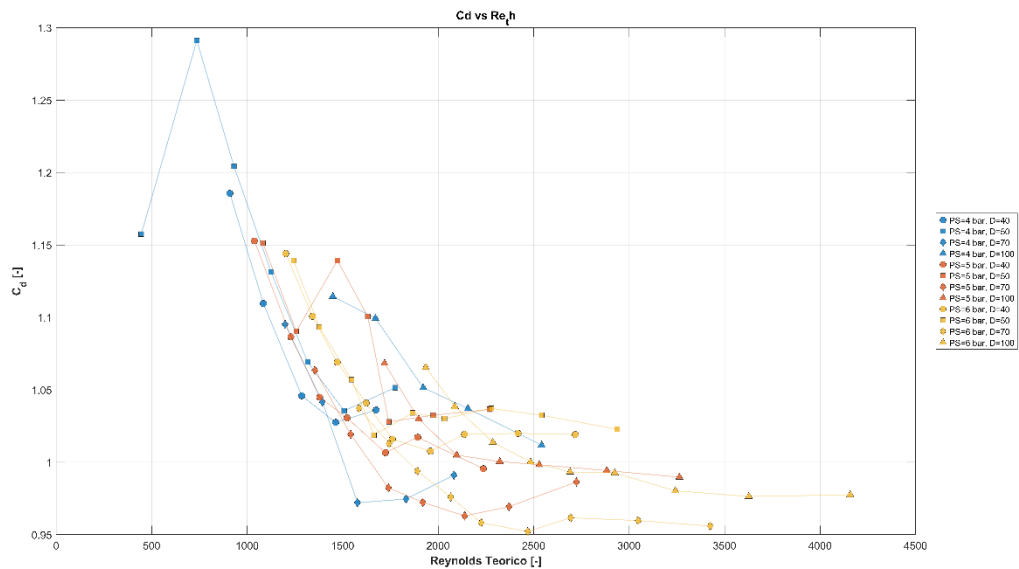


Figura 86. Andamento del coefficiente di efflusso C_d in funzione del numero di Reynolds teorico Re_{th}

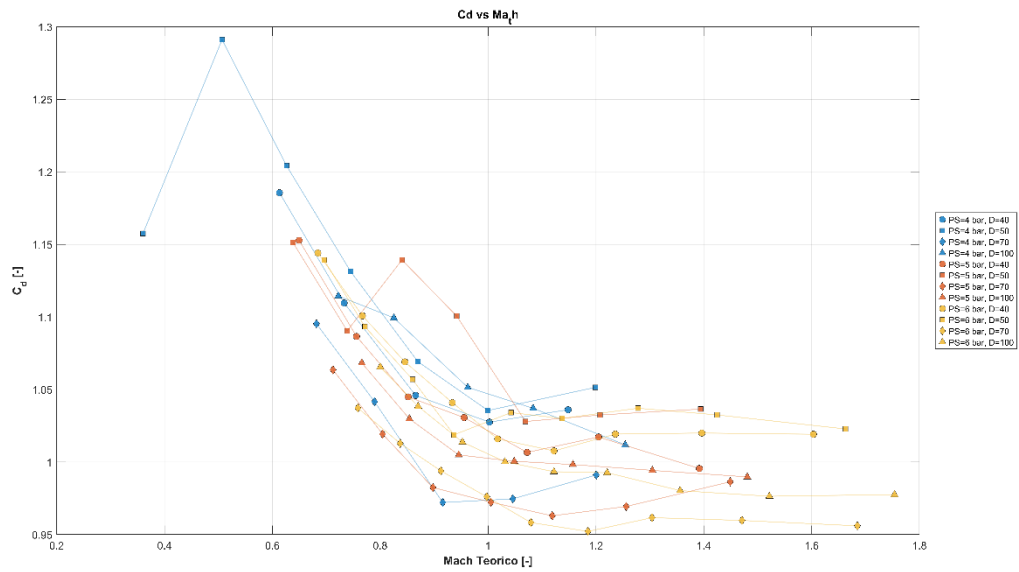


Figura 87. Andamento del coefficiente di efflusso C_d in funzione del numero di Mach teorico Ma_{th}

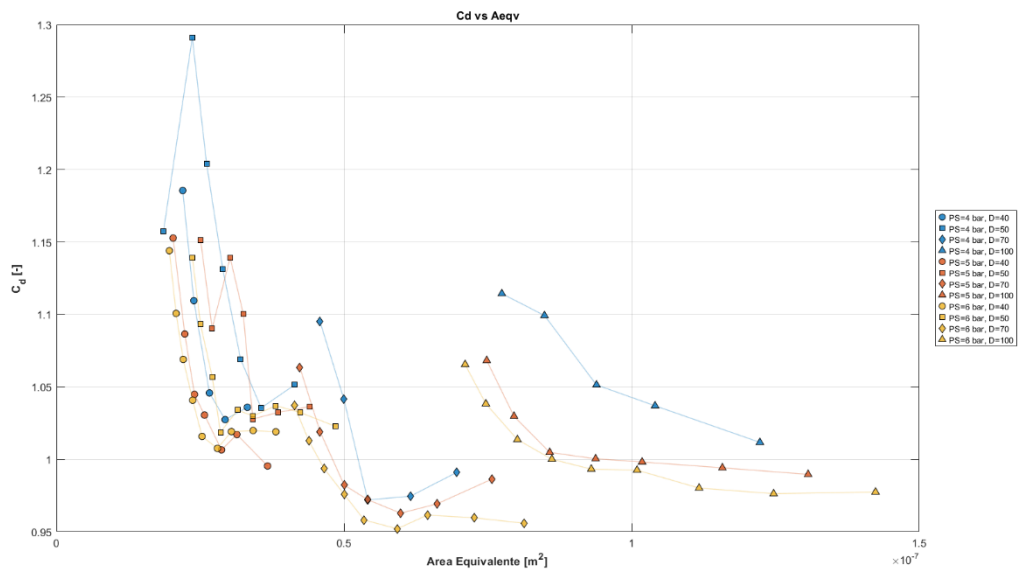


Figura 88. Coefficiente di efflusso C_d in funzione dell'area equivalente di passaggio A_{eqv}

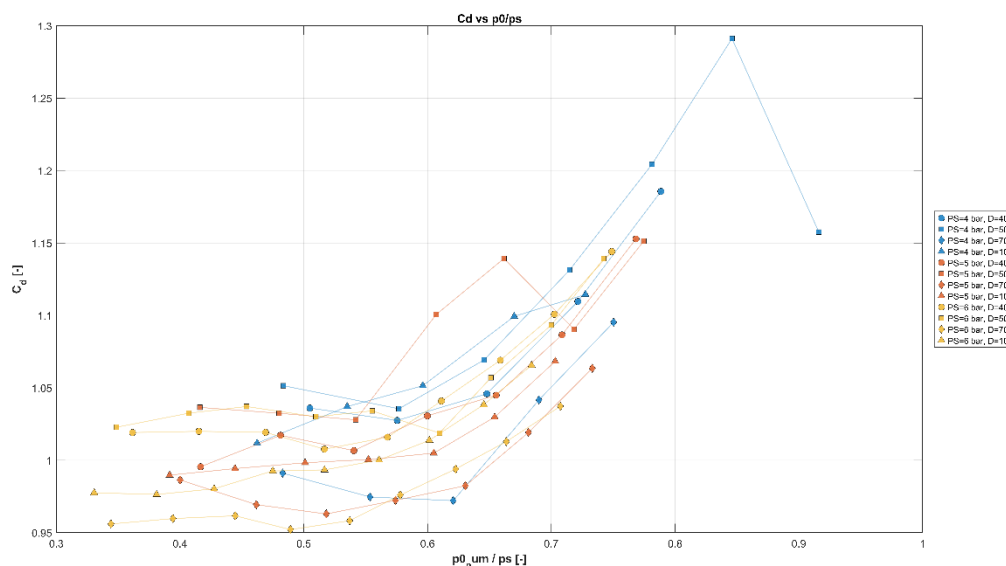


Figura 89. Andamento del coefficiente di efflusso C_d in funzione del rapporto di pressione $b=p_{0,num}/p_s$

5. Conclusioni e analisi dei risultati

L'analisi dei risultati evidenzia innanzitutto l'elevata precisione generale della campagna sperimentale: i valori di coefficienti di efflusso non presentano valori nettamente scostati dalle tendenze generali dei grafici, ma appaiono ben raggruppati in curve coerenti con la letteratura. Questa congruenza conferma la robustezza dell'algoritmo di post-processing dei dati e la stabilità del banco prova utilizzato.

Osservando l'andamento del coefficiente di efflusso in funzione del rapporto geometrico h/d (Figura 84), emerge chiaramente come il sistema risenta di una dipendenza non lineare dall'altezza del meato. Infatti, in corrispondenza di bassi valori di h/d (associati alle condizioni di carico minore registrate in ciascun test) i valori di C_d risultano massimi e presentano una marcata stratificazione su curve distinte. In particolare, muovendosi dall'alto verso il basso zona sinistra del grafico, si osserva come le curve si dispongano secondo un ordine preciso: i coefficienti più elevati appartengono ai diametri minori e alle pressioni di alimentazione più basse, mentre all'aumentare del diametro del restrittore e della pressione di alimentazione le curve si posizionano su livelli di C_d progressivamente inferiori. Al crescere del rapporto h/d , tuttavia, questa marcata sensibilità ai parametri operativi tende a ridursi sensibilmente: le diverse tracce perdono la stratificazione iniziale e convergono tra loro, tendendo asintoticamente verso valori unitari.

I risultati ottenuti in funzione del numero di Reynolds (Figura 86) evidenziano come il coefficiente di efflusso mostri una tendenza decrescente al progredire del regime di moto, tendendo poi a stabilizzarsi asintoticamente verso valori unitari per i numeri di Reynolds più elevati. Tale comportamento indica che l'incremento delle perdite per comportamenti inerziali e l'insorgenza della turbolenza agiscono riducendo l'efficienza del restrittore rispetto alle condizioni operative a bassi regimi. A conferma della validità di questa mappatura, l'andamento rilevato è stato confrontato con i risultati presenti in letteratura [8], riportati per completezza in Figura 90. Il confronto mostra un ottimo accordo per l'intero range investigato, con una corrispondenza particolarmente precisa per i valori di Reynolds superiori a 1000, che rappresentano il limite inferiore delle misure acquisite in questa campagna sperimentale.

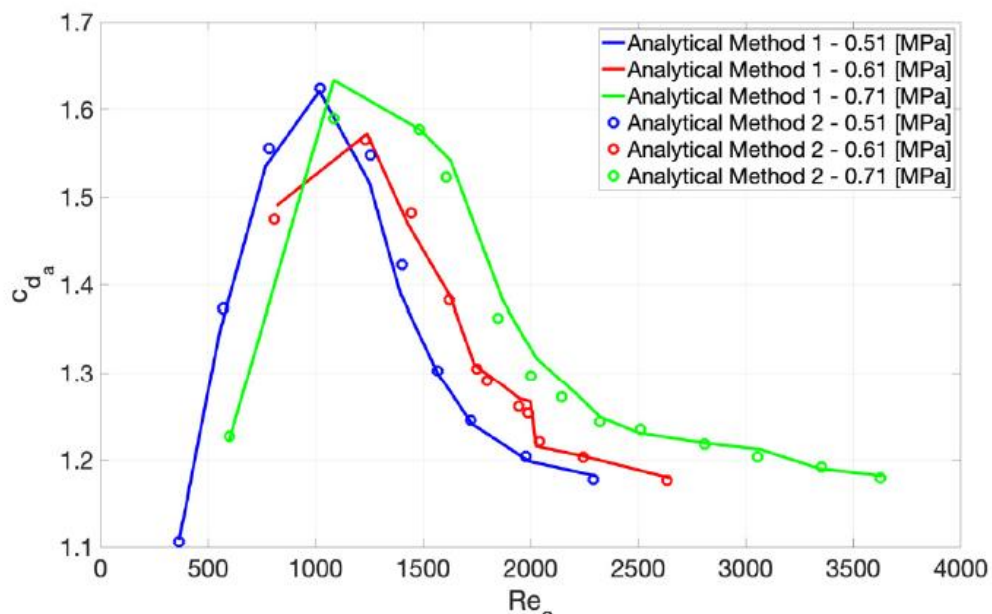


Figura 90. Andamento di c_{da} in funzione del numero di Reynolds per diverse pressioni di alimentazione

Lo studio del coefficiente di efflusso in funzione del numero di Mach (Figura 86) permette di isolare l'influenza della compressibilità sulla dinamica del restrittore. Nel regime subsonico, si osserva come i dati si dispongano inizialmente su curve distinte, tuttavia, al crescere del numero di Mach, le curve tendono ad avvicinarsi progressivamente. Una volta raggiunta la condizione di blocco sonico ($Ma=1$) e nel successivo regime sonico le curve si stabilizzano su un andamento pressoché orizzontale.

Lo studio del coefficiente di efflusso in funzione del rapporto di pressione (Figura 88) fornisce un'ulteriore chiave di lettura sull'andamento delle prestazioni del sistema. Si osserva un andamento monotono crescente (ad esclusione delle curve ottenute con i diametri 0,4 mm e 0,5 mm rispettivamente a pressioni di alimentazione di 4 bar e 5 bar). In particolare, per valori di b sonici (ovvero inferiori al rapporto critico), i valori di C_d si mantengono pressoché stabili, confermando che in regime sonico l'efficienza del restrittore è indipendente dal salto di pressione. Al contrario, per valori di b maggiori (regime subsonico), si nota una crescita progressiva del coefficiente man mano che la pressione di imbocco p_0 tende al valore della pressione di alimentazione p_s .

In conclusione, la mappatura sperimentale e la successiva analisi dei parametri adimensionale hanno dimostrato la validità dell'approccio proposto, evidenziando una coerenza tra le diverse variabili fisiche coinvolte. Tuttavia, emerge una riflessione critica fondamentale per l'ulteriore evoluzione del modello di calcolo. Attualmente, la procedura si basa sull'utilizzo di un valore standard di riferimento per il rapporto critico di pressione b_{cr} , assunto pari a 0,5283 in accordo con la formulazione classica della fluidodinamica comprimibile per l'aria in condizioni ideali.

Sebbene il valore standard di rapporto critico di pressione (b_{cr}) costante adottato permetta di ottenere trend soddisfacenti, la dispersione residua osservata in alcune condizioni operative suggerisce che una calibrazione univoca di questo valore non sia sufficiente a compensare le inevitabili tolleranze geometriche e costruttive di ogni singolo cuscinetto.

Un significativo avanzamento nella precisione del modello consisterebbe nell'eseguire una caratterizzazione sperimentale ad hoc del rapporto critico di pressione per ogni pattino. Tale procedura, effettuata tramite prove di efflusso a getto libero (ovvero in assenza della contropressione del meato),

permetterebbe di determinare l'esatto il valore di b_{cr} attraverso un'operazione di *best fitting* sulla portata massica reale al variare della pressione di alimentazione.

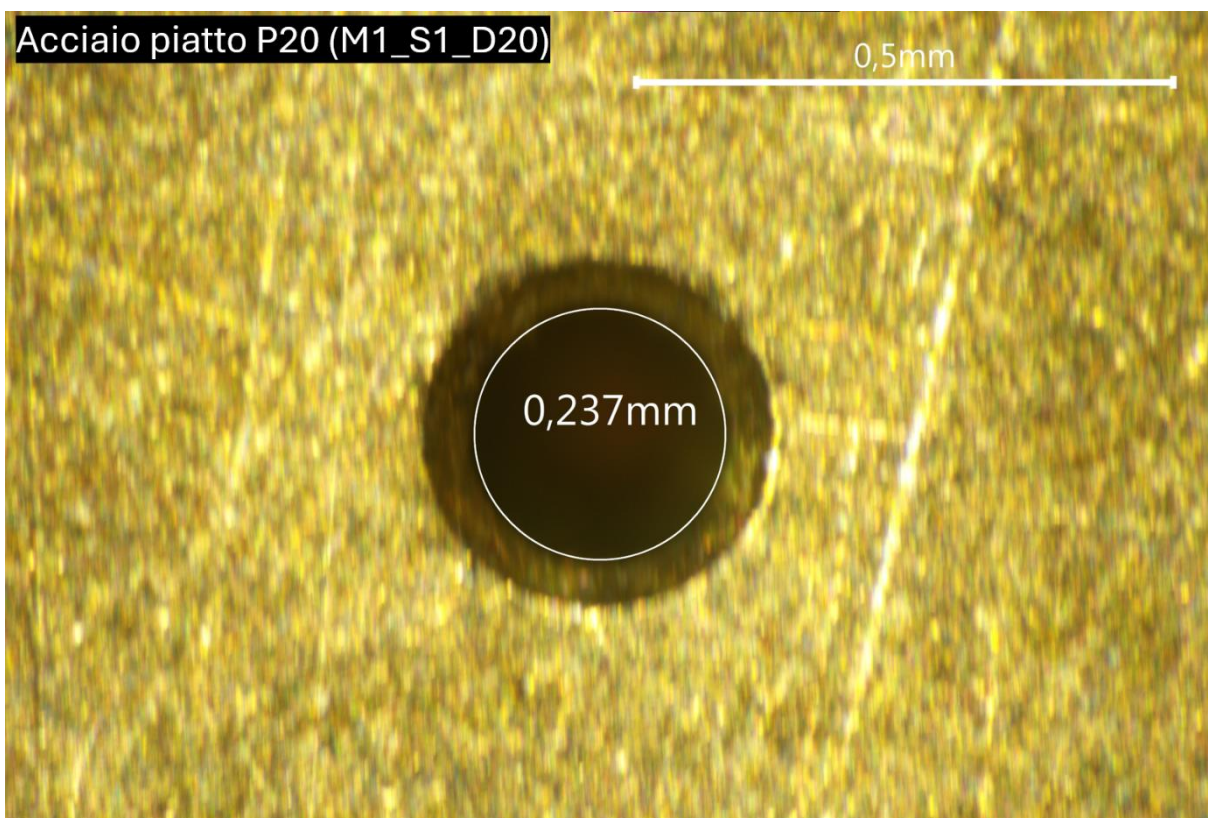
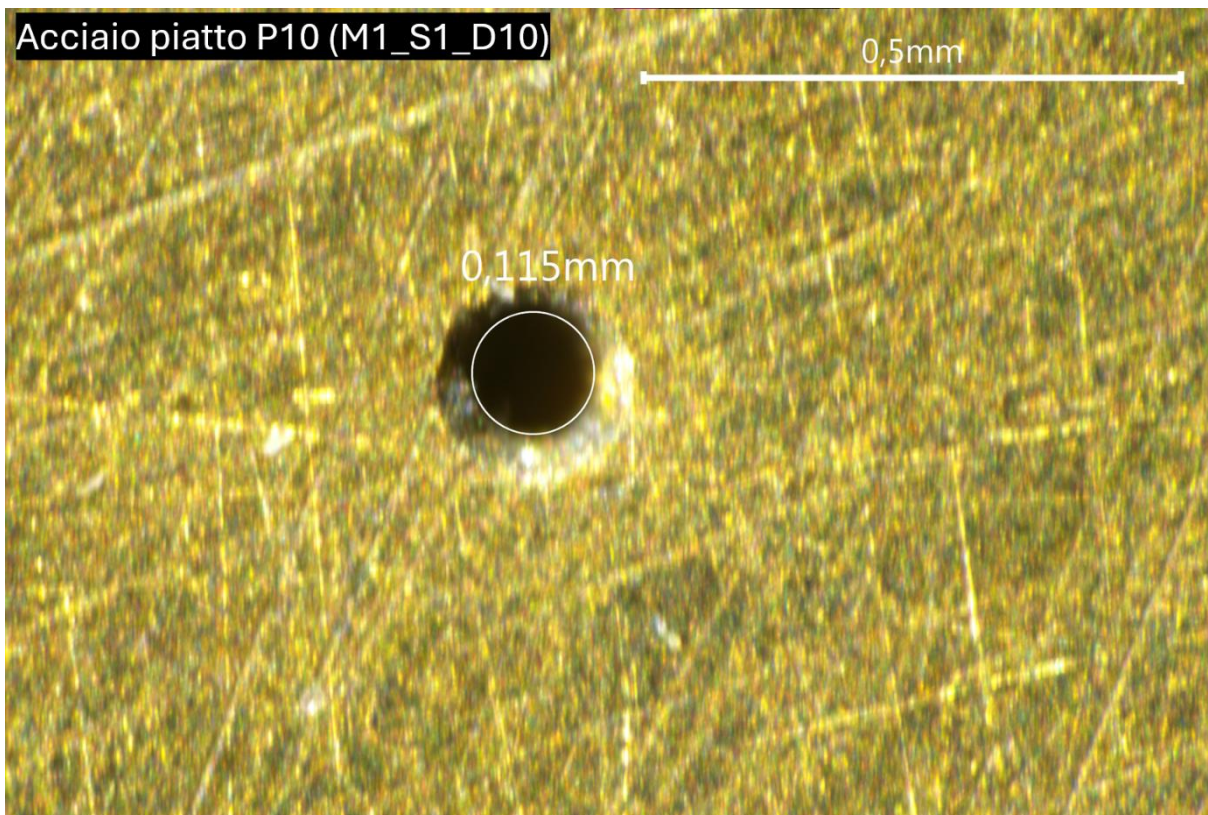
Sostituendo il parametro teorico con questo valore sperimentale, lo script di calcolo verrebbe tarato sulle reali caratteristiche fluidodinamiche reali dei componenti utilizzati, integrando intrinsecamente gli effetti della micro-geometria del foro di alimentazione. Questa raffinazione metodologica consentirebbe di evolvere il modello analitico verso un vero e proprio *Digital Twin* del sistema fisico: in tale scenario, la stima delle variabili non misurabili direttamente (in primis l'altezza effettiva del meato h e la pressione di imbocco p_0) raggiungerebbe un livello di accuratezza metrologica superiore, rendendo il modello uno strumento predittivo estremamente affidabile per la diagnostica e l'ottimizzazione dei cuscinetti.

In ottica di ulteriori sviluppi futuri dell'attività di ricerca svolta, si prospetta in primo luogo l'automatizzazione dell'intera procedura di misura sperimentale dei profili di pressione. L'integrazione di un sistema di controllo automatico per il salvataggio delle curve di pressione e per il posizionamento radiale del contropattino permetterebbe di ridurre drasticamente i tempi di acquisizione e di eliminare l'incertezza legata all'operatore umano, garantendo al contempo la possibilità di una densità di punti di misura superiore per una ricostruzione ancora più fedele dei gradienti di pressione. Parallelamente, appare fondamentale estendere la campagna di test a una gamma più ampia di cuscinetti, variando sistematicamente le geometrie dei restrittori per esplorare intervalli più estesi dei parametri adimensionali caratteristici. L'obiettivo finale è infatti quello di mappare nei risultati e nei relativi grafici l'influenza del rapporto h/d , del numero di Reynolds (Re) e del numero di Mach (Ma), affinando le correlazioni semi-empiriche esistenti e consolidando la capacità predittiva del modello anche in condizioni operative non ancora investigate.

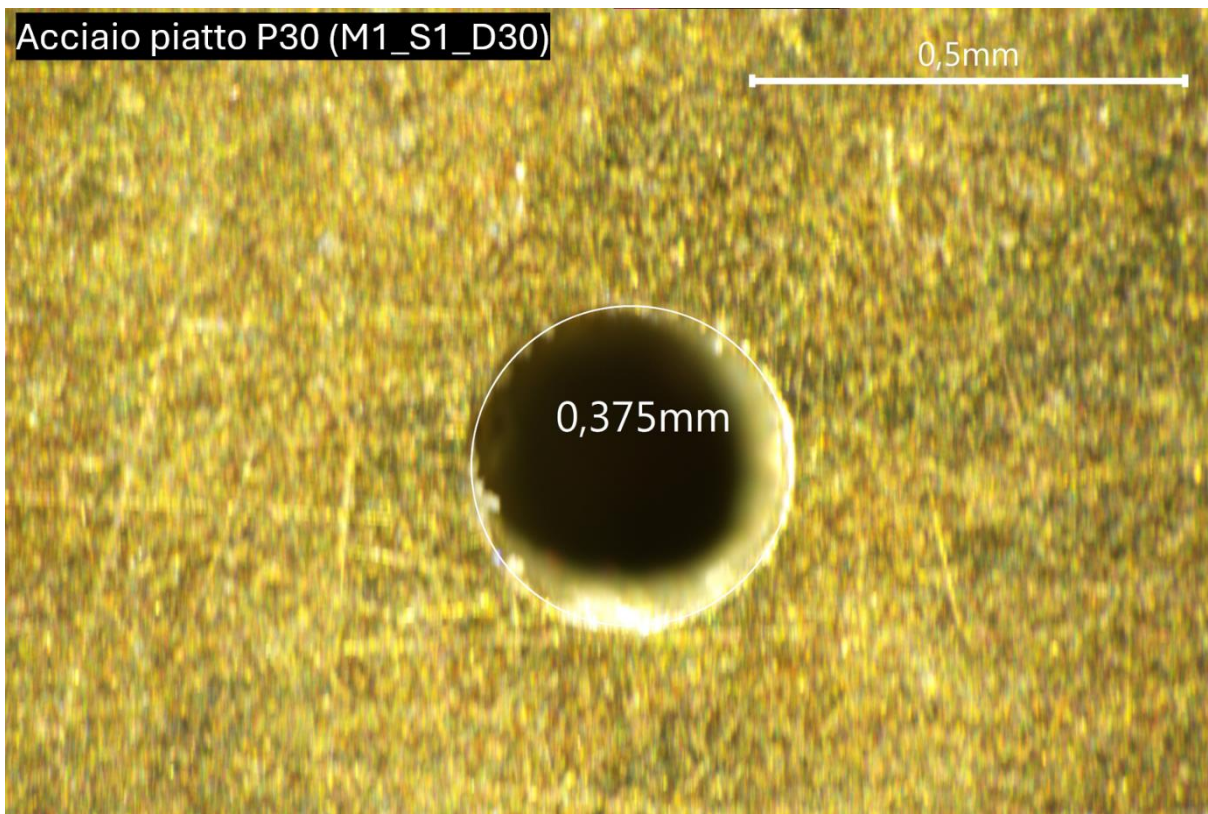
Bibliografia

- [1] F. Al-Bender e H. Van Brussel, «A Method of “Separation of Variables” for the Solution of Laminar Boundary-Layer Equations of Narrow-Channel Flows», *Journal of Tribology*, vol. 114, fasc. 3, pp. 623–629, lug. 1992, doi: 10.1115/1.2920927.
- [2] G. Belforte, T. Raparelli, V. Viktorov, e A. Trivella, «Discharge coefficients of orifice-type restrictor for aerostatic bearings», *Tribology International*, vol. 40, fasc. 3, pp. 512–521, mar. 2007, doi: 10.1016/j.triboint.2006.05.003.
- [3] T. Waumans, F. Al-Bender, e D. Reynaerts, «A Semi-Analytical Method for the Solution of Entrance Flow Effects in Inherently Restricted Aerostatic Bearings», in *Volume 5: Structures and Dynamics, Parts A and B*, Berlin, Germany: ASMEDC, gen. 2008, pp. 1047–1057. doi: 10.1115/GT2008-50499.
- [4] M. T. Neves, V. A. Schwarz, e G. J. Menon, «Discharge coefficient influence on the performance of aerostatic journal bearings», *Tribology International*, vol. 43, fasc. 4, pp. 746–751, apr. 2010, doi: 10.1016/j.triboint.2009.11.001.
- [5] G. Belforte, T. Raparelli, A. Trivella, e V. Viktorov, «Identification of Discharge Coefficients of Orifice-Type Restrictors for Aerostatic Bearings and Application Examples», in *New Tribological Ways*, T. Ghrib, A. c. di, InTech, 2011. doi: 10.5772/15830.
- [6] S. H. Chang, C. W. Chan, e Y. R. Jeng, «Discharge Coefficients in Aerostatic Bearings With Inherent Orifice-Type Restrictors», *Journal of Tribology*, vol. 137, fasc. 1, p. 011705, gen. 2015, doi: 10.1115/1.4028737.
- [7] J. Zhang, D. Zou, N. Ta, e Z. Rao, «Numerical research of pressure depression in aerostatic thrust bearing with inherent orifice», *Tribology International*, vol. 123, pp. 385–396, lug. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.03.009.
- [8] F. Colombo, L. Lentini, T. Raparelli, A. Trivella, e V. Viktorov, «An Identification Method for Orifice-Type Restrictors Based on the Closed-Form Solution of Reynolds Equation», *Lubricants*, vol. 9, fasc. 5, p. 55, mag. 2021, doi: 10.3390/lubricants9050055.
- [9] R. Fatahi-Alkouhi, E. Afaridegan, e N. Amanian, «Discharge coefficient estimation of modified semi-cylindrical weirs using machine learning approaches», *Stoch Environ Res Risk Assess*, vol. 38, fasc. 8, pp. 3177–3198, ago. 2024, doi: 10.1007/s00477-024-02739-7.
- [10] X. Chen, H. Chen, X. Luo, Y. Ye, Y. Hu, e J. Xu, «Air Vortices and Nano-Vibration of Aerostatic Bearings», *Tribol Lett*, vol. 42, fasc. 2, pp. 179–183, mag. 2011, doi: 10.1007/s11249-011-9761-2.
- [11] C. Cheng *et al.*, «Study on micro-vibration mechanism and flow characteristics of aerostatic bearings based on proper orthogonal decomposition», *Physics of Fluids*, vol. 36, fasc. 8, p. 087104, ago. 2024, doi: 10.1063/5.0219112.

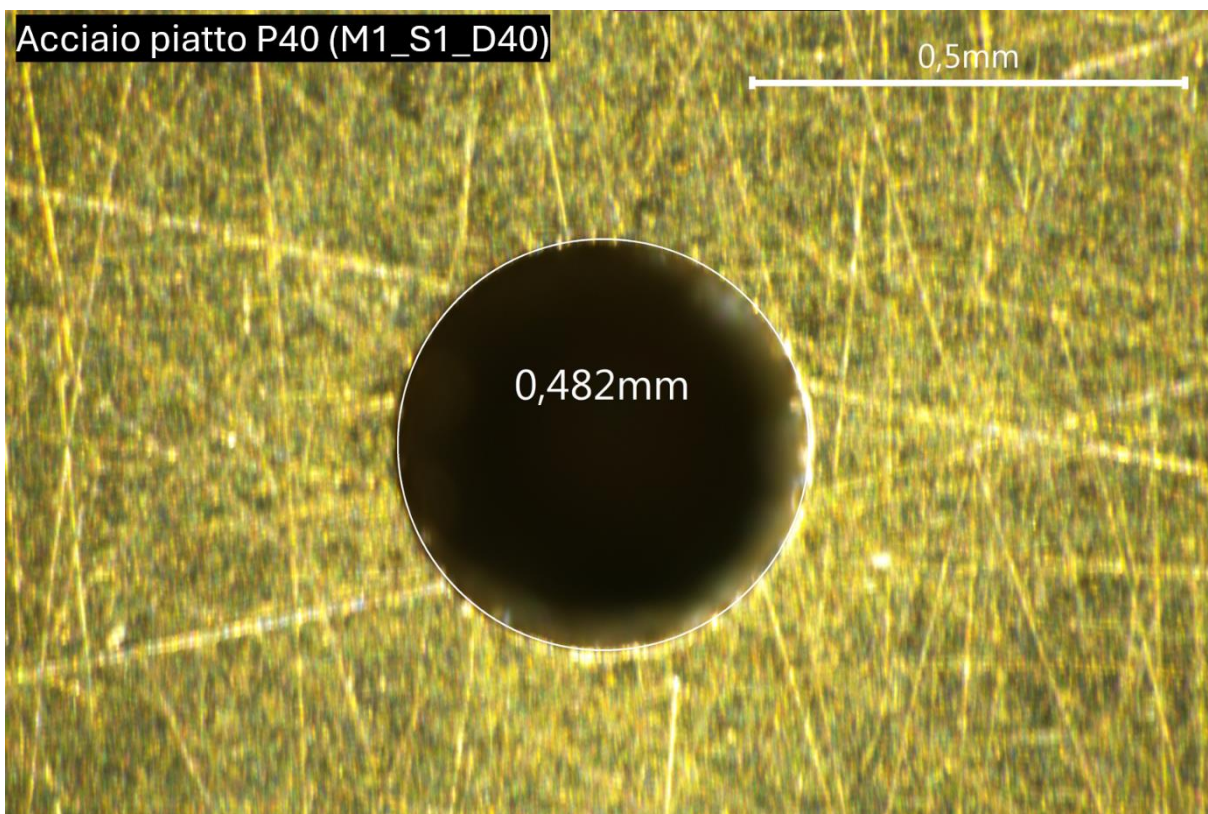
APPENDICE [A] – Fotografie microscopio



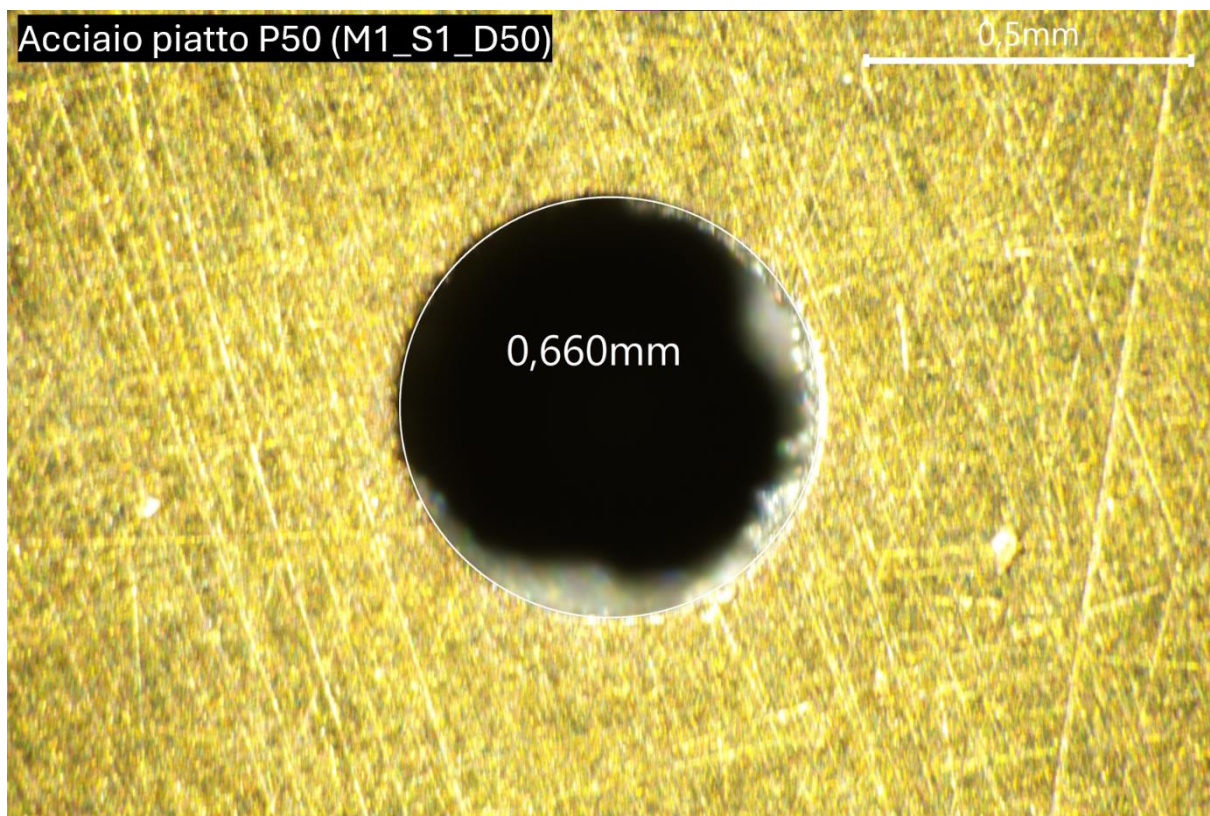
Acciaio piatto P30 (M1_S1_D30)



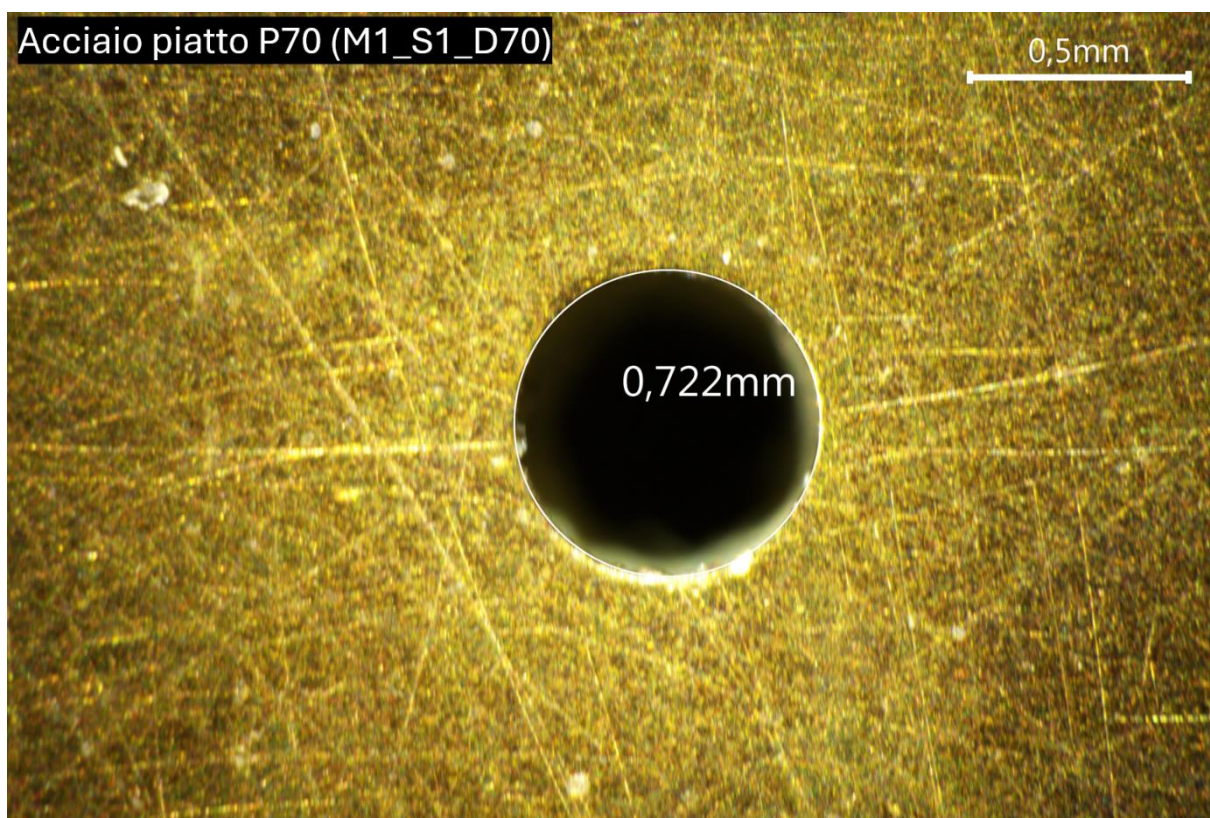
Acciaio piatto P40 (M1_S1_D40)



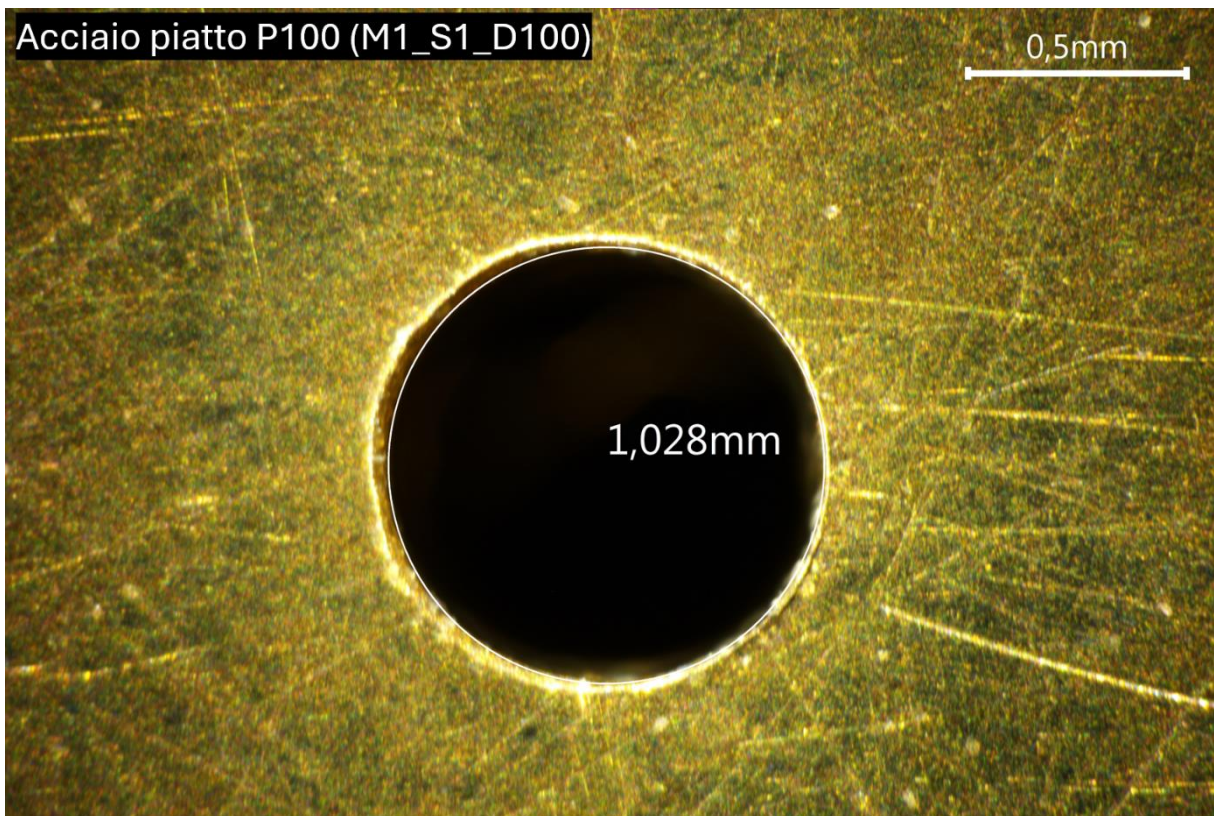
Acciaio piatto P50 (M1_S1_D50)



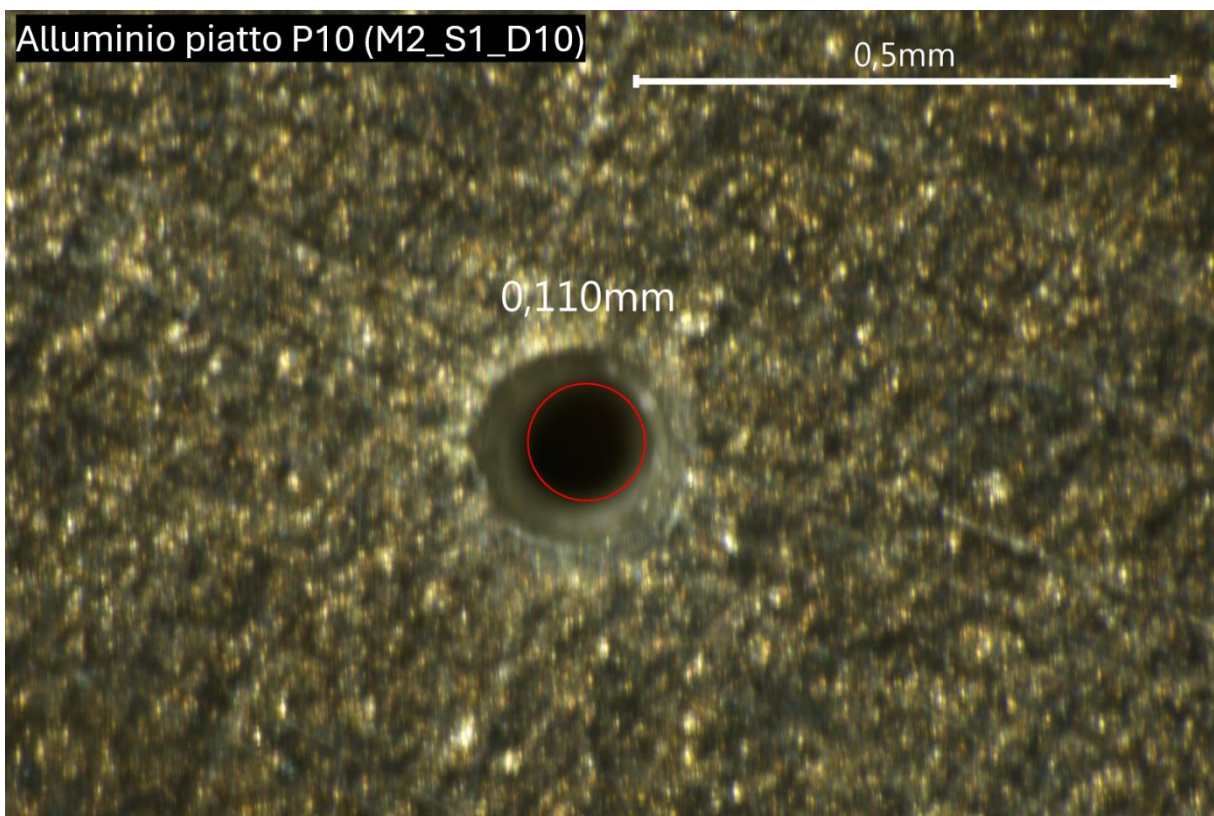
Acciaio piatto P70 (M1_S1_D70)



Acciaio piatto P100 (M1_S1_D100)



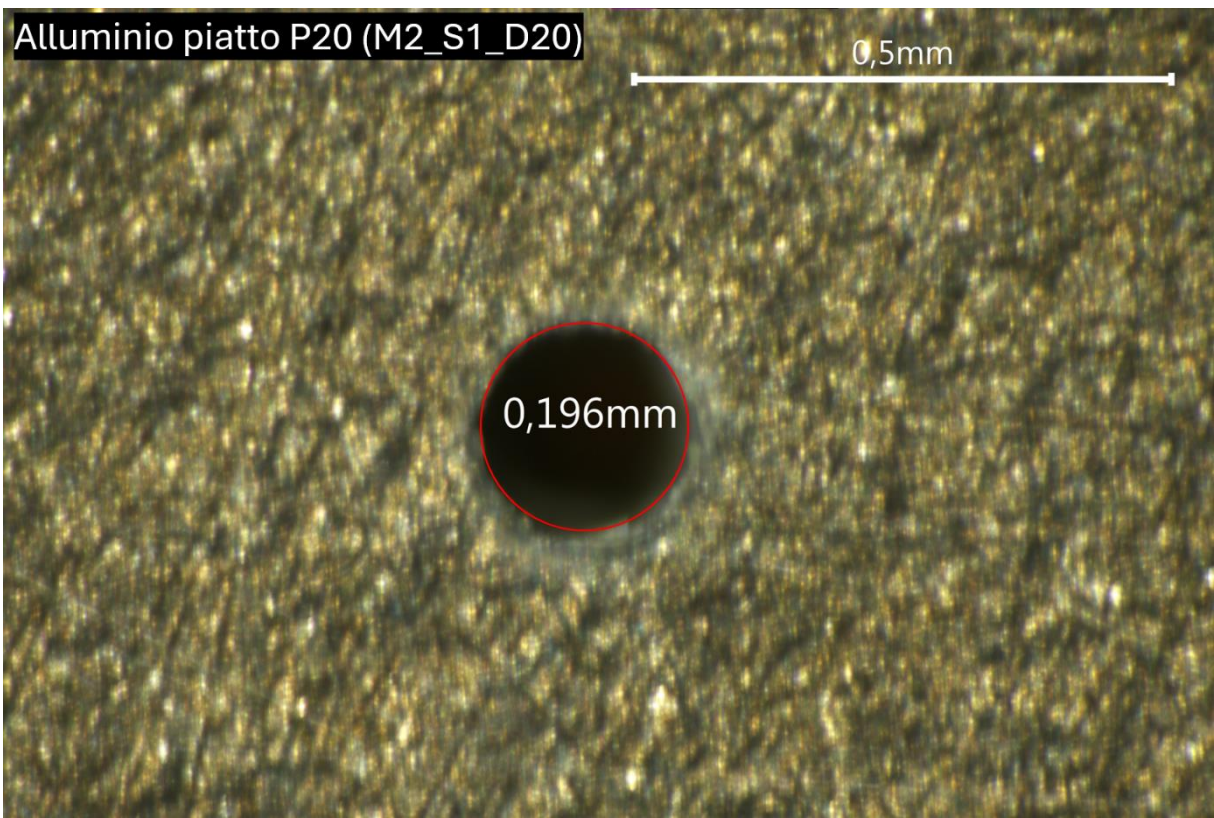
Alluminio piatto P10 (M2_S1_D10)



Alluminio piatto P20 (M2_S1_D20)

0,5mm

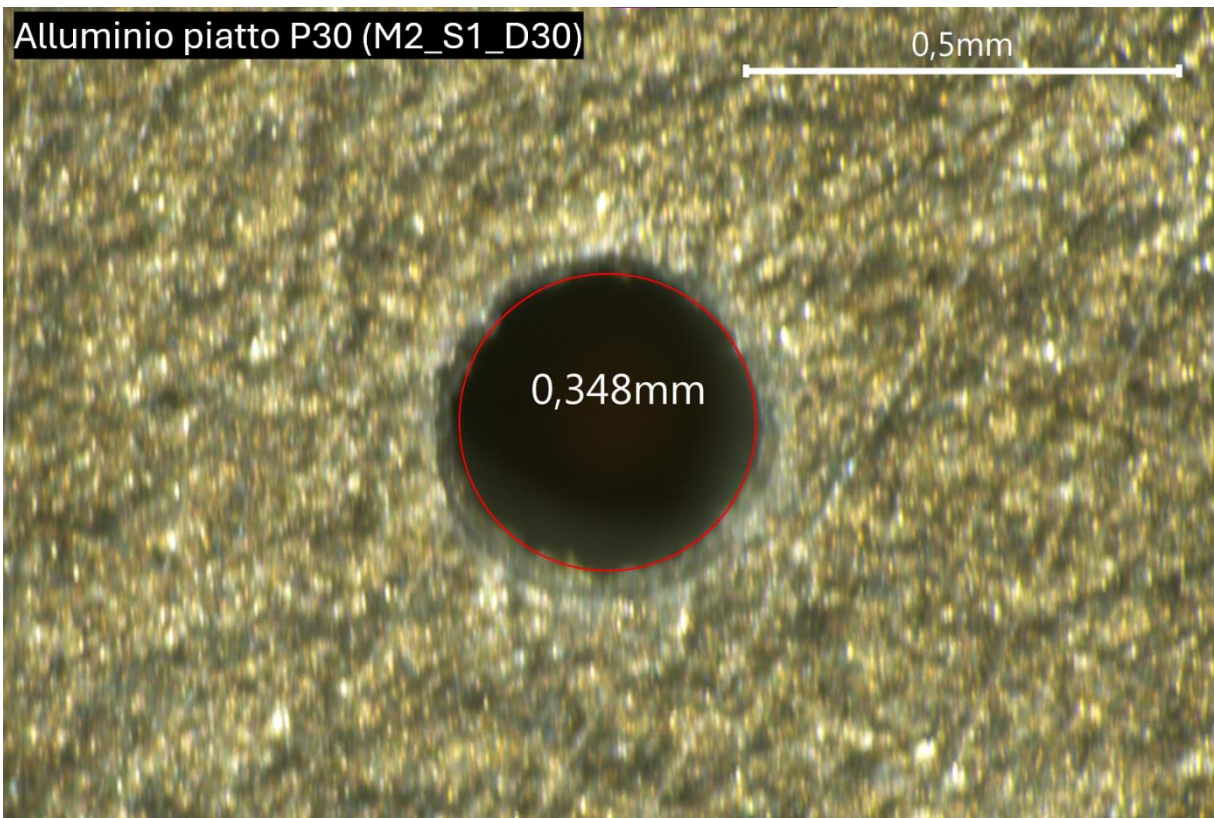
0,196mm



Alluminio piatto P30 (M2_S1_D30)

0,5mm

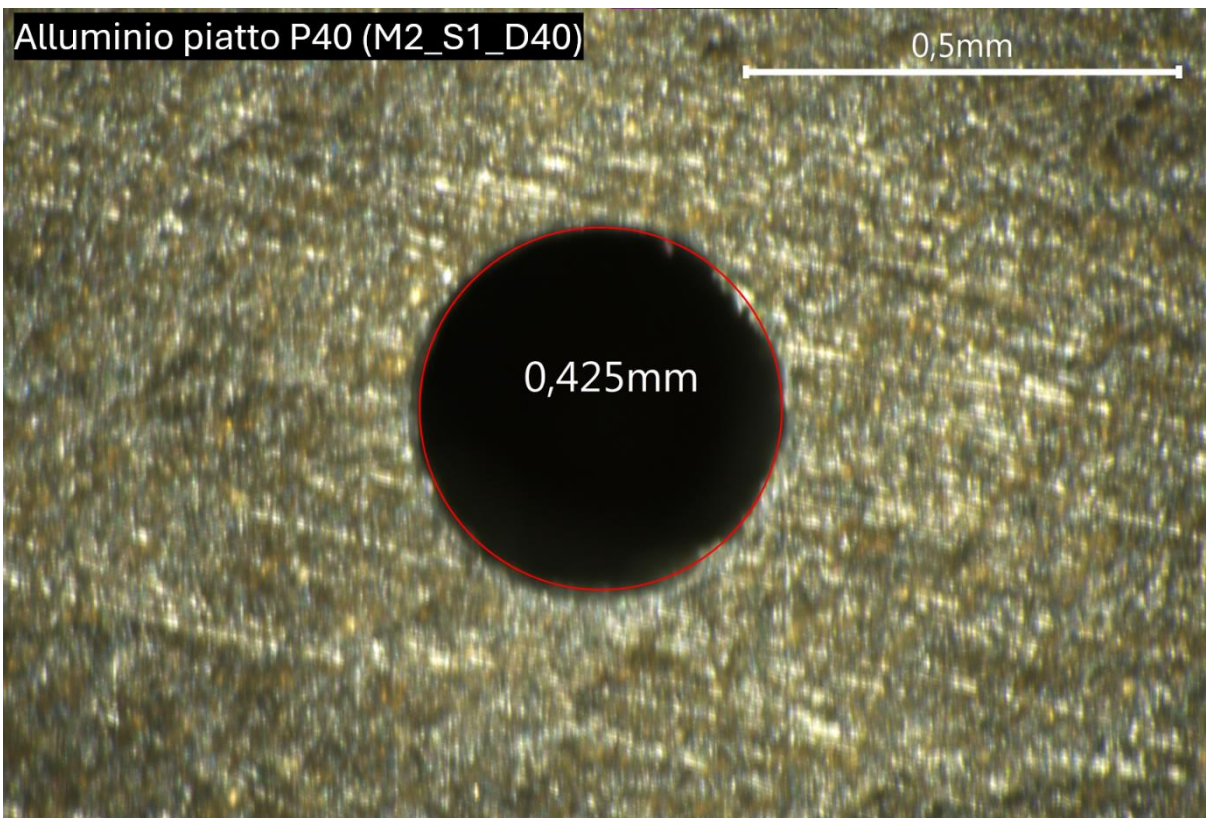
0,348mm



Alluminio piatto P40 (M2_S1_D40)

0,5mm

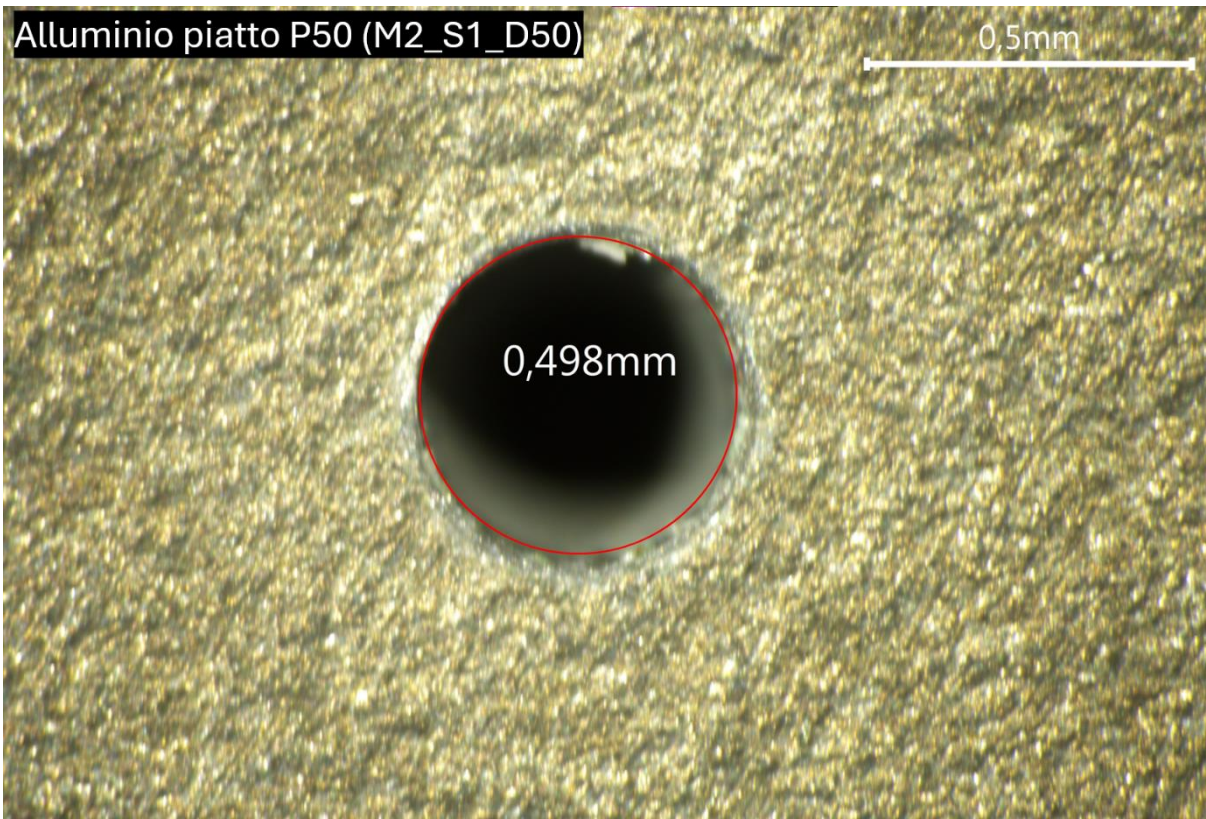
0,425mm

A micrograph showing the surface of an aluminum plate P40. The surface has a fine, granular texture. A circular feature is highlighted with a red outline, and its diameter is labeled as 0,425mm. A scale bar in the top right corner indicates 0,5mm.

Alluminio piatto P50 (M2_S1_D50)

0,5mm

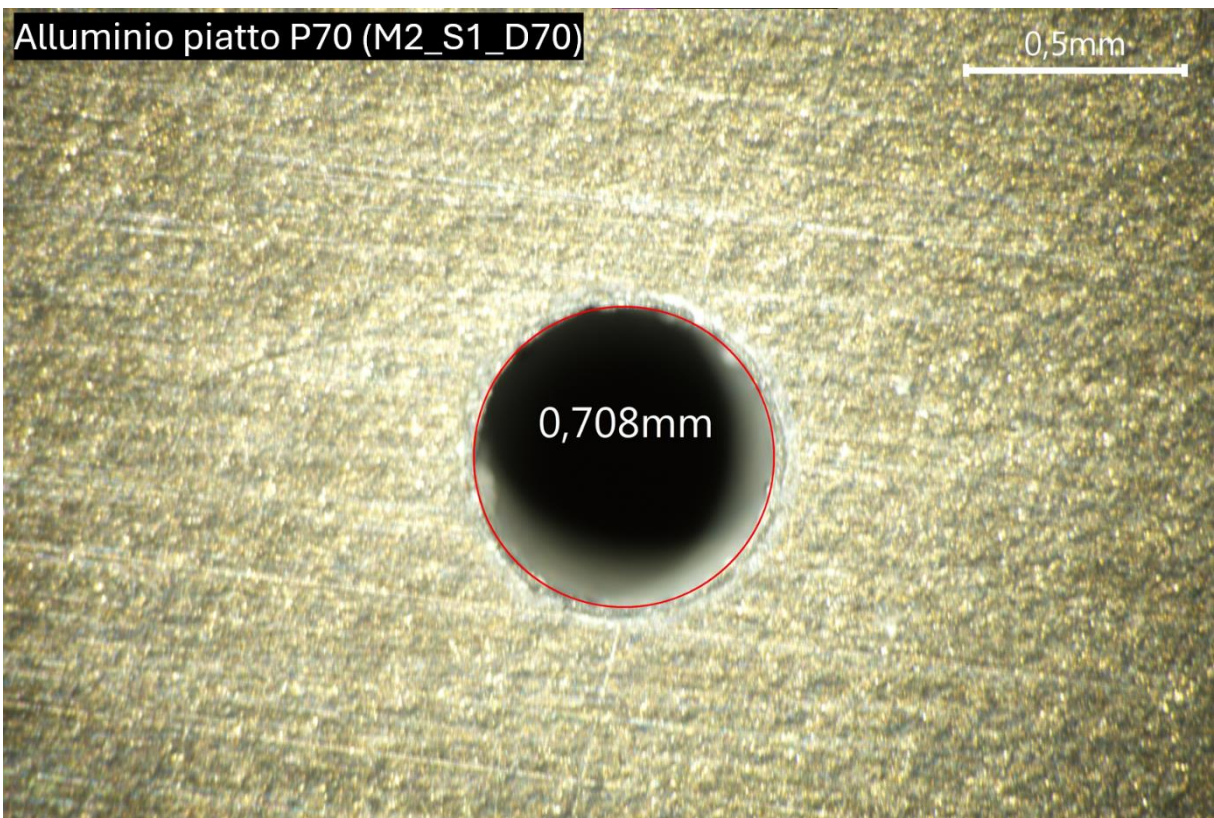
0,498mm

A micrograph showing the surface of an aluminum plate P50. The surface has a fine, granular texture. A circular feature is highlighted with a red outline, and its diameter is labeled as 0,498mm. A scale bar in the top right corner indicates 0,5mm.

Alluminio piatto P70 (M2_S1_D70)

0,5mm

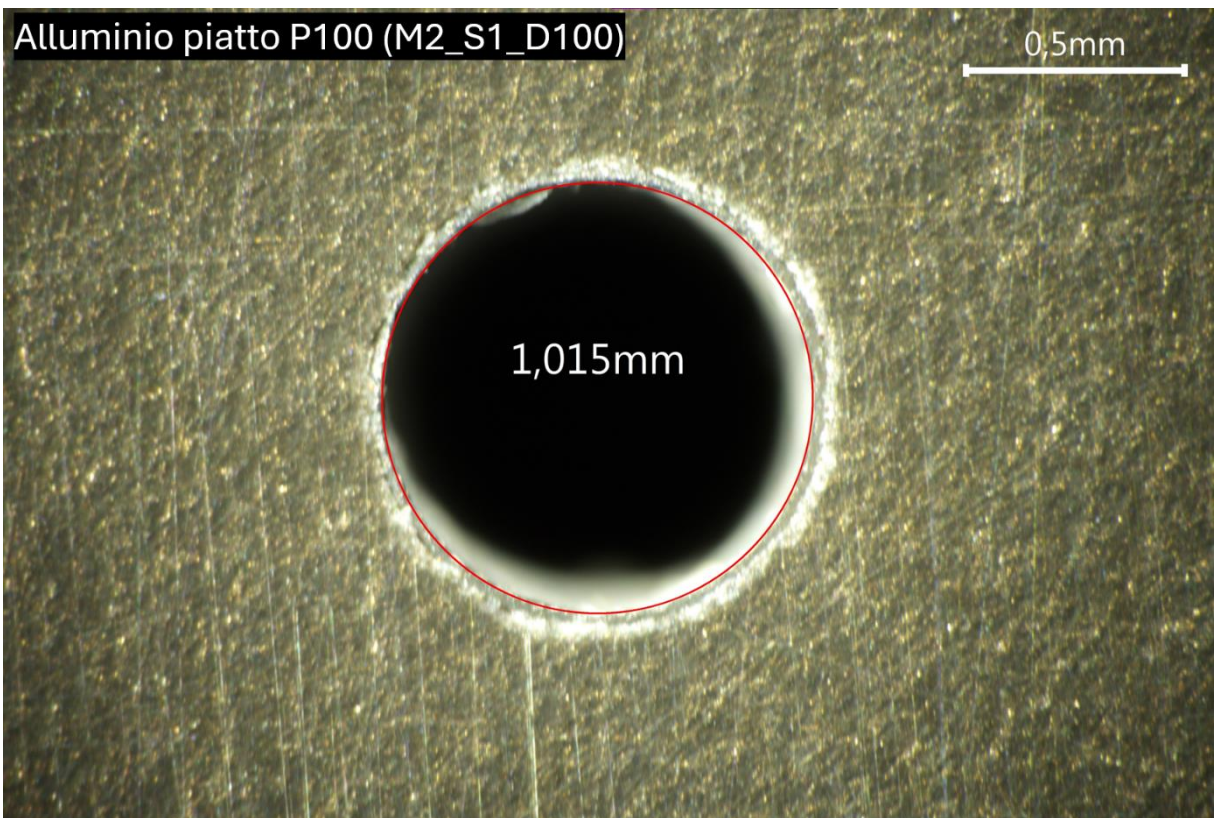
0,708mm

A micrograph showing a circular hole in a textured aluminum surface. The hole is dark and surrounded by a lighter, slightly raised rim. A red circle is drawn around the hole, and the text "0,708mm" is centered within it. The background surface has a fine, granular texture with some linear scratches.

Alluminio piatto P100 (M2_S1_D100)

0,5mm

1,015mm

A micrograph showing a circular hole in a textured aluminum surface, similar to the one above but larger. The hole is dark with a bright, irregular rim. A red circle is drawn around the hole, and the text "1,015mm" is centered within it. The background surface has a fine, granular texture with some linear scratches.

Alluminio concavo C10 (M2_S2_D10)

0,5mm

0,114mm



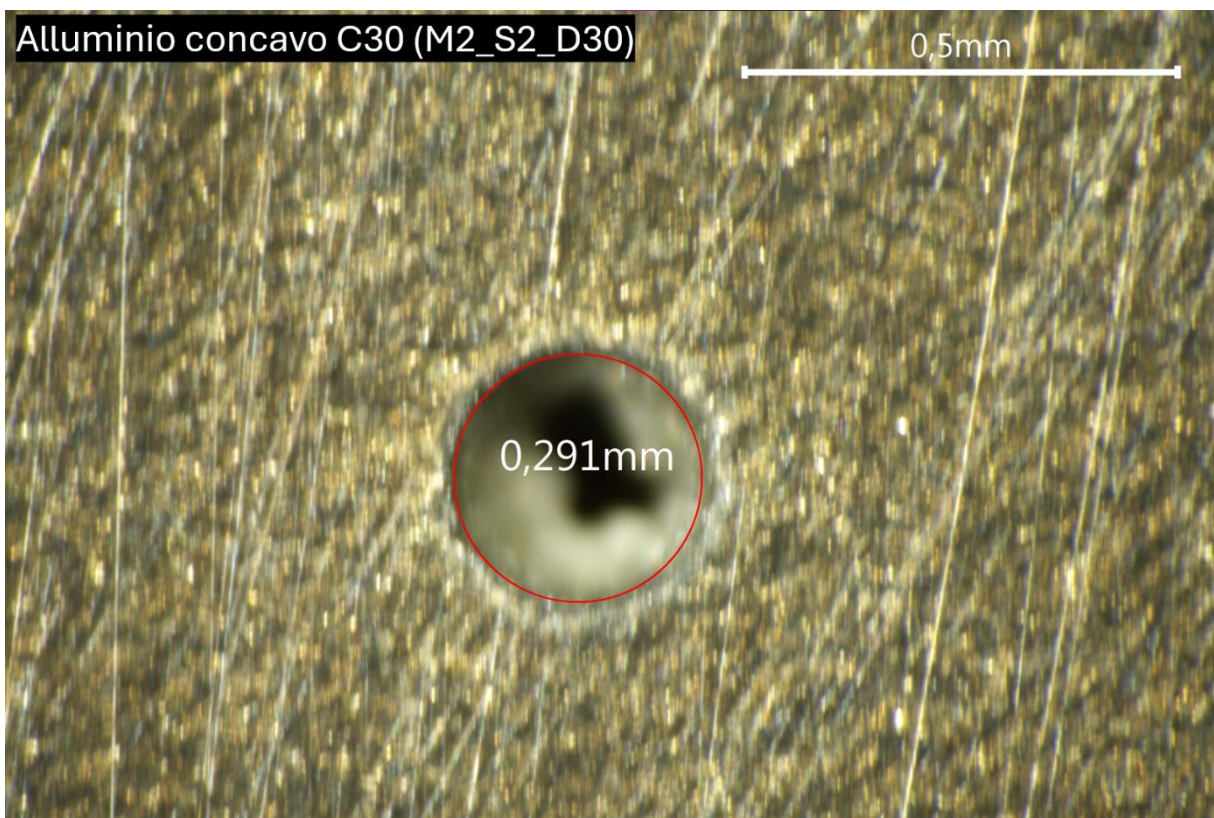
Alluminio concavo C20 (M2_S2_D20)

0,5mm

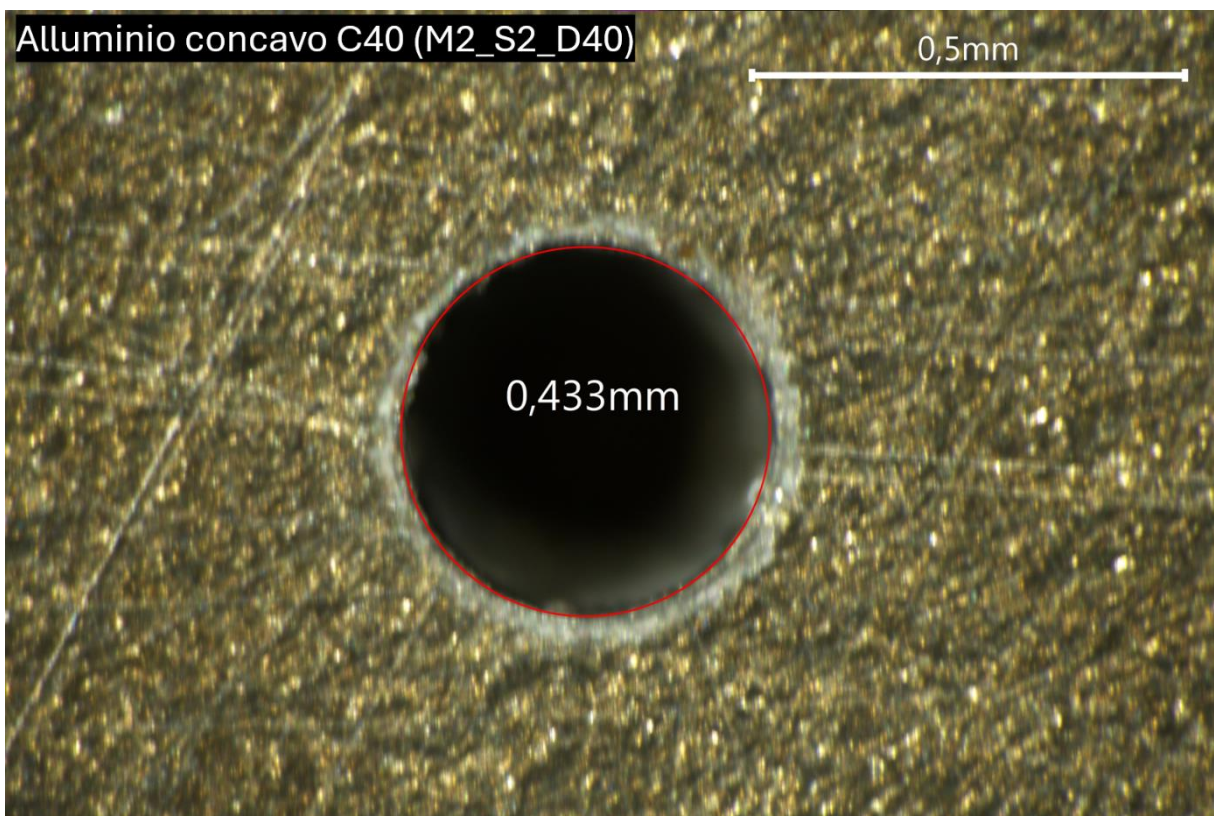
0,211mm



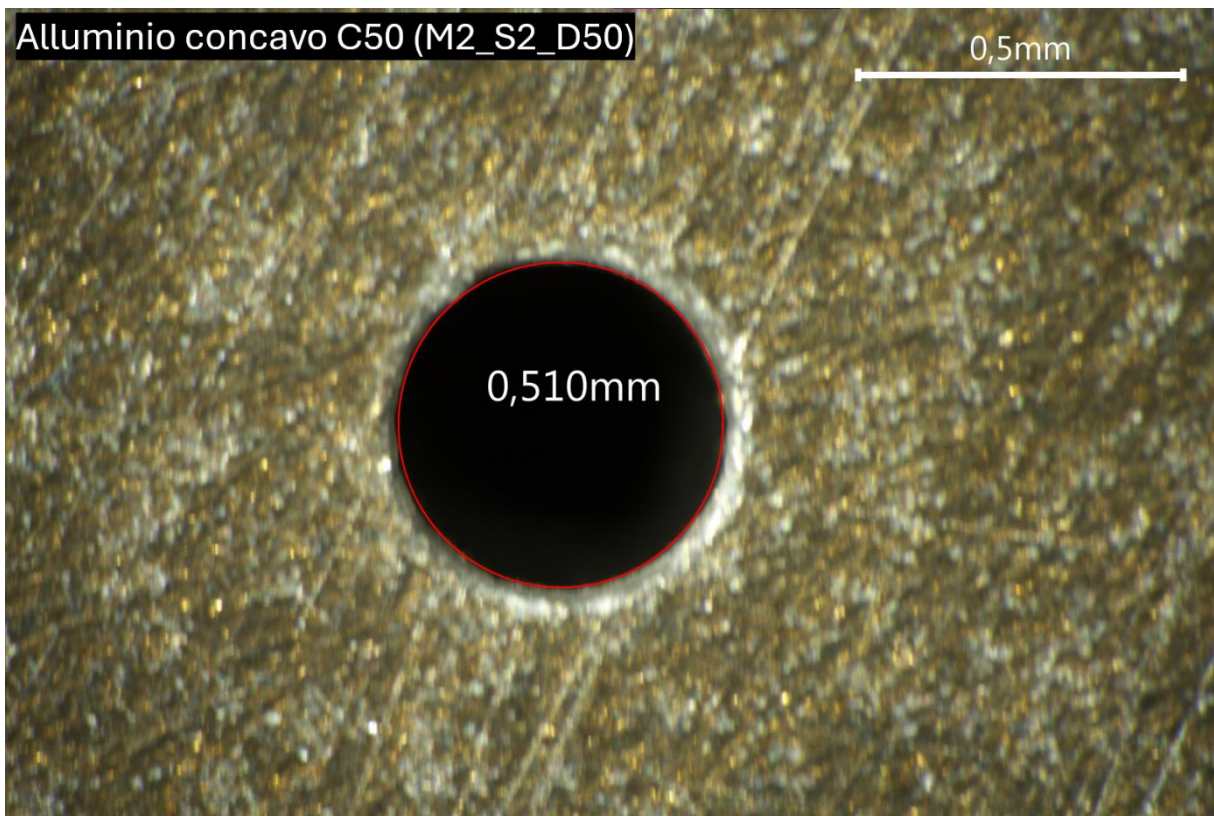
Alluminio concavo C30 (M2_S2_D30)



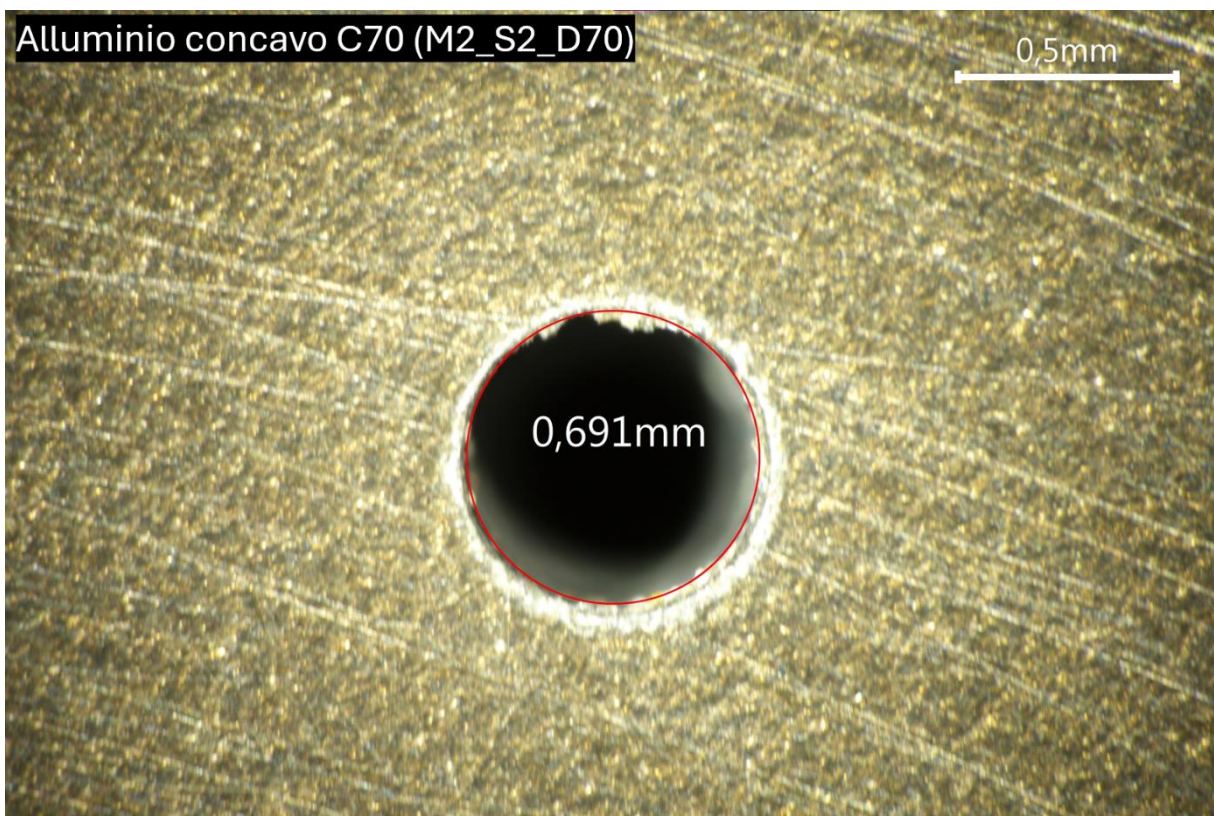
Alluminio concavo C40 (M2_S2_D40)



Alluminio concavo C50 (M2_S2_D50)



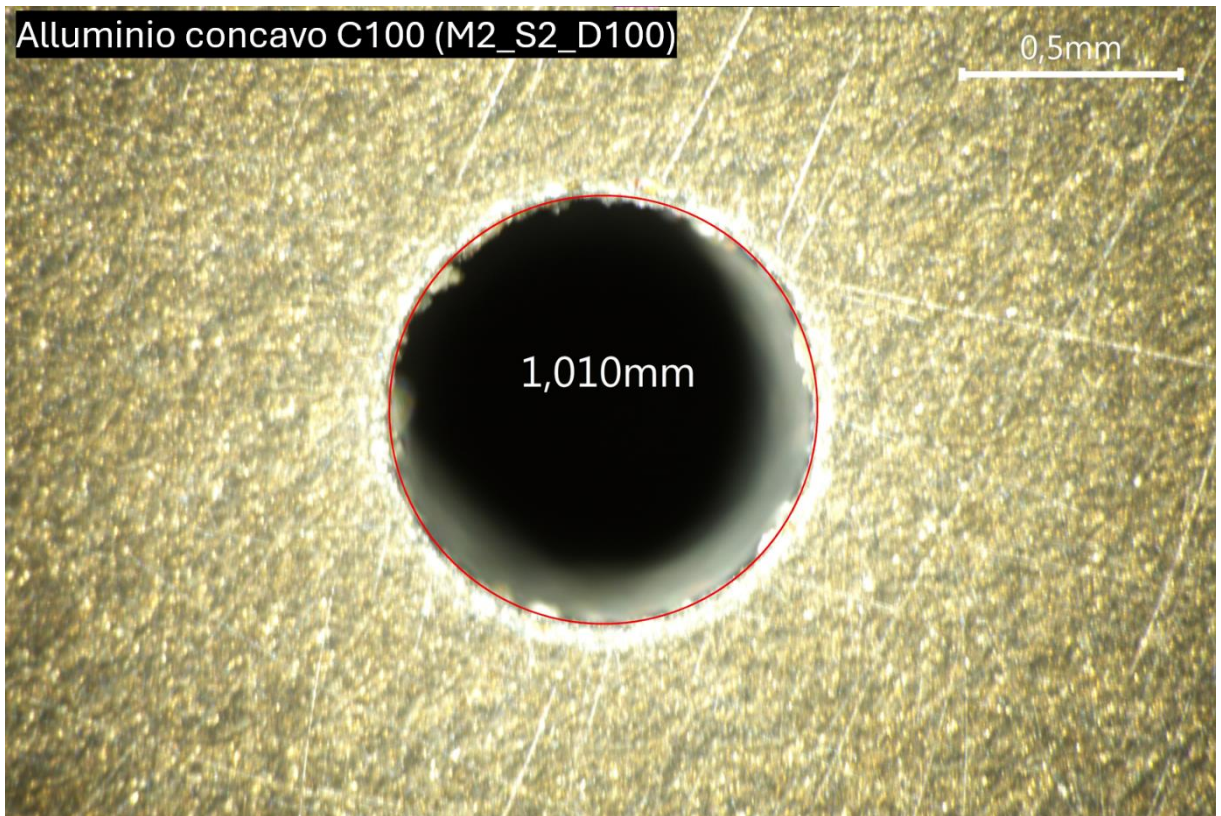
Alluminio concavo C70 (M2_S2_D70)



Alluminio concavo C100 (M2_S2_D100)

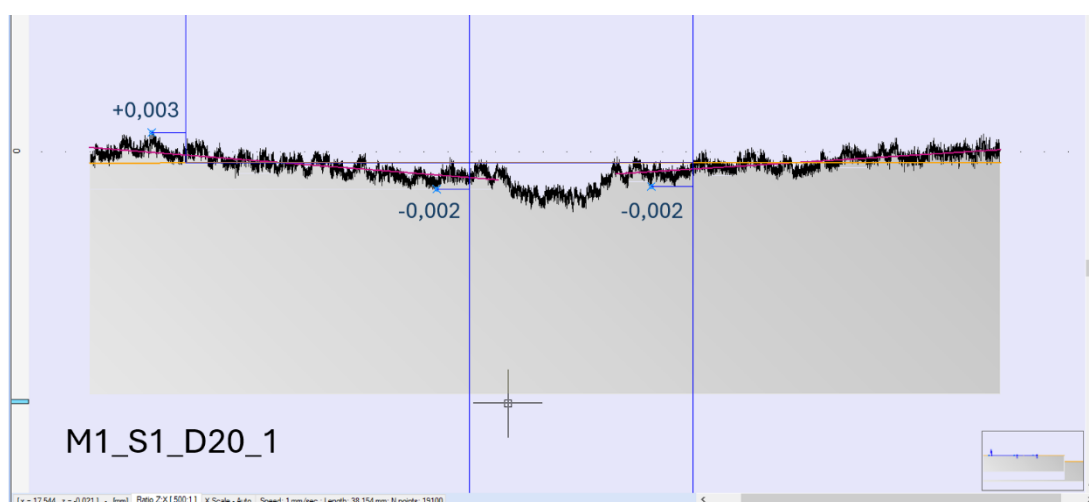
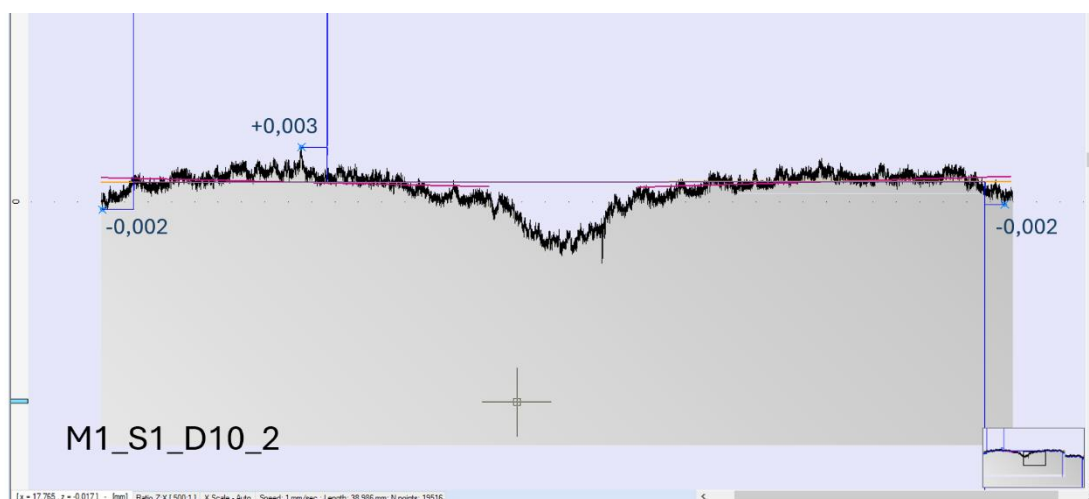
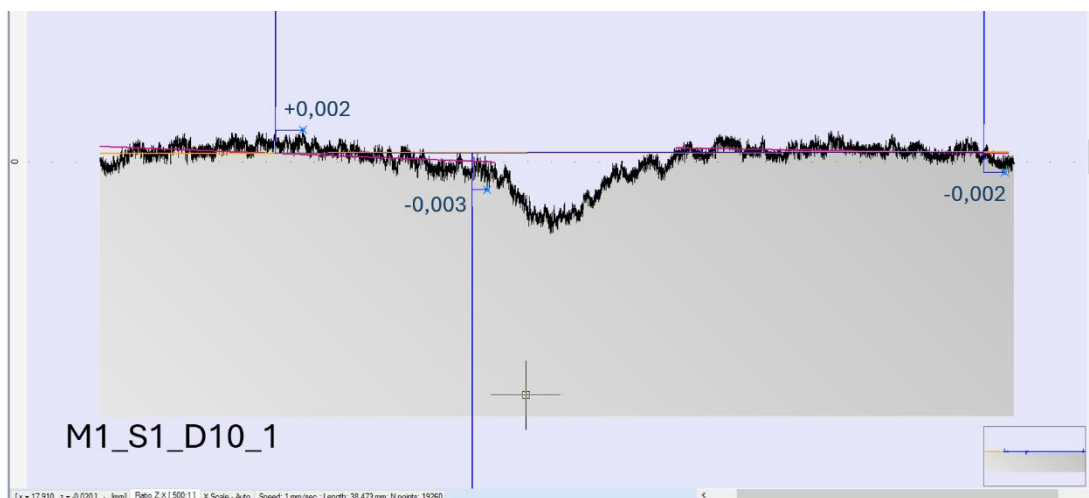
0,5mm

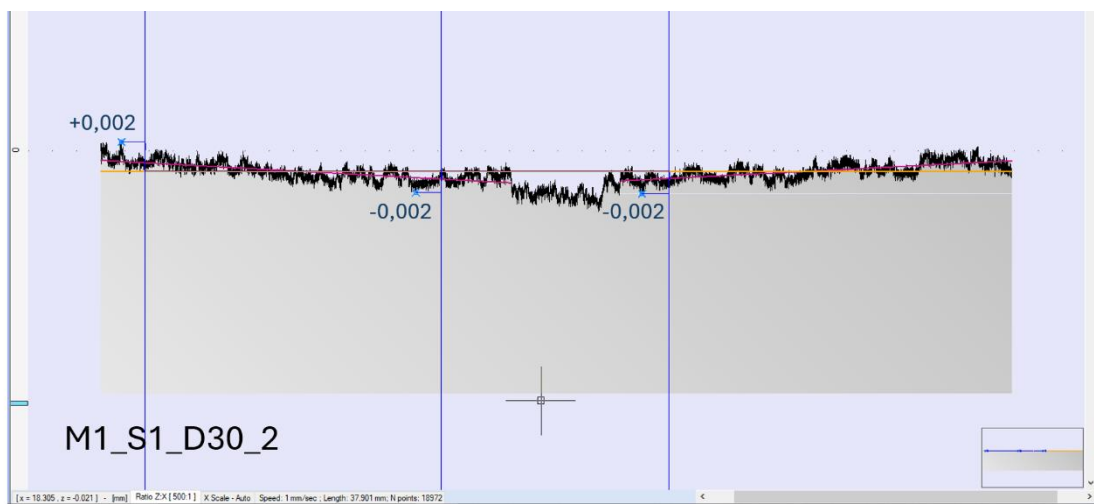
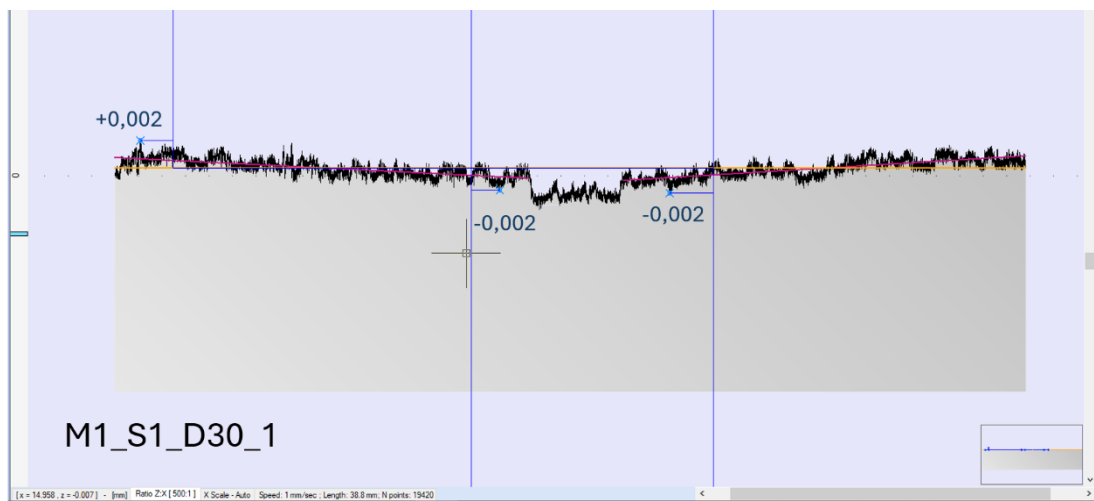
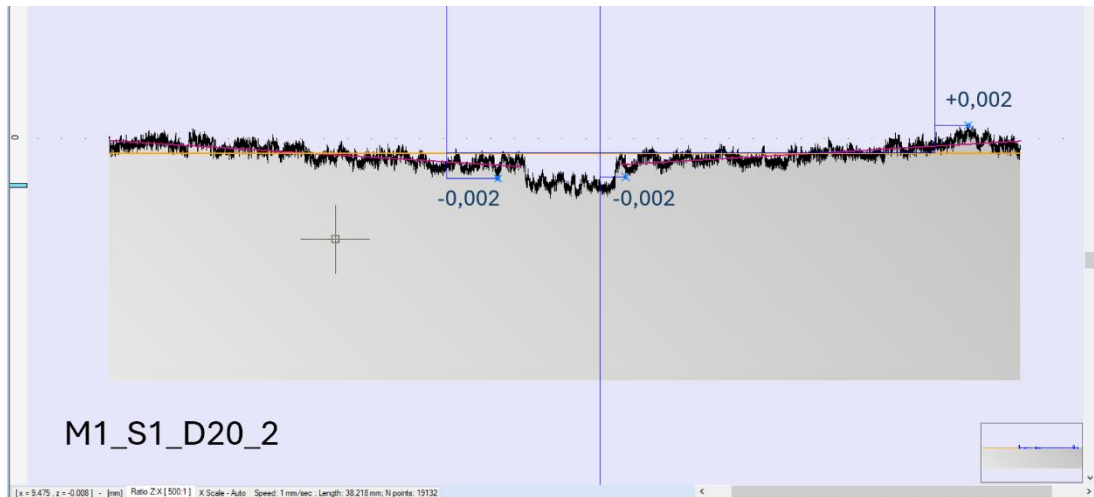
1,010mm

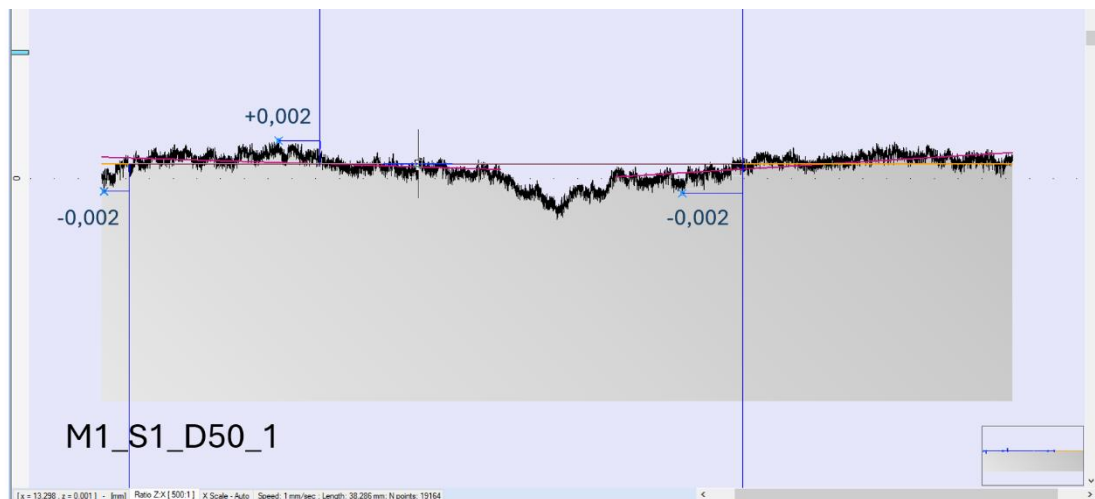
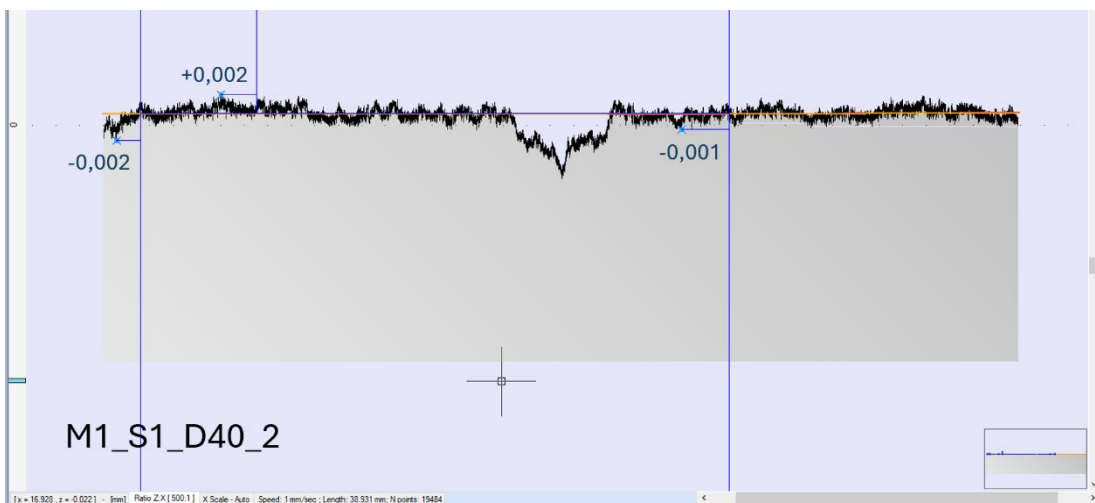
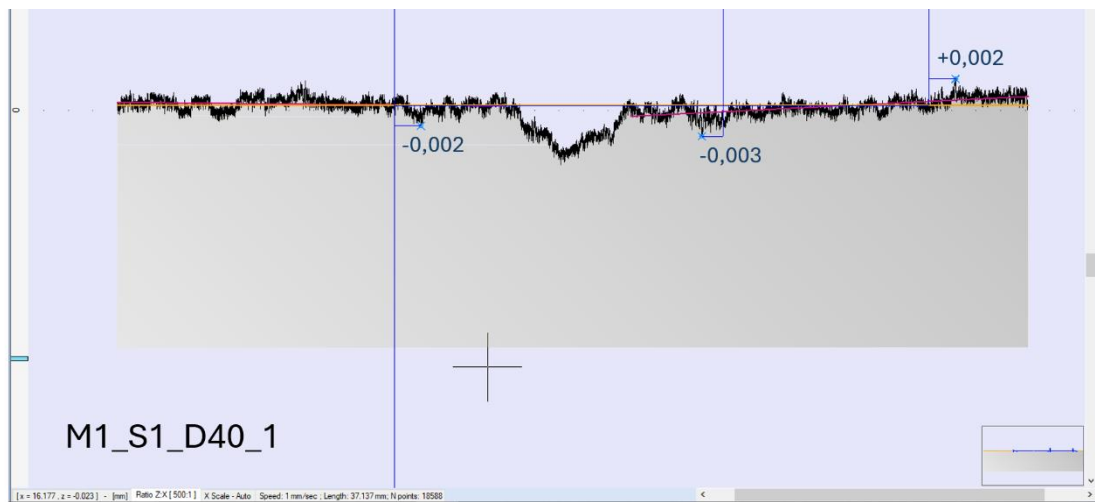


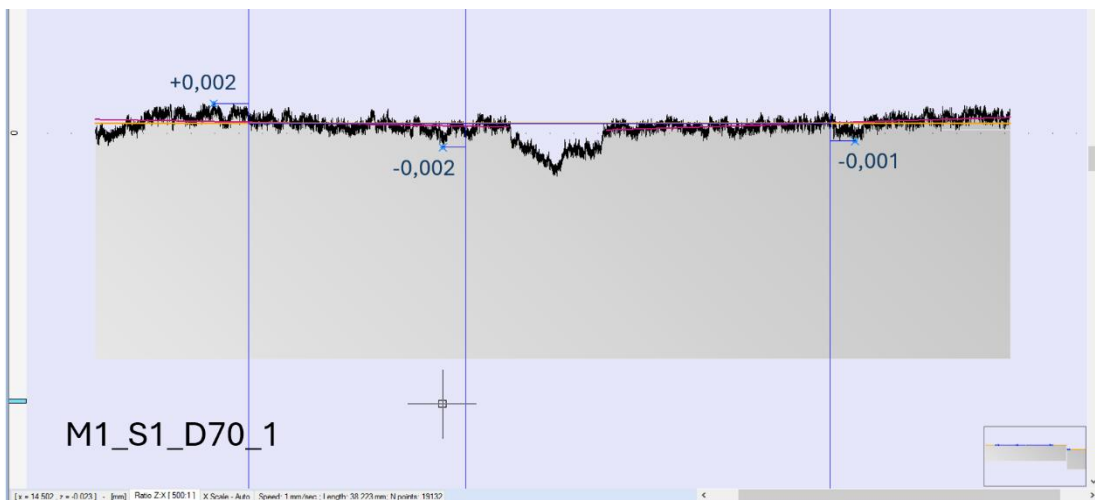
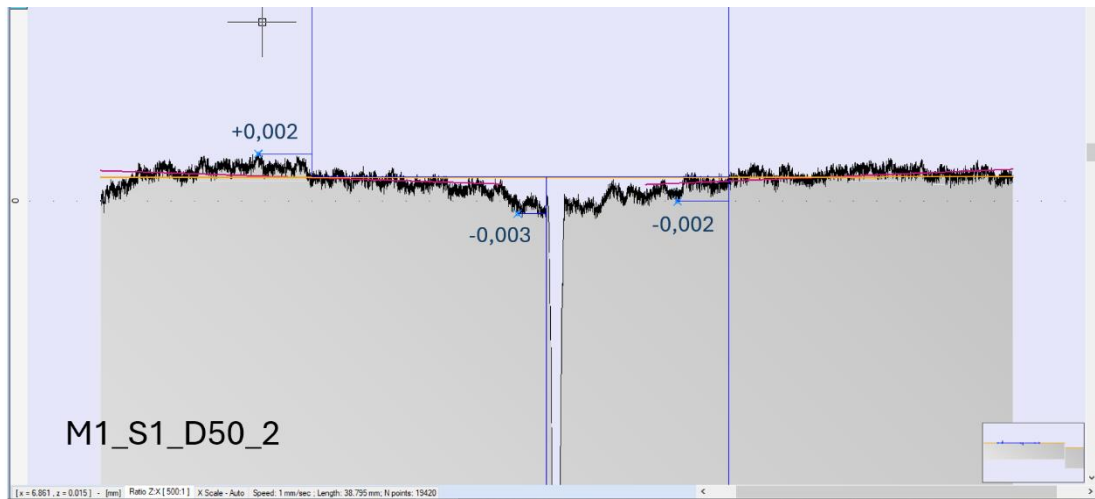
APPENDICE [B] – Misure profilometro

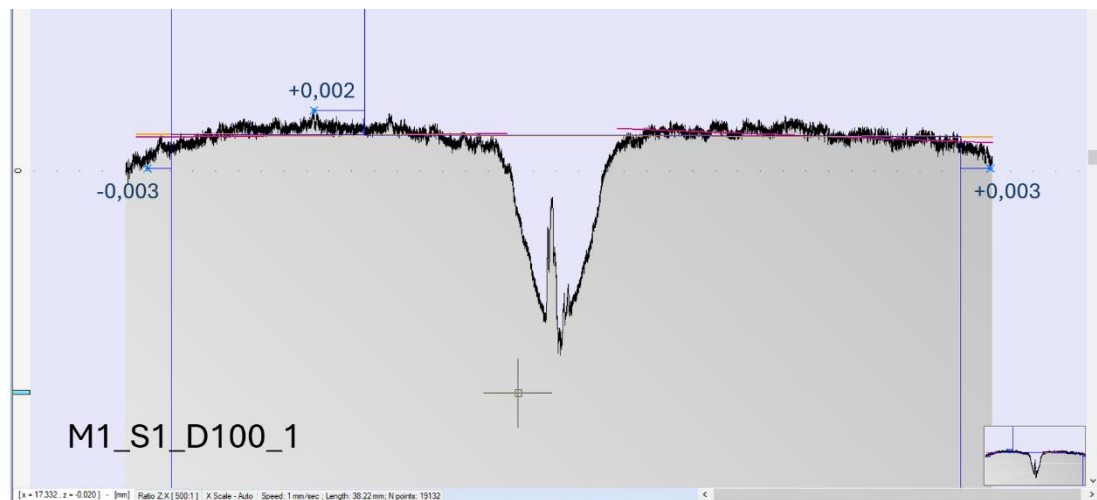
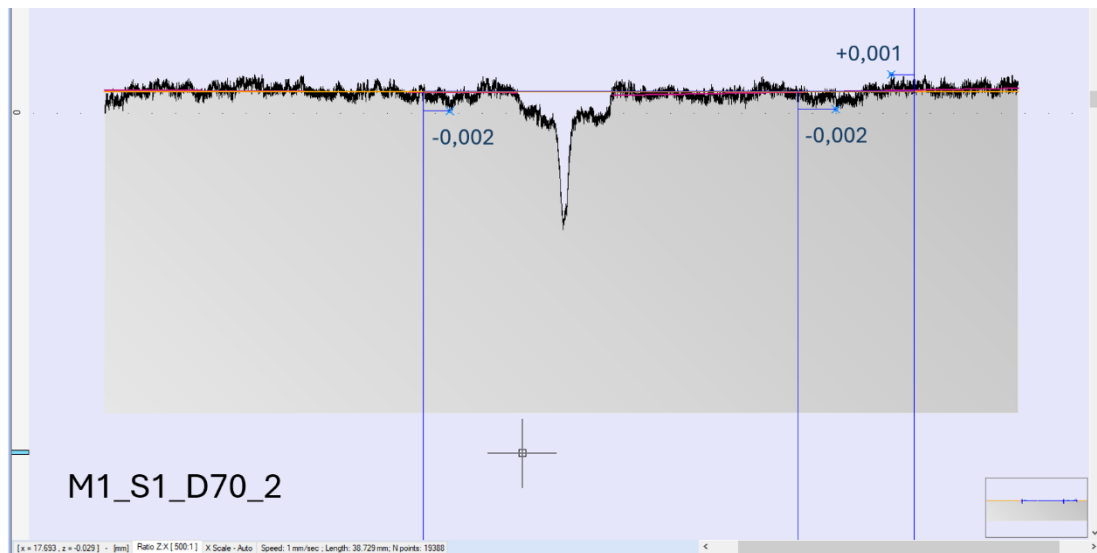
B.1 Cuscinetti in Acciaio Piatti

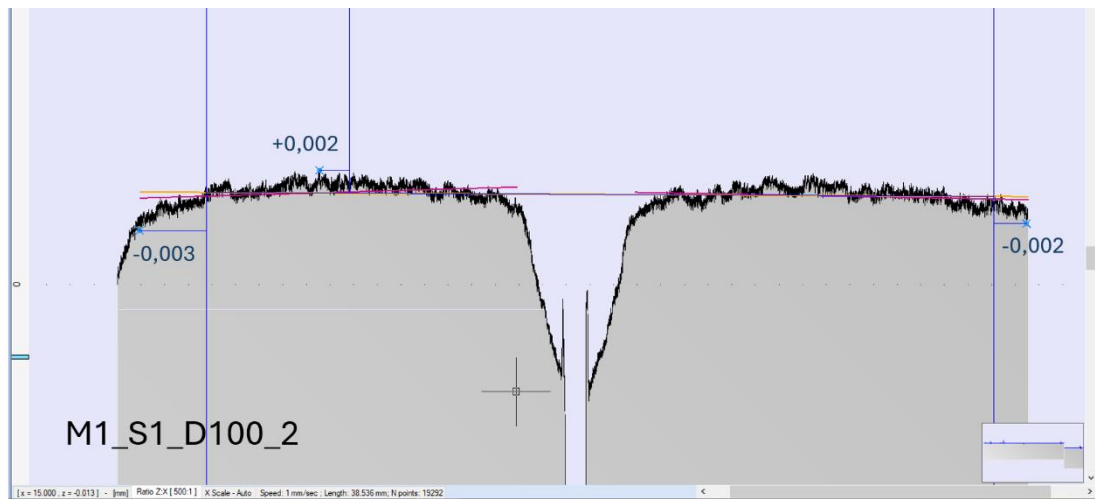




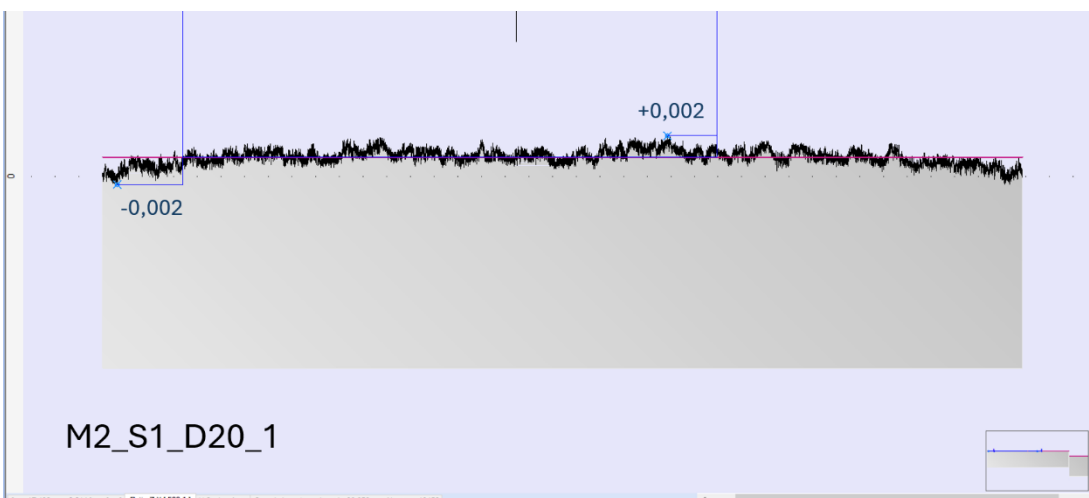
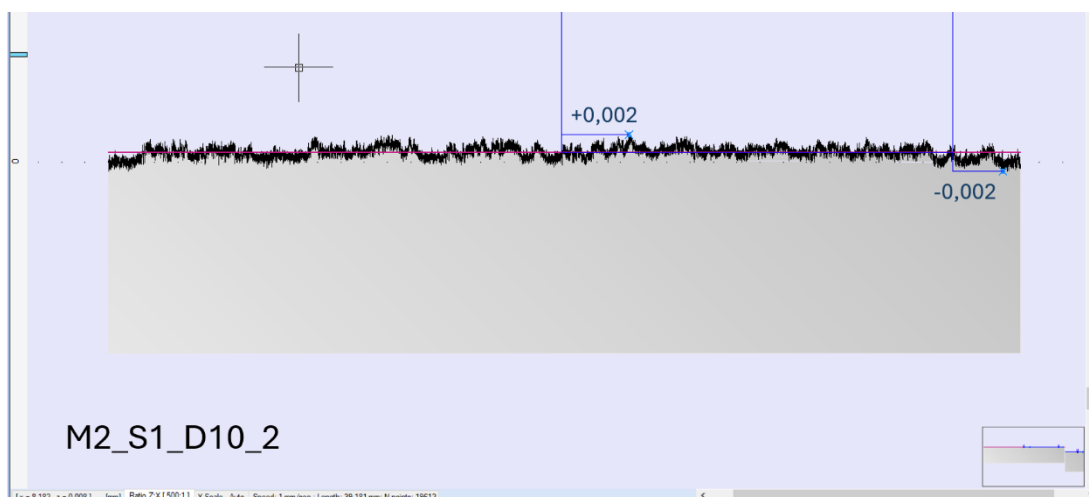
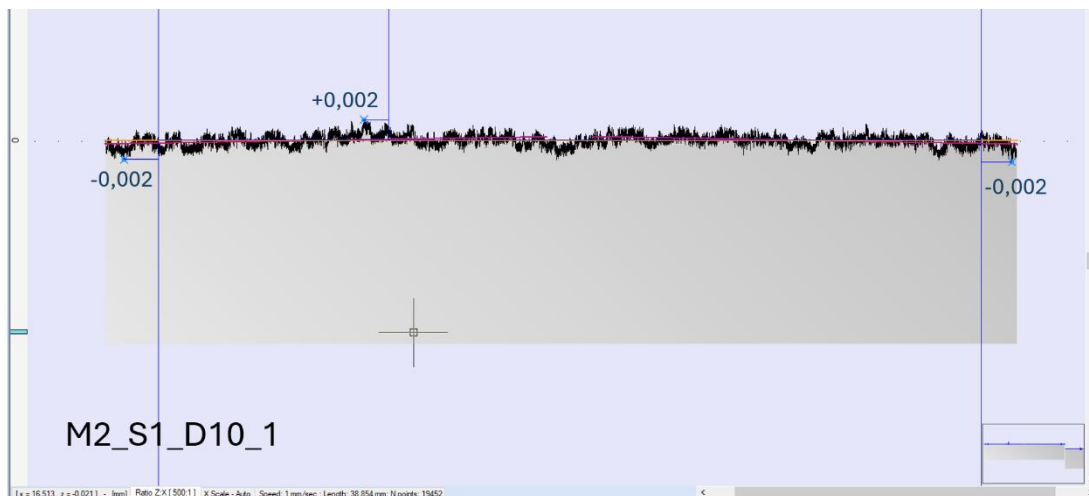


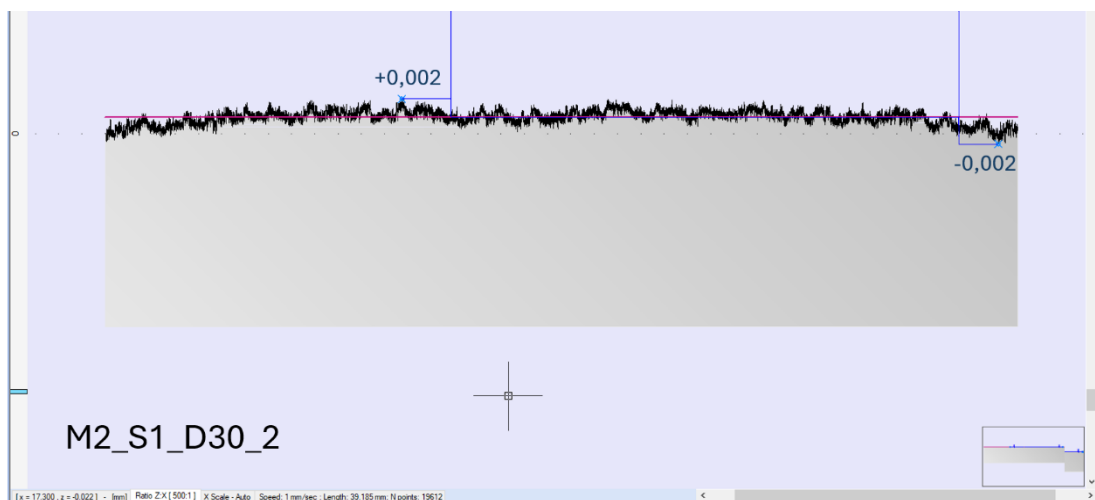
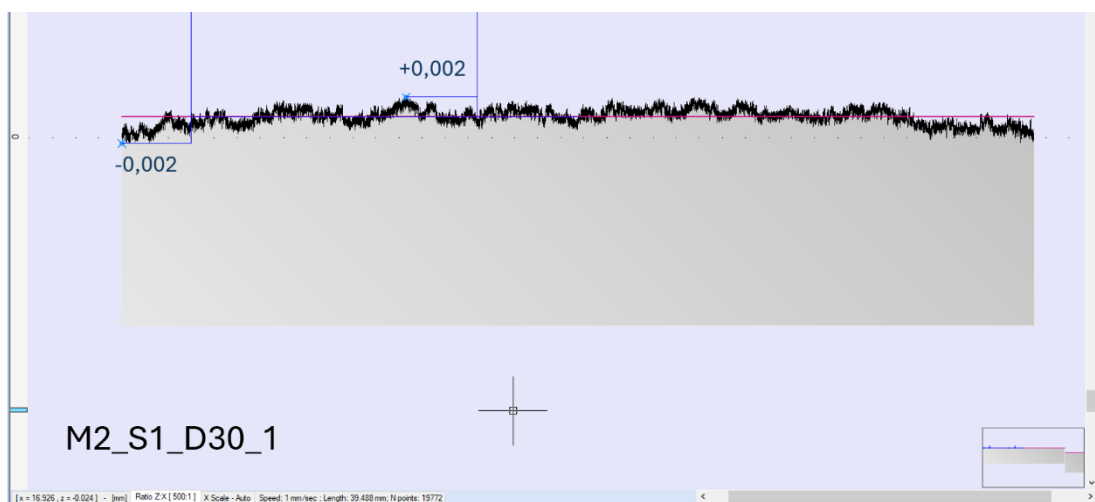
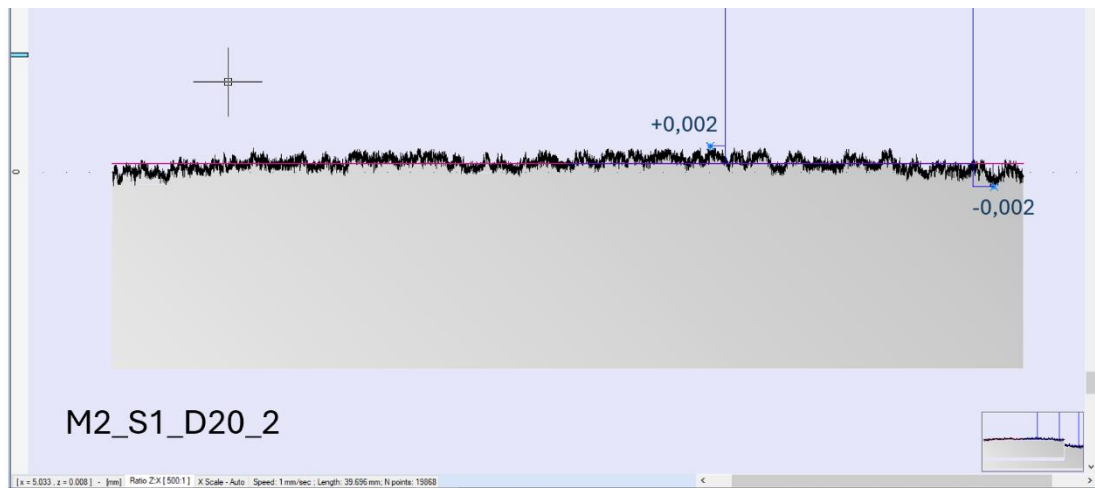


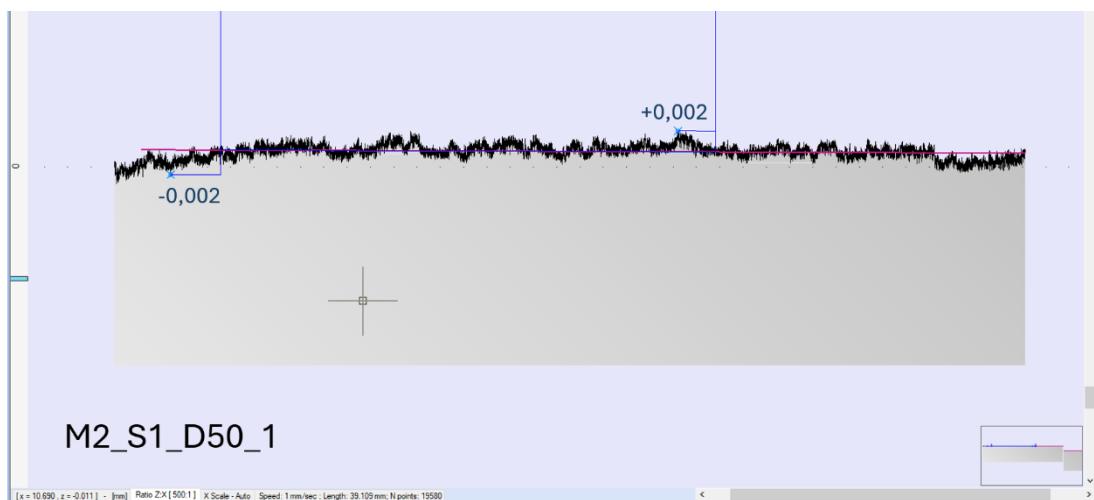
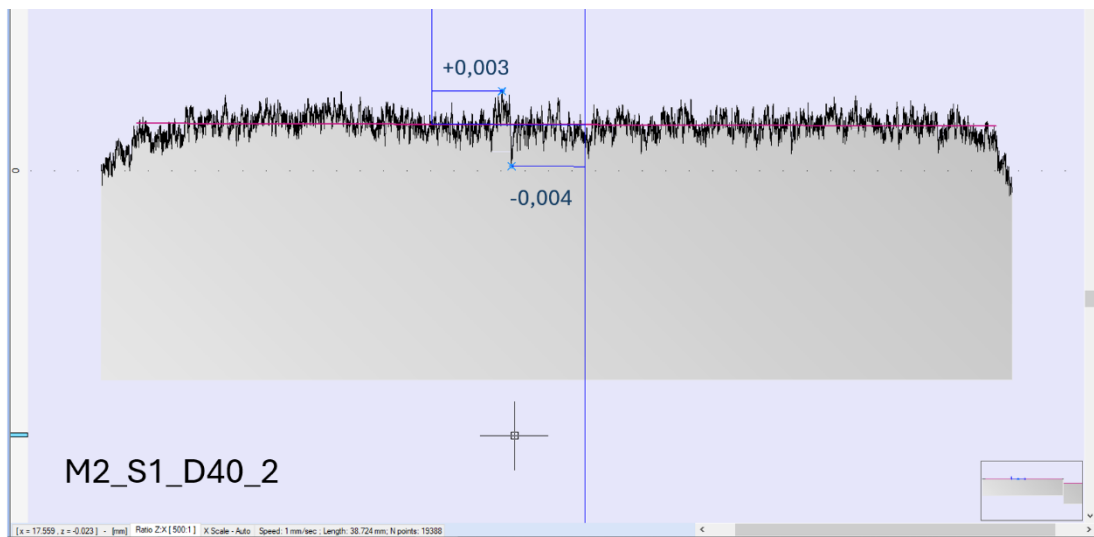
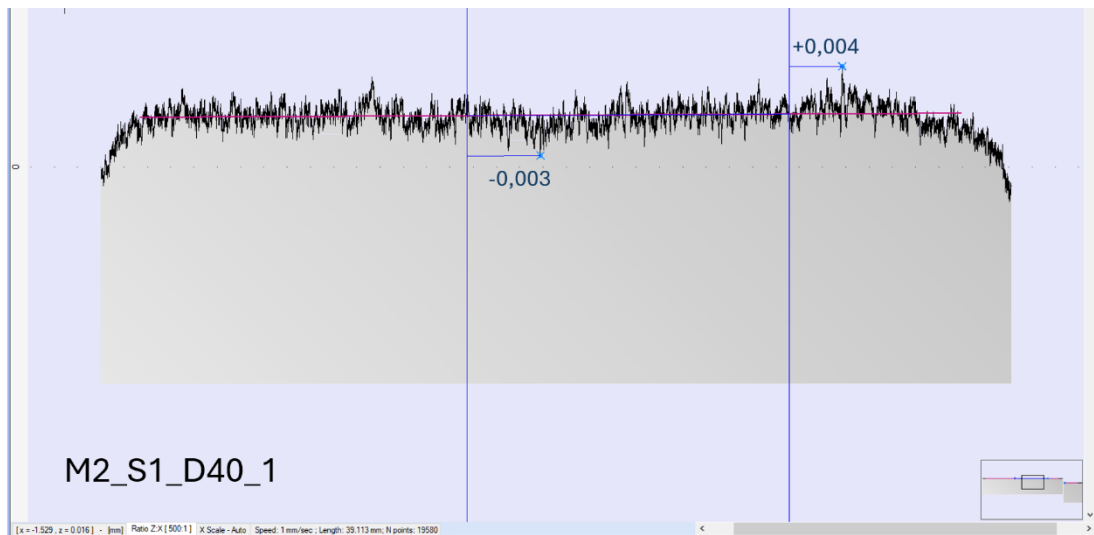


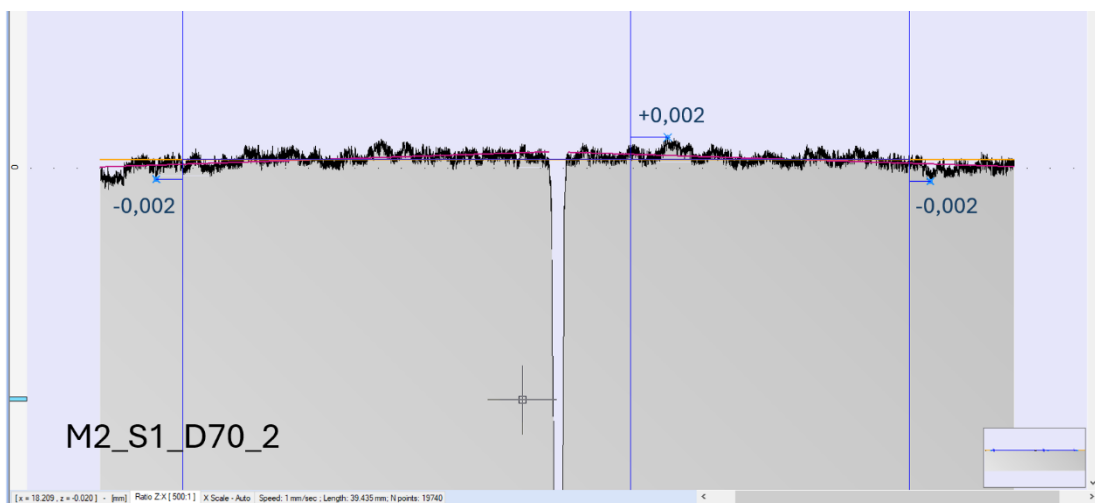
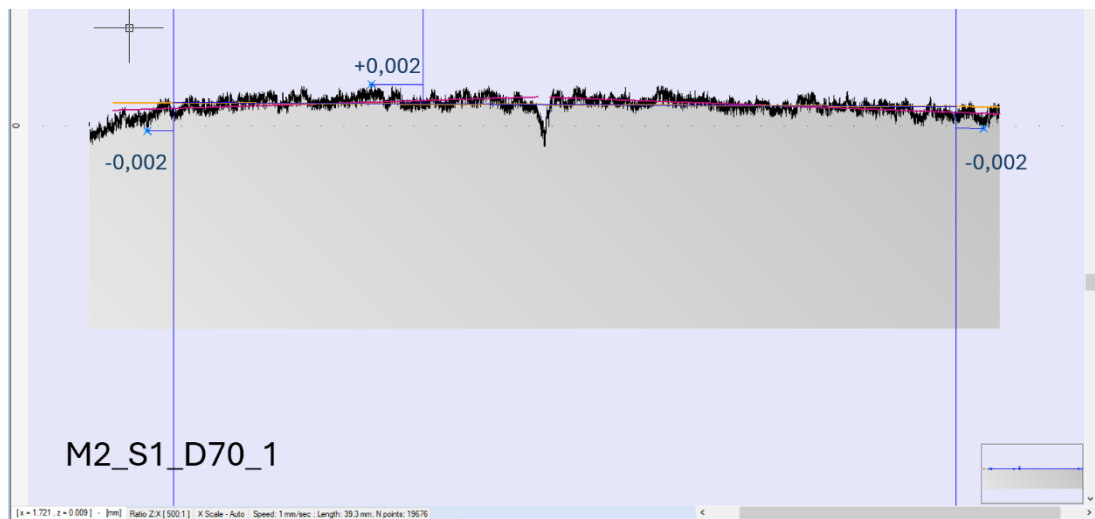
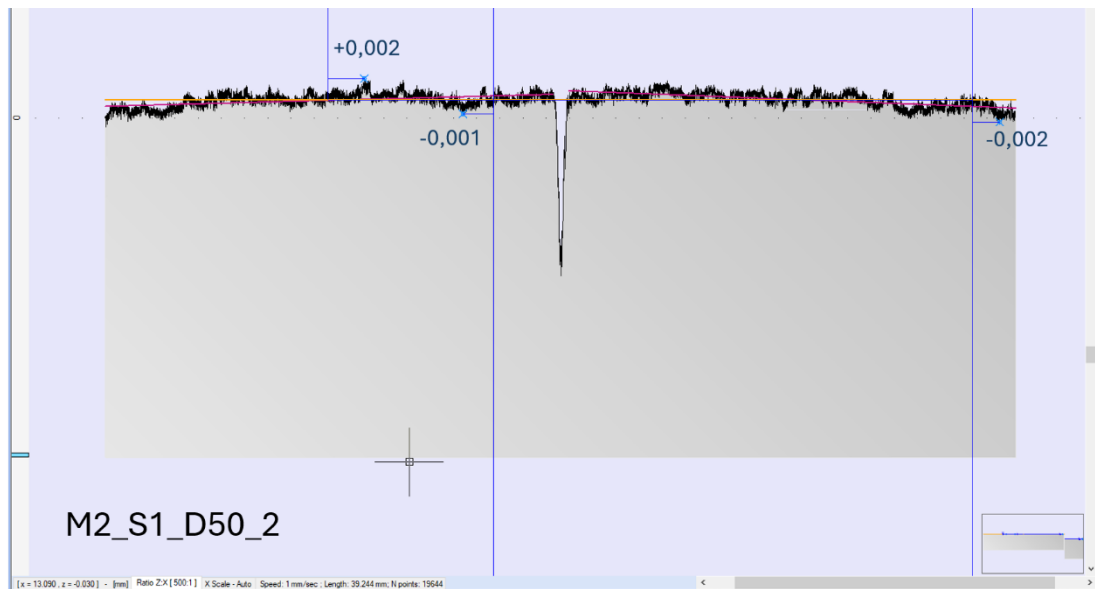


B.2 Cuscinetti in Alluminio Piatti

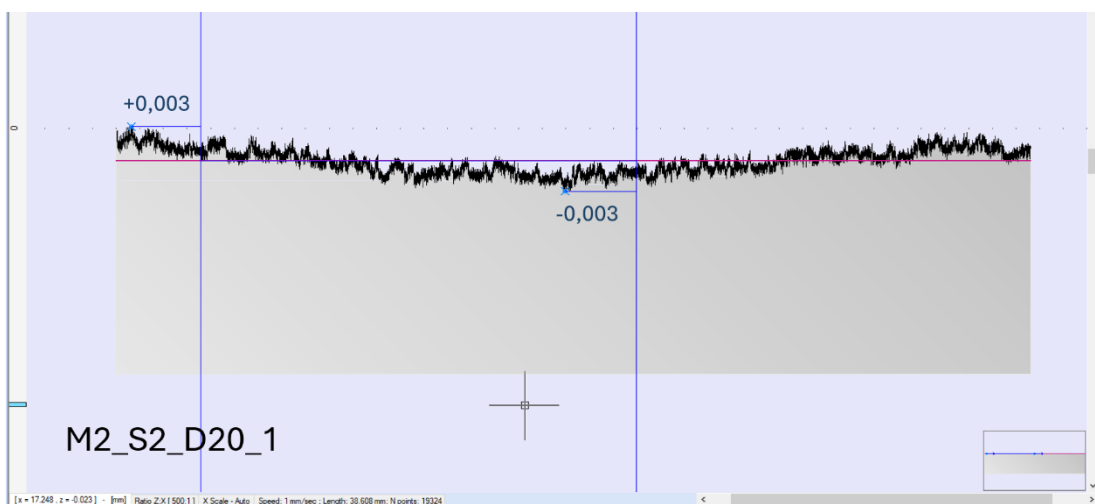
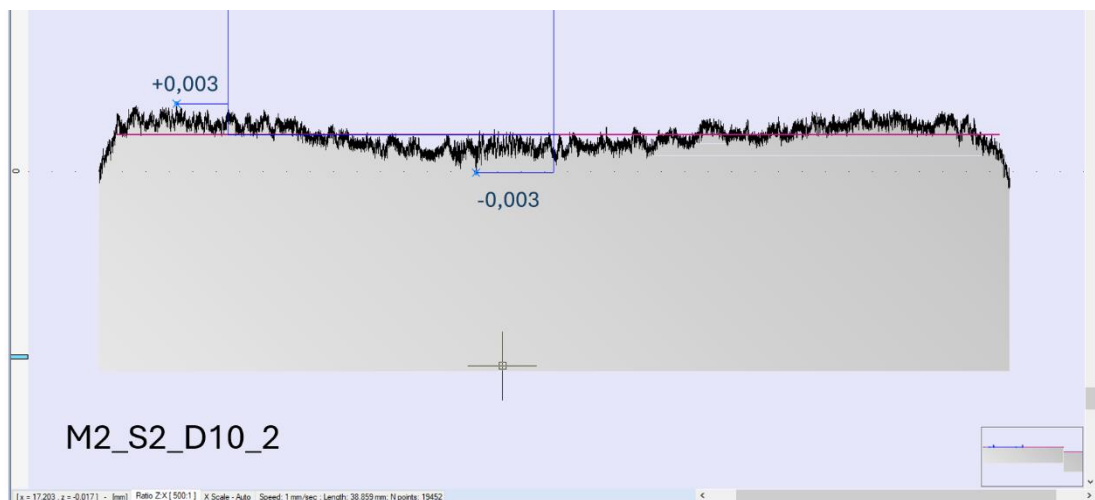
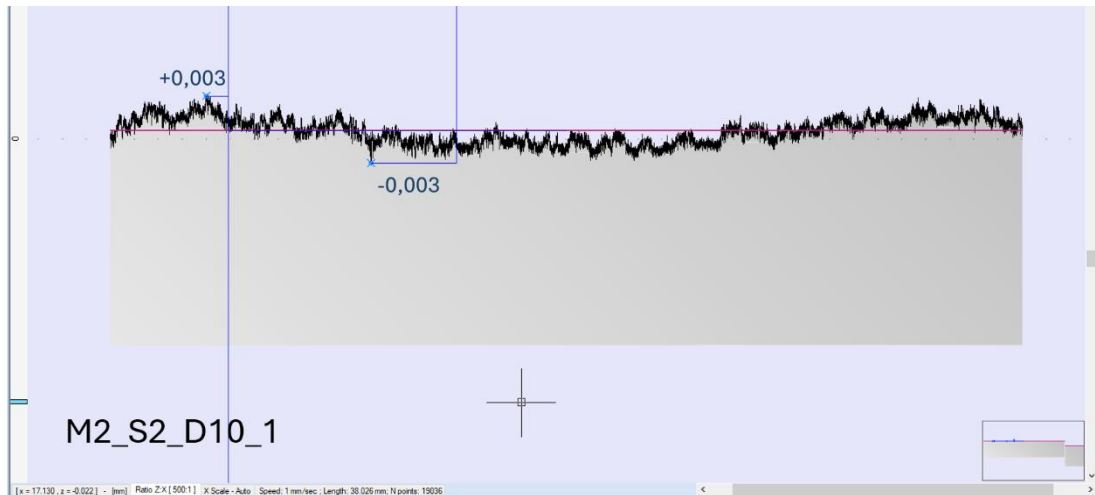


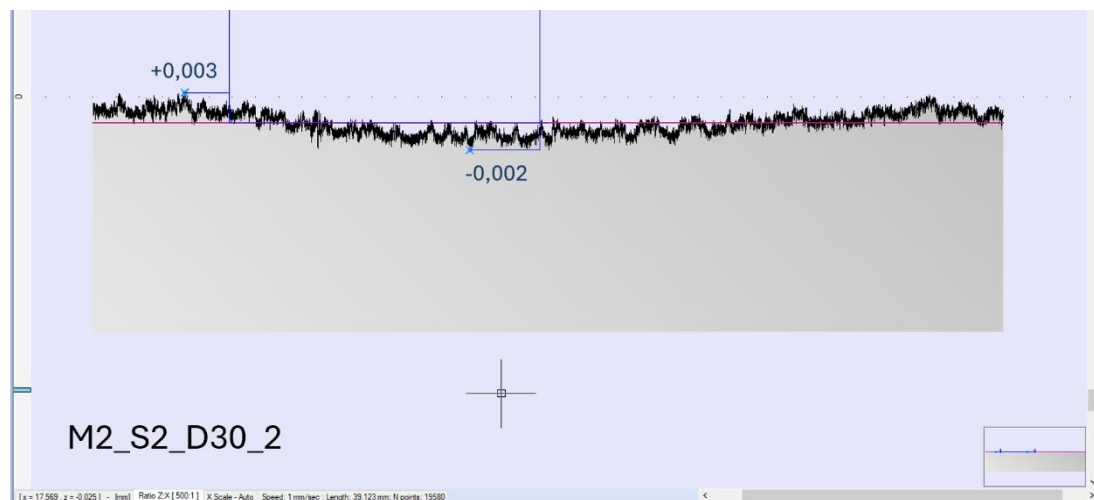
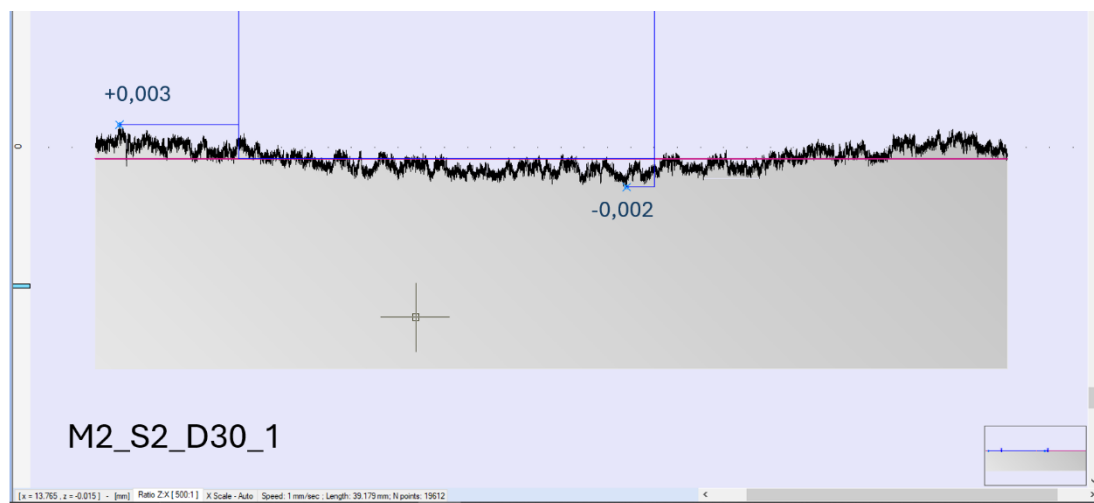
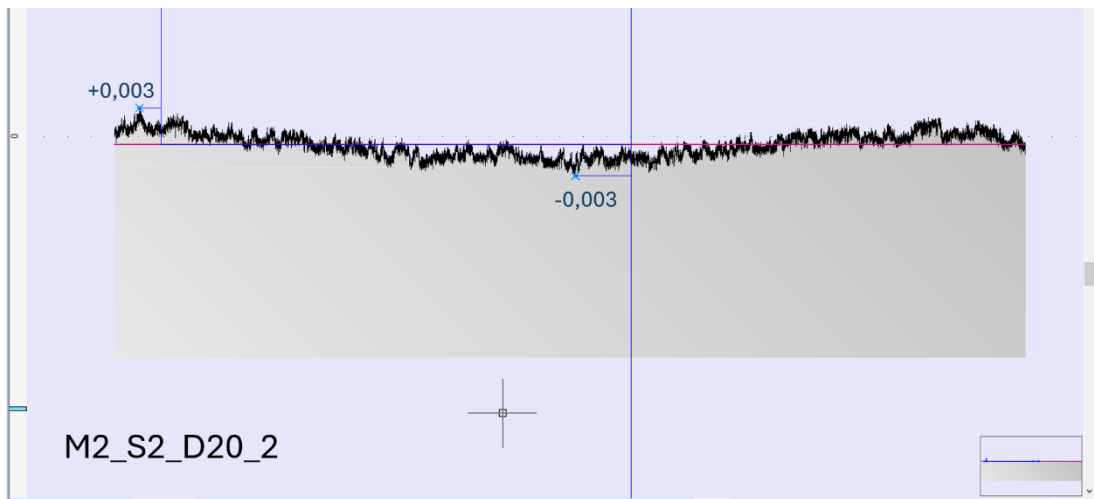


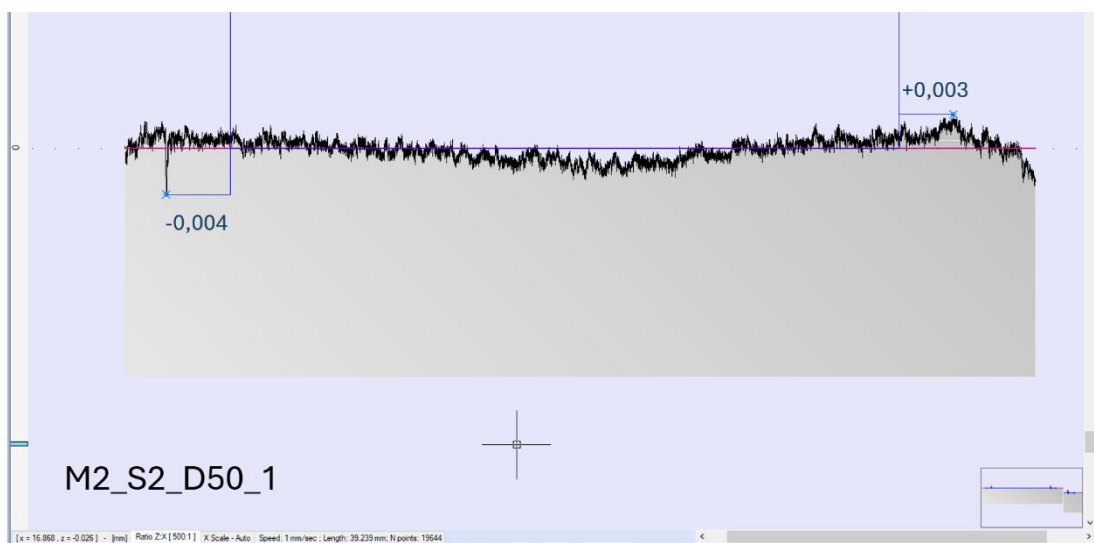
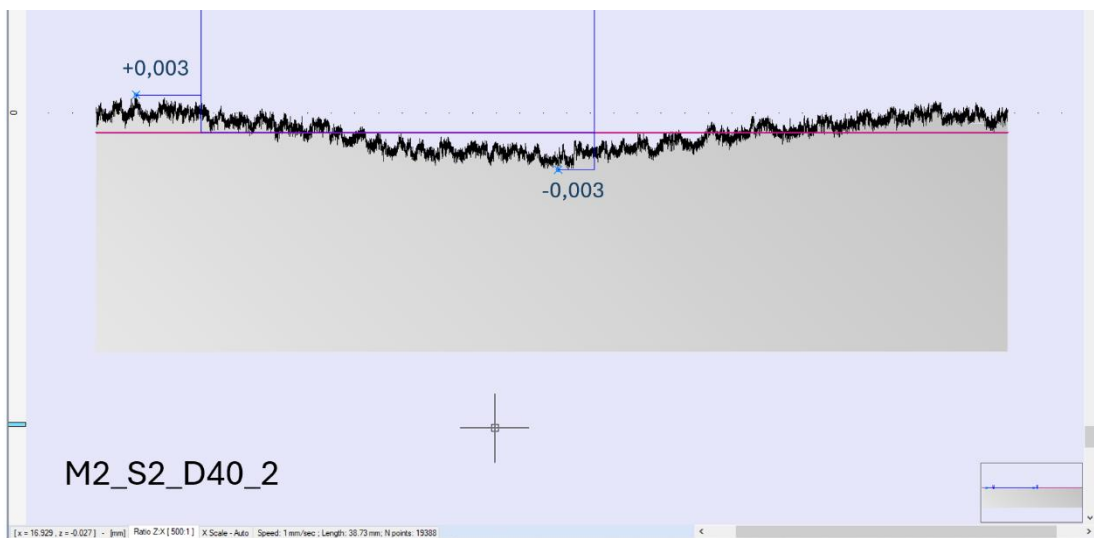
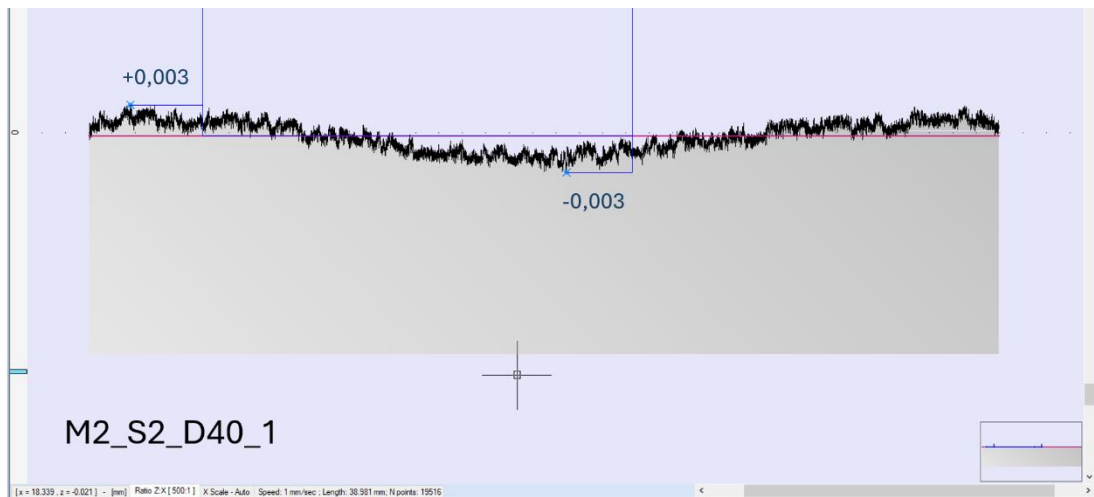


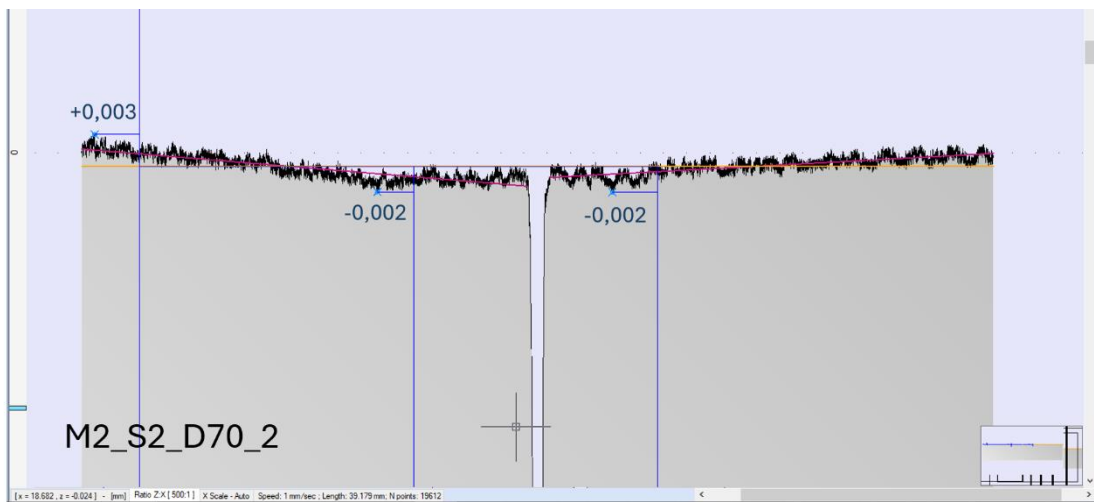
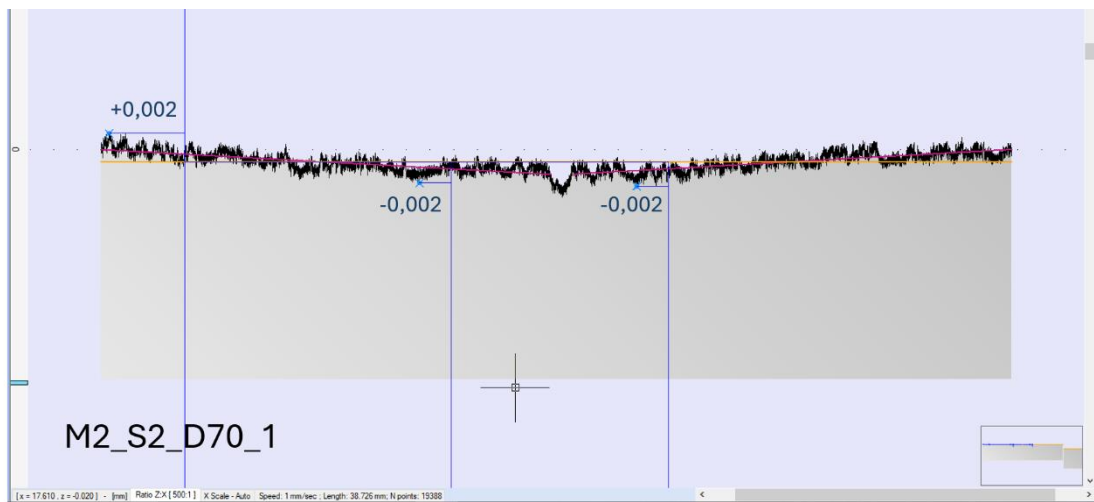
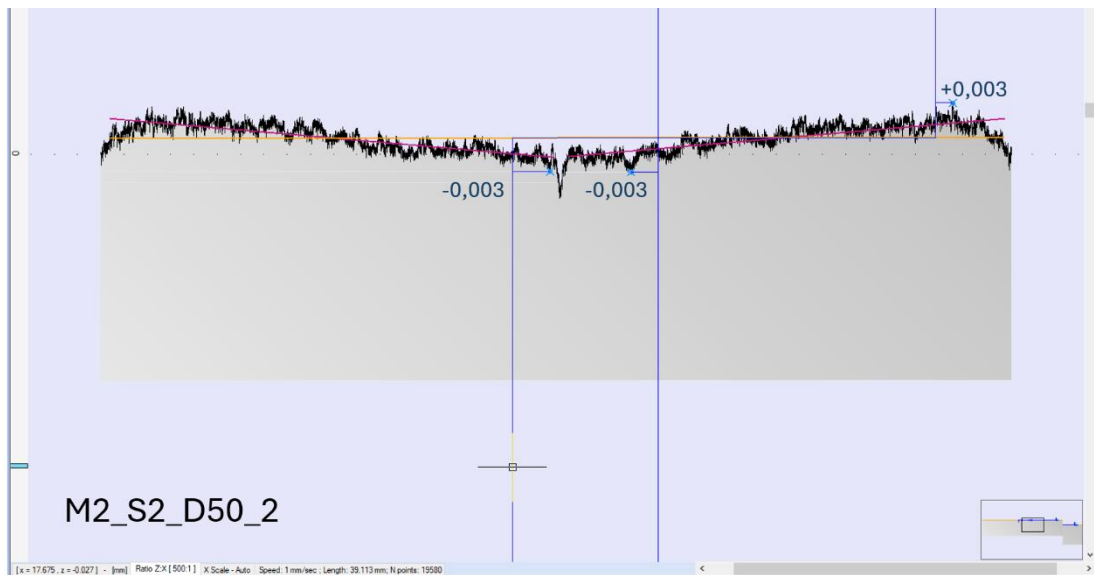


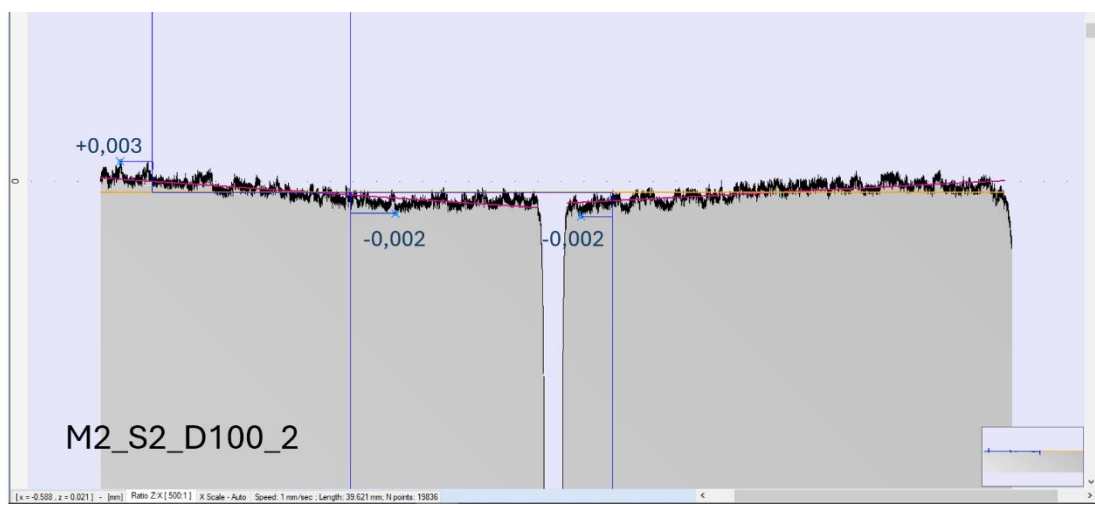
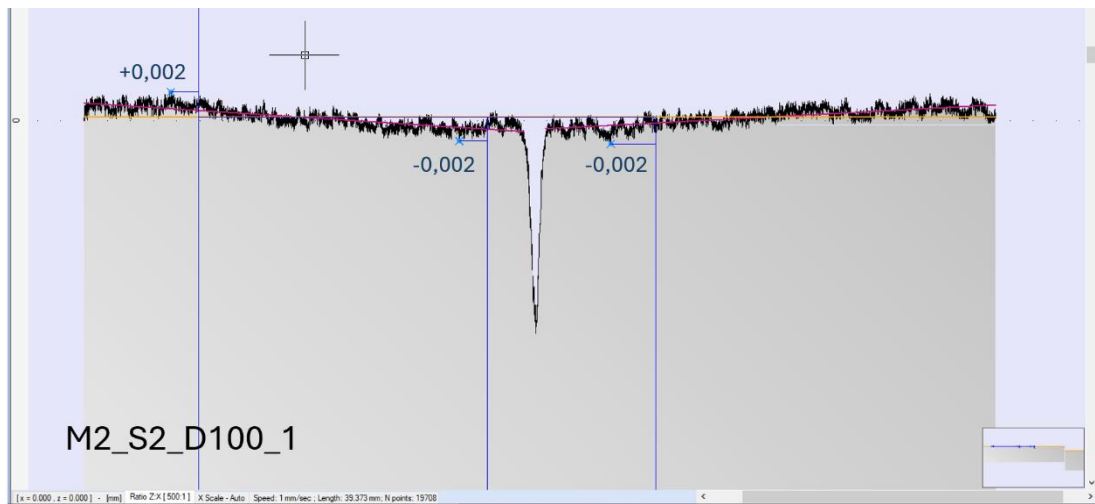
B.2 Cuscinetti in Alluminio Concavi











APPENDICE [C] – Codici di calcolo MATLAB

C.1 SCRIPT 1: Codice lettura dati da fogli Excel

```
clear all;  
close all;  
clc;
```

```
% ===== CONFIGURAZIONE =====  
% Specifica il file Excel da leggere  
nome_file = 'M2_S1_D40_PS6.xlsx'; % MODIFICA CON IL NOME FILE PARAMETRICO  
percorso_cartella = 'D:\POLITO MAGISTRALE\TESI_MAGISTRALE\misure profili pressione\PROFILI  
RIUNITI E RINOMINATI PARAMETRICI'; % MODIFICA QUESTO PERCORSO  
  
% Costruisci il percorso completo  
file_excel = fullfile(percorso_cartella, nome_file);  
  
fprintf('LETTURA FILE EXCEL CON NOMENCLATURA VARIABILI\n');  
  
% Verifica che il file esista  
if ~isfile(file_excel)  
    error('File non trovato: %s\nVerifica il percorso e il nome del file.', file_excel);  
end  
  
fprintf('File: %s\n\n', nome_file);  
  
% ===== PARSING NOMENCLATURA DEL FILE =====  
% Formato file: M(x)_S(y)_D(z)_PS(w).xlsx  
nome_file_senza_ext = nome_file(1:end-5); % Rimuovi .xlsx  
pattern_file = 'M(\d+)_S(\d+)_D(\d+)_PS(\d+)';  
tokens_file = regexp(nome_file_senza_ext, pattern_file, 'tokens');  
  
if isempty(tokens_file)  
    error('Nome file non conforme al formato M(x)_S(y)_D(z)_PS(w).xlsx');  
end  
  
% Estrai parametri dal file  
x_file = str2double(tokens_file{1}{1}); % Materiale  
y_file = str2double(tokens_file{1}{2}); % Superficie  
z_file = str2double(tokens_file{1}{3}); % Diametro  
w_file = str2double(tokens_file{1}{4}); % Pressione nominale  
  
% Descrizioni  
materiale_str = {'Acciaio', 'Alluminio'};  
superficie_str = {'Piatto', 'Concava'};  
  
if x_file < 1 || x_file > 2  
    error('Materiale non valido (M=%d, deve essere 1 o 2)', x_file);  
end  
if y_file < 1 || y_file > 2  
    error('Superficie non valida (S=%d, deve essere 1 o 2)', y_file);  
end
```

```

materiale_file = materiale_str{x_file};
superficie_file = superficie_str{y_file};

% Calcola il diametro del restrittore (ds) dal nominale
% Z è espresso in centesimi di mm, quindi dividi per 100
ds = z_file / 100; % Converti da centesimi di mm a mm

fprintf('Parametri file:\n');
fprintf('└─ Materiale: %s (M=%d)\n', materiale_file, x_file);
fprintf('└─ Superficie: %s (S=%d)\n', superficie_file, y_file);
fprintf('└─ Diametro NOMINALE (nomenclatura): %.3f mm\n', ds);
fprintf('└─ Diametro REALE: Verrà letto da cella K18 di ogni scheda\n');
fprintf('└─ Pressione nominale: %d bar (PS=%d)\n\n', w_file, w_file);

% Crea la parte fissa della nomenclatura del test
prefisso_test = sprintf('M%d_S%d_D%d_PS%d', x_file, y_file, z_file, w_file);

% ===== LETTURA DELLE SCHEDE =====
schede = sheetnames(file_excel);
num_schede = length(schede);

fprintf('Schede totali: %d\n', num_schede);
fprintf('Schede da elaborare (dalla 4ª in poi): %d\n\n', max(0, num_schede-3));

% Struttura per memorizzare i nomi delle variabili create
variabili_create = struct();
contatore_schede = 0;

% ===== ELABORAZIONE DI OGNI SCHEDA =====
for sheet_idx = 4:num_schede % Inizia dalla scheda 4
    nome_scheda = schede(sheet_idx);
    nome_scheda_char = convertStringsToChars(nome_scheda);

    fprintf('Elaborazione Scheda %d: "%s"\n', sheet_idx, nome_scheda_char);

    % ===== PARSING NOMENCLATURA DELLA SCHEDA =====
    % Formato scheda: (numero)N (es: 30N, 40N, 50N)

    pattern_scheda = '^(\d+)N$';
    tokens_scheda = regexp(nome_scheda_char, pattern_scheda, 'tokens');

    if isempty(tokens_scheda)
        fprintf(' X Nome scheda non conforme al formato (numero)N\n\n');
        continue;
    end

    % Estrai la forza nominale dalla scheda
    k_scheda = str2double(tokens_scheda{1}{1}); % Forza nominale (es: 30, 40, 50)

    fprintf('└─ Materiale: %s | Superficie: %s\n', materiale_file, superficie_file);
    fprintf('└─ Diametro: %dmm | PS: %dbar | Forza nom: %dN\n', z_file, w_file, k_scheda);

    try
        % Leggere i dati della scheda
        dati_temp = readtable(file_excel, 'Sheet', nome_scheda, 'VariableNamingRule',
'preserve');

        % Estrai le colonne specifiche (dalla riga 3 in poi)

```

```

posizione_radiale = dati_temp{3:end, 14}; % Colonna N: posizione radiale (mm)
forza = dati_temp{3:end, 15};             % Colonna O: forza (N)
pressione = dati_temp{3:end, 16};         % Colonna P: pressione (bar)
portata = dati_temp{3:end, 21};           % Colonna U: portata (l/min)

% ===== LETTURA R0_REALE DA CELLA K18 =====
% Leggi il valore numerico direttamente dalla cella K18
% K18 contiene il DIAMETRO del restrittore (in mm)
try
    diametro_reale_mm = readcell(file_excel, 'Sheet', nome_scheda_char, 'Range',
    'K18');

    % Se readcell restituisce una cella, estrai il valore
    if iscell(diametro_reale_mm)
        diametro_reale_mm = diametro_reale_mm{1};
    end
    % Converti a doppio se necessario
    diametro_reale_mm = double(diametro_reale_mm);

    % Verifica se è NaN o vuoto
    if isnan(diametro_reale_mm) || isempty(diametro_reale_mm)
        error('K18 contiene NaN o è vuota');
    end

    % Calcola il RAGGIO (R0) = diametro / 2
    R0_reale_mm = diametro_reale_mm / 2;
    R0_reale_m = R0_reale_mm * 1e-3;
    fprintf(' └─ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=%.4f mm → raggio=%.4f mm = %.6e
m\n', diametro_reale_mm, R0_reale_mm, R0_reale_m);

catch ME_K18
    % Se K18 non è leggibile, usa il nominale
    fprintf(' └─ ⚠ K18 non leggibile, uso nominale (raggio=%.4f mm)\n', ds/2);
    R0_reale_mm = ds / 2; % RAGGIO nominale (diametro/2)
    R0_reale_m = R0_reale_mm * 1e-3;
end

% Crea nomenclatura completa per le variabili
% Formato: Q_M1_S1_D40_PS4_F30
nome_variabale_base = sprintf('%s_F%d', prefisso_test, k_scheda);

% Salva le variabili con nomi significativi
% Q = Portata (l/min)
var_Q = sprintf('Q_%s', nome_variabale_base);
assignin('base', var_Q, portata);

% P = Pressione misurata (bar)
var_P = sprintf('P_%s', nome_variabale_base);
assignin('base', var_P, pressione);

% F = Forza (N)
var_F = sprintf('F_%s', nome_variabale_base);
assignin('base', var_F, forza);

% R = Posizione Radiale (mm)
var_R = sprintf('R_%s', nome_variabale_base);
assignin('base', var_R, posizione_radiale);

% Memorizza i nomi delle variabili create
% Usa un campo valido nella struttura

```

```

    contatore_schede = contatore_schede + 1;
    nome_campo_valido = sprintf('Scheda_%d', contatore_schede);
    variabili_create.(nome_campo_valido) = struct(...
        'NomeScheda', nome_scheda_char, ...
        'Forza_N', k_scheda, ...
        'Q', var_Q, ...
        'P', var_P, ...
        'F', var_F, ...
        'R', var_R, ...
        'R0_reale_mm', R0_reale_mm, ...
        'R0_reale_m', R0_reale_m);

    num_righe = length(portata);
    fprintf('  └─ ✓ Variabili create: %d righe di dati\n', num_righe);
    fprintf('  └─ Portata (Q): %s\n', var_Q);
    fprintf('  └─ Pressione (P): %s\n', var_P);
    fprintf('  └─ Forza (F): %s\n', var_F);
    fprintf('  └─ Posizione radiale (R): %s\n', var_R);
    fprintf('  └─ Intervalli dati:\n');
    fprintf('  | └─ Posizione radiale: %.2f - %.2f mm\n', ...
        min(posizione_radiale, [], 'omitnan'), max(posizione_radiale, [], 'omitnan'));
    fprintf('  | └─ Forza: %.2f - %.2f N\n', ...
        min(forza, [], 'omitnan'), max(forza, [], 'omitnan'));
    fprintf('  | └─ Pressione: %.2f - %.2f bar\n', ...
        min(pressione, [], 'omitnan'), max(pressione, [], 'omitnan'));
    fprintf('  | └─ portata: %.2f - %.2f l/min\n', ...
        min(portata, [], 'omitnan'), max(portata, [], 'omitnan'));

    catch ME
        fprintf('  X Errore nella lettura dei dati: %s\n\n', ME.message);
    end
end

% ===== SOMMARIO =====
fprintf('ELABORAZIONE COMPLETATA\n');

schede_elaborate = fieldnames(variabili_create);
fprintf('Schede elaborate: %d\n\n', length(schede_elaborate));

if isempty(schede_elaborate)
    fprintf('⚠ NESSUNA SCHEDA TROVATA!\n');
    fprintf('Verifica che:\n');
    fprintf('1. I nomi delle schede abbiano formato: (numero)N (es: 30N, 40N)\n');
    fprintf('2. I dati siano dalla colonna N in poi, dalla riga 3 in poi\n');
else
    fprintf('Variabili create:\n');
    fprintf('_____ \n\n');

    for i = 1:length(schede_elaborate)
        campo = schede_elaborate{i};
        info = variabili_create.(campo);
        fprintf('Scheda: %s (Forza: %dN)\n', info.NomeScheda, info.Forza_N);
        fprintf('  Q: %s (Portata in l/min)\n', info.Q);
        fprintf('  P: %s (Pressione in bar)\n', info.P);
        fprintf('  F: %s (Forza in N)\n', info.F);
        fprintf('  R: %s (Posizione radiale in mm)\n\n', info.R);
    end

    fprintf('===== \n\n');

```

```

% ===== COME ACCEDERE ALLE VARIABILI =====
fprintf('COME ACCEDERE ALLE VARIABILI:\n\n');

prima_scheda_campo = schede_elaborate{1};
info_prima = variabili_create.(prima_scheda_campo);

fprintf('Esempio con la scheda "%s":\n\n', info_prima.NomeScheda);
fprintf('1. Visualizzare la portata:\n');
fprintf('   %s\n\n', info_prima.Q);

fprintf('2. Visualizzare la pressione:\n');
fprintf('   %s\n\n', info_prima.P);

fprintf('3. Visualizzare la forza:\n');
fprintf('   %s\n\n', info_prima.F);

fprintf('4. Visualizzare la posizione radiale:\n');
fprintf('   %s\n\n', info_prima.R);

fprintf('5. Fare un grafico (Forza vs Posizione Radiale):\n');
fprintf('   plot(%s, %s)\n', info_prima.R, info_prima.F);
fprintf('   xlabel('Posizione radiale (mm)')\n');
fprintf('   ylabel('Forza (N)')\n');
fprintf('   grid on\n\n');

fprintf('6. Fare un grafico (Portata vs Posizione Radiale):\n');
fprintf('   plot(%s, %s)\n', info_prima.R, info_prima.Q);
fprintf('   xlabel('Posizione radiale (mm)')\n');
fprintf('   ylabel('Portata (l/min)')\n');
fprintf('   grid on\n\n');

fprintf('===== \n\n');

% ===== ANTEPRIMA PRIMO TEST =====
fprintf('ANTEPRIMA: Primi 5 valori della scheda "%s"\n', info_prima.NomeScheda);
fprintf('===== \n\n');

% Ritrova le variabili dal workspace
R_data = evalin('base', info_prima.R);
F_data = evalin('base', info_prima.F);
P_data = evalin('base', info_prima.P);
Q_data = evalin('base', info_prima.Q);

fprintf('Dati della scheda: %s\n\n', info_prima.NomeScheda);
fprintf('Riga | Pos.Radiale(mm) | Forza(N) | Pressione(bar) | Portata(l/min)\n');
fprintf('-----|-----|-----|-----|-----\n');

num_righe_anteprima = min(5, length(R_data));
for row = 1:num_righe_anteprima
    fprintf('%4d | %15.4f | %8.4f | %14.4f | %14.4f\n', ...
        row, R_data(row), F_data(row), P_data(row), Q_data(row));
end

% ===== SALVATAGGIO DATI IN FILE .MAT =====
fprintf('SALVATAGGIO DATI IN .MAT FILE\n');

% Nome file .mat parametrico
nome_file_mat = sprintf('%s.mat', prefisso_test);

```

```

fprintf('Salvataggio in corso...\n');
fprintf('Nome file: %s\n\n', nome_file_mat);

% Crea una struttura con tutti i dati
dati_salvati = struct();

% Salva i metadati del file
dati_salvati.Materiale = materiale_file;
dati_salvati.x = x_file;
dati_salvati.Superficie = superficie_file;
dati_salvati.y = y_file;
dati_salvati.Diametro_nominale_mm = ds;
dati_salvati.DiametroRaw = z_file;
dati_salvati.Pressione_nominale_bar = w_file;

% Salva i dati di ogni scheda
for i = 1:length(schede_elaborate)
    campo = schede_elaborate{i};
    info = variabili_create(campo);

    % Recupera i dati dal workspace
    Q = evalin('base', info.Q);
    P = evalin('base', info.P);
    F = evalin('base', info.F);
    R = evalin('base', info.R);

    % Recupera R0_reale da info
    R0_reale_mm = info.R0_reale_mm;
    R0_reale_m = info.R0_reale_m;

    % Crea un campo nella struttura con il nome della forza
    nome_scheda_struct = sprintf('F%d', info.Forza_N);

    dati_salvati.(nome_scheda_struct) = struct(...
        'Q', Q, ...
        'P', P, ...
        'F', F, ...
        'R', R, ...
        'Forza_nominale_N', info.Forza_N, ...
        'R0_reale_mm', R0_reale_mm, ...
        'R0_reale_m', R0_reale_m, ...
        'NomeScheda', info.NomeScheda);

    fprintf(' ✓ Salvati dati scheda %s (F%dN): %d punti\n', info.NomeScheda,
info.Forza_N, length(Q));
end

% Salva tutto nel file .mat
save(nome_file_mat, 'dati_salvati', '-v7.3');

fprintf('\n✓ File salvato con successo: %s\n\n', nome_file_mat);

% ===== ISTRUZIONI PER CARICARE I DATI =====
fprintf('COME CARICARE I DATI NELLO SCRIPT SUCCESSIVO\n');

fprintf('Nel tuo script di rielaborazione, usa:\n\n');
fprintf('1. Carica i dati:\n');
fprintf('    load('%s')\n\n', nome_file_mat);

```

```

fprintf('2. Accedi ai metadati generali:\n');
fprintf('    materiale = dati_salvati.Materiale;\n');
fprintf('    ds_nominale_mm = dati_salvati.Diametro_nominale_mm;\n');
fprintf('    PS = dati_salvati.Pressione_nominale_bar;\n\n');

fprintf('3. Accedi ai dati di una scheda (es: F30):\n');
fprintf('    R_30 = dati_salvati.F30.R;                %% Posizione radiale\n');
fprintf('    F_30 = dati_salvati.F30.F;                %% Forza\n');
fprintf('    P_30 = dati_salvati.F30.P;                %% Pressione\n');
fprintf('    Q_30 = dati_salvati.F30.Q;                %% Portata\n');
fprintf('    R0_reale_mm = dati_salvati.F30.R0_reale_mm; %% R0 REALE (misurato) in mm\n');
fprintf('    R0_reale_m = dati_salvati.F30.R0_reale_m;  %% R0 REALE (misurato) in
m\n\n');

fprintf('4. Accedi a tutte le forze disponibili:\n');
fprintf('    campi = fieldnames(dati_salvati);\n');
fprintf('    for i = 1:length(campi)\n');
fprintf('        if startsWith(campi{i}, 'F') && ~ischar(dati_salvati.(campi{i}))\n');
fprintf('            forza = dati_salvati.(campi{i}).Forza_nominale_N;\n');
fprintf('            R0_reale = dati_salvati.(campi{i}).R0_reale_m; %% Accedi a
R0_reale\n');
fprintf('            dati = dati_salvati.(campi{i});\n');
fprintf('            %% Elabora i dati...\n');
fprintf('        end\n');
fprintf('    end\n\n');

end

```

LETTURA FILE EXCEL CON NOMENCLATURA VARIABILI

File: M2_S1_D40_PS6.xlsx

Parametri file:

- └ Materiale: Alluminio (M=2)
- └ Superficie: Piatta (S=1)
- └ Diametro NOMINALE (nomenclatura): 0.400 mm
- └ Diametro REALE: Verrà letto da cella K18 di ogni scheda
- └ Pressione nominale: 6 bar (PS=6)

Schede totali: 12

Schede da elaborare (dalla 4^a in poi): 9

Elaborazione Scheda 4: "30N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 30N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 107 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F30
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F30
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F30
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F30
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.30 - 20.10 mm
 - | └ Forza: 30.30 - 32.30 N
 - | └ Pressione: -0.14 - 6.07 bar
 - | └ Portata: 3.19 - 3.38 l/min

Elaborazione Scheda 5: "40N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 40N

- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 98 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F40
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F40
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F40
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F40
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.30 - 20.15 mm
 - | └ Forza: 39.50 - 41.70 N
 - | └ Pressione: 0.00 - 6.08 bar
 - | └ Portata: 2.86 - 3.02 l/min

Elaborazione Scheda 6: "50N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 50N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 93 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F50
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F50
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F50
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F50
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.32 - 20.07 mm
 - | └ Forza: 49.50 - 52.60 N
 - | └ Pressione: 0.00 - 6.03 bar
 - | └ Portata: 2.54 - 2.73 l/min

Elaborazione Scheda 7: "60N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 60N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 95 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F60
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F60
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F60
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F60
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.30 - 20.20 mm
 - | └ Forza: 59.30 - 61.70 N
 - | └ Pressione: 0.00 - 6.05 bar
 - | └ Portata: 2.30 - 2.48 l/min

Elaborazione Scheda 8: "70N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 70N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 94 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F70
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F70
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F70
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F70
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.30 - 20.10 mm
 - | └ Forza: 69.30 - 72.60 N
 - | └ Pressione: 0.00 - 6.04 bar
 - | └ Portata: 2.10 - 2.27 l/min

Elaborazione Scheda 9: "80N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 80N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 90 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F80
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F80
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F80
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F80
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.35 - 20.15 mm
 - | └ Forza: 78.30 - 82.00 N
 - | └ Pressione: 0.00 - 6.08 bar
 - | └ Portata: 1.99 - 2.13 l/min

Elaborazione Scheda 10: "90N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 90N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 88 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F90
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F90
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F90
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F90
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.32 - 20.12 mm
 - | └ Forza: 88.40 - 92.80 N
 - | └ Pressione: 0.00 - 6.09 bar
 - | └ Portata: 1.84 - 2.00 l/min

Elaborazione Scheda 11: "100N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 100N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 88 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F100
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F100
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F100
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F100
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.30 - 20.15 mm
 - | └ Forza: 97.60 - 102.50 N
 - | └ Pressione: 0.00 - 6.09 bar
 - | └ Portata: 1.73 - 1.90 l/min

Elaborazione Scheda 12: "110N"

- └ Materiale: Alluminio | Superficie: Piatta
- └ Diametro: 40mm | PS: 6bar | Forza nom: 110N
- └ ✓ R0_reale letto da K18: diametro=0.4250 mm → raggio=0.2125 mm = 2.125000e-04 m
- └ ✓ Variabili create: 84 righe di dati
- └ Portata (Q): Q_M2_S1_D40_PS6_F110
- └ Pressione (P): P_M2_S1_D40_PS6_F110
- └ Forza (F): F_M2_S1_D40_PS6_F110
- └ Posizione radiale (R): R_M2_S1_D40_PS6_F110
- └ Intervalli dati:
 - | └ Posizione radiale: -0.28 - 20.02 mm
 - | └ Forza: 107.60 - 113.80 N

| └─ Pressione: 0.00 - 6.05 bar
| └─ Portata: 1.61 - 2.23 l/min

ELABORAZIONE COMPLETATA
Schede elaborate: 9

Variabili create:

Scheda: 30N (Forza: 30N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F30 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F30 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F30 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F30 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 40N (Forza: 40N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F40 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F40 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F40 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F40 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 50N (Forza: 50N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F50 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F50 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F50 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F50 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 60N (Forza: 60N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F60 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F60 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F60 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F60 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 70N (Forza: 70N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F70 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F70 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F70 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F70 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 80N (Forza: 80N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F80 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F80 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F80 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F80 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 90N (Forza: 90N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F90 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F90 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F90 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F90 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 100N (Forza: 100N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F100 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F100 (Pressione in bar)
F: F_M2_S1_D40_PS6_F100 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F100 (Posizione radiale in mm)

Scheda: 110N (Forza: 110N)

Q: Q_M2_S1_D40_PS6_F110 (Portata in l/min)
P: P_M2_S1_D40_PS6_F110 (Pressione in bar)

F: F_M2_S1_D40_PS6_F110 (Forza in N)
R: R_M2_S1_D40_PS6_F110 (Posizione radiale in mm)

COME ACCEDERE ALLE VARIABILI:

Esempio con la scheda "30N":

1. Visualizzare la portata:
Q_M2_S1_D40_PS6_F30
 2. Visualizzare la pressione:
P_M2_S1_D40_PS6_F30
 3. Visualizzare la forza:
F_M2_S1_D40_PS6_F30
 4. Visualizzare la posizione radiale:
R_M2_S1_D40_PS6_F30
 5. Fare un grafico (Forza vs Posizione Radiale):
plot(R_M2_S1_D40_PS6_F30, F_M2_S1_D40_PS6_F30)
xlabel('Posizione radiale (mm)')
ylabel('Forza (N)')
grid on
 6. Fare un grafico (Portata vs Posizione Radiale):
plot(R_M2_S1_D40_PS6_F30, Q_M2_S1_D40_PS6_F30)
xlabel('Posizione radiale (mm)')
ylabel('Portata (l/min)')
grid on
-

ANTEPRIMA: Primi 5 valori della scheda "30N"

Dati della scheda: 30N

Riga	Pos.Radiale(mm)	Forza(N)	Pressione(bar)	Portata(l/min)
1	-0.3000	31.7000	5.8400	3.2900
2	-0.2500	31.6000	5.9800	3.2950
3	-0.2000	31.5000	6.0300	3.2800
4	-0.1500	31.5000	6.0500	3.3000
5	-0.1000	31.5000	6.0600	3.2900

SALVATAGGIO DATI IN .MAT FILE

Salvataggio in corso...

Nome file: M2_S1_D40_PS6.mat

- ✓ Salvati dati scheda 30N (F30N): 107 punti
- ✓ Salvati dati scheda 40N (F40N): 98 punti
- ✓ Salvati dati scheda 50N (F50N): 93 punti
- ✓ Salvati dati scheda 60N (F60N): 95 punti
- ✓ Salvati dati scheda 70N (F70N): 94 punti
- ✓ Salvati dati scheda 80N (F80N): 90 punti
- ✓ Salvati dati scheda 90N (F90N): 88 punti

✓ Salvati dati scheda 100N (F100N): 88 punti

✓ Salvati dati scheda 110N (F110N): 84 punti

✓ File salvato con successo: M2_S1_D40_PS6.mat

COME CARICARE I DATI NELLO SCRIPT SUCCESSIVO

Nel tuo script di rielaborazione, usa:

1. Carica i dati:

```
load('M2_S1_D40_PS6.mat')
```

2. Accedi ai metadati generali:

```
materiale = dati_salvati.Materiale;  
ds_nominale_mm = dati_salvati.Diametro_nominale_mm;  
PS = dati_salvati.Pressione_nominale_bar;
```

3. Accedi ai dati di una scheda (es: F30):

```
R_30 = dati_salvati.F30.R;           % Posizione radiale  
F_30 = dati_salvati.F30.F;           % Forza  
P_30 = dati_salvati.F30.P;           % Pressione  
Q_30 = dati_salvati.F30.Q;           % Portata  
R0_reale_mm = dati_salvati.F30.R0_reale_mm; % R0 REALE (misurato) in mm  
R0_reale_m = dati_salvati.F30.R0_reale_m;  % R0 REALE (misurato) in m
```

4. Accedi a tutte le forze disponibili:

```
campi = fieldnames(dati_salvati);  
for i = 1:length(campi)  
    if startswith(campi{i}, 'F') && ~ischar(dati_salvati.(campi{i}))  
        forza = dati_salvati.(campi{i}).Forza_nominale_N;  
        R0_reale = dati_salvati.(campi{i}).R0_reale_m; % Accedi a R0_reale  
        dati = dati_salvati.(campi{i});  
        % Elabora i dati...  
    end  
end
```

C.2 SCRIPT 2: Codice caricamento variabili

```
% ISTRUZIONI DI UTILIZZO DEL CODICE
% MODIFICARE NOME FILE PARAMETRICO (riga 16) SALVATO DA SCRIPT 1
% MODIFICARE VALORE FORZA SELEZIONATA TRA QUELLE DISPONIBILI (riga 114)

clear all
close all
clc

fprintf('  SCRIPT 2: CONVERSIONI A UNITA DI MISURA SI\n');
```

SCRIPT 2: CONVERSIONI A UNITA DI MISURA SI

===== CONFIGURAZIONE =====

```
nome_file_mat = 'M2_S1_D50_PS6.mat'; % <-- MODIFICA CON IL NOME FILE PARAMETRICO
fprintf('File da caricare: %s\n\n', nome_file_mat);
```

File da caricare: M2_S1_D50_PS6.mat

===== CARICAMENTO FILE .MAT =====

```
try
    load(nome_file_mat);
    fprintf('OK - File caricato correttamente\n\n');
catch
    error('ERRORE: File non trovato: %s', nome_file_mat);
end
```

OK - File caricato correttamente

===== ESTRAZIONE PARAMETRI DAL NOME FILE =====

Nome file: M(x)_S(y)_D(z)_PS(w).mat

```
pattern = 'M(\d+)_S(\d+)_D(\d+)_PS(\d+)';
tokens = regexp(nome_file_mat, pattern, 'tokens');

if isempty(tokens)
    error('Nome file non conforme al formato M(x)_S(y)_D(z)_PS(w).mat');
end

x = str2double(tokens{1}{1}); % Materiale
y = str2double(tokens{1}{2}); % Superficie
z = str2double(tokens{1}{3}); % Diametro (centesimi di mm)
w = str2double(tokens{1}{4}); % Pressione relativa (bar)

ds_mm = z / 100; % Diametro in mm
ps_bar = w;      % Pressione relativa in bar
```

```
fprintf(' PARAMETRI DAL NOME FILE\n');

fprintf('Materiale: %s (M=%d)\n', dati_salvati.Materiale, x);
fprintf('Superficie: %s (S=%d)\n', dati_salvati.Superficie, y);
fprintf('Diametro nominale restrittore: %.2f mm (D=%d)\n', ds_mm, z);
fprintf('Pressione alimentazione: %d bar (PS=%d)\n\n', ps_bar, w);
```

```
PARAMETRI DAL NOME FILE
Materiale: Alluminio (M=2)
Superficie: Piatta (S=1)
Diametro nominale restrittore: 0.50 mm (D=50)
Pressione alimentazione: 6 bar (PS=6)
```

===== COSTANTI FISICHE STANDARD SI =====

```
fprintf(' COSTANTI FISICHE (UNITA SI)\n');

Ts = 293;           % Temperatura assoluta [K]
k = 1.4;            % Indice adiabatico aria [-]
Rg = 287.053;       % Costante dell'aria [J/(kg*K)]
mu = 1.81e-5;       % Viscosità dinamica aria [Pa*s]
pa = 101325;        % Pressione atmosferica [Pa]

% Calcoli derivati
rho = pa/(Rg*Ts);   % Densità aria [kg/m3]
cG = 60000/rho;     % Fattore conversione [l/min] -> [kg/s]

fprintf('Ts = %d K\n', Ts);
fprintf('Rg = %.3f J/(kg*K)\n', Rg);
fprintf('mu = %.2e Pa*s\n', mu);
fprintf('pa = %d Pa\n', pa);
fprintf('rho = %.4f kg/m3\n', rho);
fprintf('cG = %.2f\n\n', cG);
```

```
COSTANTI FISICHE (UNITA SI)
Ts = 293 K
Rg = 287.053 J/(kg*K)
mu = 1.81e-05 Pa*s
pa = 101325 Pa
rho = 1.2047 kg/m3
cG = 49804.01
```

===== LISTE FORZE DISPONIBILI =====

```
fprintf(' FORZE DISPONIBILI NEL FILE\n');

campi = fieldnames(dati_salvati);
forze_disponibili = {};
forze_num = [];

for i = 1:length(campi)
    campo = campi{i};
    if startswith(campo, 'F') && isstruct(dati_salvati.(campo))
        forza_nom = dati_salvati.(campo).Forza_nominale_N;
```

```

        forze_disponibili{end+1} = campo;
        forze_num = [forze_num, forza_nom];
    end
end

[~, idx_sort] = sort(forze_num);
forze_disponibili = forze_disponibili(idx_sort);

fprintf('Forze disponibili:\n');
for i = 1:length(forze_disponibili)
    campo = forze_disponibili{i};
    forza_nom = dati_salvati(campo).Forza_nominale_N;
    fprintf(' %d. %s (F=%dN)\n', i, campo, forza_nom);
end
fprintf('\n');

```

```

FORZE DISPONIBILI NEL FILE
Forze disponibili:
1. F30 (F=30N)
2. F40 (F=40N)
3. F50 (F=50N)
4. F60 (F=60N)
5. F70 (F=70N)
6. F80 (F=80N)
7. F90 (F=90N)
8. F100 (F=100N)
9. F110 (F=110N)

```

===== SELEZIONE FORZA =====

```

fprintf(' SELEZIONA UNA FORZA (decommentare una riga)\n');

% DECOMMENTARE UNA SOLA RIGA:
nome_forza = 'F80';    % <-- MODIFICARE QUESTA RIGA
% nome_forza = 'F30';
% nome_forza = 'F40';
% nome_forza = 'F50';
% nome_forza = 'F60';
% nome_forza = 'F70';
% nome_forza = 'F80';
% nome_forza = 'F100';
% nome_forza = 'F110';

fprintf('OK - Forza selezionata: %s\n\n', nome_forza);

```

```

SELEZIONA UNA FORZA (decommentare una riga)
OK - Forza selezionata: F80

```

===== CARICAMENTO DATI DELLA FORZA SELEZIONATA =====

```

if ~isfield(dati_salvati, nome_forza)
    error('ERRORE: La forza %s non esiste nel file %s', nome_forza, nome_file_mat);
end

```

```

dati_forza = dati_salvati.(nome_forza);

% Estrai i dati GREZZI (unità originali)
r1_mm = dati_forza.R;           % Posizione radiale [mm]
p1_bar_rel = dati_forza.P;       % Pressione relativa [bar] <-- IMPORTANTE!
Q_lmin = dati_forza.Q;           % Portata volumetrica [l/min]
F1_N = dati_forza.F;             % Forza [N]

fprintf(' DATI CARICATI (UNITA ORIGINALI)\n');

fprintf('Dati grezzi dal file:\n');
fprintf('  r1_mm: %d valori in mm\n', length(r1_mm));
fprintf('  p1_bar_rel: %d valori in bar (RELATIVA)\n', length(p1_bar_rel));
fprintf('  Q_lmin: %d valori in l/min\n', length(Q_lmin));
fprintf('  F1_N: %d valori in N\n\n', length(F1_N));

fprintf('Intervalli:\n');
fprintf('  r1_mm: %.2f - %.2f mm\n', min(r1_mm), max(r1_mm));
fprintf('  p1_bar_rel: %.2f - %.2f bar\n', min(p1_bar_rel), max(p1_bar_rel));
fprintf('  Q_lmin: %.2f - %.2f l/min\n', min(Q_lmin), max(Q_lmin));
fprintf('  F1_N: %.2f - %.2f N\n\n', min(F1_N), max(F1_N));

```

```

    DATI CARICATI (UNITA ORIGINALI)
Dati grezzi dal file:
  r1_mm: 85 valori in mm
  p1_bar_rel: 85 valori in bar (RELATIVA)
  Q_lmin: 85 valori in l/min
  F1_N: 85 valori in N

```

```

Intervalli:
  r1_mm: -0.17 - 20.53 mm
  p1_bar_rel: 0.00 - 6.04 bar
  Q_lmin: 2.32 - 2.59 l/min
  F1_N: 79.30 - 86.20 N

```

===== CONVERSIONI A SI =====

```

fprintf(' CONVERSIONI A UNITA DI MISURA SI\n');

% --- CONVERSIONE 1: Posizione radiale ---
r1 = r1_mm * 1e-3; % mm --> m
fprintf('CONVERSIONE 1: Posizione radiale\n');
fprintf(' Formula: r1 [m] = r1_mm [mm] x 10^-3\n');
fprintf(' Esempio: %.2f mm --> %.6e m\n', r1_mm(1), r1(1));
fprintf(' Variabile: r1 [m]\n\n');

% --- CONVERSIONE 2: Pressione relativa --> assoluta ---
p1 = p1_bar_rel * 1e5 + pa; % bar (relativa) --> Pa (assoluta)
fprintf('CONVERSIONE 2: Pressione relativa --> assoluta\n');
fprintf(' Formula: p1 [Pa] = p1_bar_rel [bar] x 10^5 + pa [Pa]\n');
fprintf(' Esempio: %.2f bar --> %.2e Pa (assoluta)\n', p1_bar_rel(1), p1(1));
fprintf(' pa (pressione atmosferica) = %d Pa\n', pa);
fprintf(' Variabile: p1 [Pa]\n\n');

% --- CONVERSIONE 3: Portata volumetrica --> massica ---
G1 = Q_lmin * (1/(60*1000)) * rho; % l/min --> kg/s

```

```

fprintf('CONVERSIONE 3: Portata volumetrica --> massica\n');
fprintf(' Formula: G1 [kg/s] = Q_lmin [l/min] x (1/(60x1000)) x rho [kg/m3]\n');
fprintf(' Esempio: %.2f l/min --> %.6e kg/s\n', Q_lmin(1), G1(1));
fprintf(' Fattore conversione: cG = %.2f\n', cG);
fprintf(' variabile: G1 [kg/s]\n\n');

% --- CONVERSIONE 4: Forza (già in SI) ---
F1 = F1_N; % N --> N (no conversione)
fprintf('CONVERSIONE 4: Forza (gia in SI)\n');
fprintf(' Formula: F1 [N] = F1_N [N] (nessuna conversione)\n');
fprintf(' variabile: F1 [N]\n\n');

% --- CONVERSIONE 5: Parametri file ---
ds = ds_mm * 1e-3; % mm --> m
ps = ps_bar * 1e5; % bar --> Pa (pressione relativa)

fprintf('CONVERSIONE 5: Parametri file\n');
fprintf(' ds: %.2f mm --> %.6e m\n', ds_mm, ds);
fprintf(' ps: %d bar --> %.2e Pa (relativa)\n', ps_bar, ps);
fprintf(' variabili: ds [m], ps [Pa]\n\n');

% --- CONVERSIONE 6: R0_reale (raggio restrittore reale misurato) ---
% Carica R0_reale dal primo campo F disponibile in dati_salvati
try
    campi = fieldnames(dati_salvati);
    campi_F = campi(startswith(campi, 'F'));

    if ~isempty(campi_F) && isfield(dati_salvati.(campi_F{1}), 'R0_reale_m')
        R0_reale = dati_salvati.(campi_F{1}).R0_reale_m; % [m]
        R0_reale_mm = dati_salvati.(campi_F{1}).R0_reale_mm; % [mm]
        fprintf('CONVERSIONE 6: R0_reale (raggio restrittore - REALE misurato)\n');
        fprintf(' R0_reale: %.4f mm --> %.6e m (REALE da K18)\n', R0_reale_mm, R0_reale);
        fprintf(' variabile: R0_reale [m]\n\n');
    else
        % Fallback: usa ds nominale se R0_reale non disponibile
        R0_reale = ds / 2; % [m] - Raggio nominale
        R0_reale_mm = ds_mm / 2; % [mm]
        fprintf('CONVERSIONE 6: R0_reale (raggio restrittore - NOMINALE fallback)\n');
        fprintf(' R0_reale: %.4f mm --> %.6e m (NOMINALE ds/2)\n', R0_reale_mm, R0_reale);
        fprintf(' variabile: R0_reale [m]\n\n');
    end
catch
    % Fallback: usa ds nominale se errore
    R0_reale = ds / 2; % [m]
    R0_reale_mm = ds_mm / 2; % [mm]
    fprintf('CONVERSIONE 6: R0_reale (raggio restrittore - NOMINALE fallback per errore)\n');
    fprintf(' R0_reale: %.4f mm --> %.6e m (NOMINALE ds/2)\n', R0_reale_mm, R0_reale);
    fprintf(' variabile: R0_reale [m]\n\n');
end

```

```

CONVERSIONI A UNITA DI MISURA SI
CONVERSIONE 1: Posizione radiale
Formula: r1 [m] = r1_mm [mm] x 10^-3
Esempio: -0.17 mm --> -1.750000e-04 m
Variabile: r1 [m]

CONVERSIONE 2: Pressione relativa --> assoluta
Formula: p1 [Pa] = p1_bar_rel [bar] x 10^5 + pa [Pa]
Esempio: 6.02 bar --> 7.03e+05 Pa (assoluta)

```

pa (pressione atmosferica) = 101325 Pa
Variabile: p1 [Pa]

CONVERSIONE 3: Portata volumetrica --> massica
Formula: $G1 \text{ [kg/s]} = Q_{lmin} \text{ [l/min]} \times (1/(60 \times 1000)) \times \rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Esempio: 2.37 l/min --> 4.758653e-05 kg/s
Fattore conversione: cG = 49804.01
Variabile: G1 [kg/s]

CONVERSIONE 4: Forza (gia in SI)
Formula: $F1 \text{ [N]} = F1_N \text{ [N]}$ (nessuna conversione)
Variabile: F1 [N]

CONVERSIONE 5: Parametri file
ds: 0.50 mm --> 5.000000e-04 m
ps: 6 bar --> 6.00e+05 Pa (relativa)
Variabili: ds [m], ps [Pa]

CONVERSIONE 6: R0_reale (raggio restrittore - REALE misurato)
R0_reale: 0.2490 mm --> 2.490000e-04 m (REALE da K18)
Variabile: R0_reale [m]

===== VERIFICA CONVERSIONI =====

```
fprintf(' VERIFICA CONVERSIONI\n');

fprintf('Dati convertiti (UNITA SI):\n');
fprintf(' r1: %d valori in m\n', length(r1));
fprintf(' p1: %d valori in Pa\n', length(p1));
fprintf(' G1: %d valori in kg/s\n', length(G1));
fprintf(' F1: %d valori in N\n');
fprintf(' ds: diametro restrittore nominale = %.6e m\n', ds);
fprintf(' R0_reale: raggio restrittore REALE misurato = %.6e m\n\n', R0_reale);

fprintf('Intervalli (SI):\n');
fprintf(' r1: %.6e - %.6e m\n', min(r1), max(r1));
fprintf(' p1: %.2e - %.2e Pa\n', min(p1), max(p1));
fprintf(' G1: %.6e - %.6e kg/s\n', min(G1), max(G1));
fprintf(' F1: %.2f - %.2f N\n\n', min(F1), max(F1));
```

VERIFICA CONVERSIONI
Dati convertiti (UNITA SI):
r1: 85 valori in m
p1: 85 valori in Pa
G1: 85 valori in kg/s
F1: ds: diametro restrittore nominale = 5.000000e-04 m
R0_reale: raggio restrittore REALE misurato = 2.490000e-04 m

Intervalli (SI):
r1: -1.750000e-04 - 2.052500e-02 m
p1: 1.01e+05 - 7.05e+05 Pa
G1: 4.658259e-05 - 5.200384e-05 kg/s
F1: 79.30 - 86.20 N

===== ANTEPRIMA DATI CONVERTITI =====

```
fprintf(' ANTEPRIMA DATI CONVERTITI (SI)\n');

fprintf('Primi 5 valori:\n');
fprintf('-----\n');
fprintf('Riga | r1(m)          | p1(Pa)          | G1(kg/s)        | F1(N)\n');
fprintf('-----+-----+-----+-----\n');
for i = 1:min(5, length(r1))
    fprintf('%3d | %11.6e | %11.2e | %11.6e | %11.4f\n', i, r1(i), p1(i), G1(i), F1(i));
end
fprintf('\n');
```

```
ANTEPRIMA DATI CONVERTITI (SI)
Primi 5 valori:
-----
Riga | r1(m)          | p1(Pa)          | G1(kg/s)        | F1(N)
-----+-----+-----+-----
1 | -1.750000e-04 | 7.03e+05 | 4.758653e-05 | 82.8000
2 | -1.250000e-04 | 7.05e+05 | 4.738574e-05 | 82.6000
3 | -7.500000e-05 | 7.05e+05 | 4.778731e-05 | 82.9000
4 | -2.500000e-05 | 7.05e+05 | 4.818889e-05 | 83.1000
5 | 2.500000e-05 | 7.05e+05 | 4.818889e-05 | 83.3000
```

===== RIEPILOGO VARIABILI PRONTE =====

```
fprintf(' VARIABILI PRONTE PER LO SCRIPT 3\n');

fprintf('Nel workspace sono disponibili (tutte in SI):\n\n');

fprintf('DATI MISURATI:\n');
fprintf(' r1 [m] = posizione radiale\n');
fprintf(' p1 [Pa] = pressione misurata (assoluta)\n');
fprintf(' G1 [kg/s] = portata massica\n');
fprintf(' F1 [N] = forza misurata\n\n');

fprintf('COSTANTI FISICHE:\n');
fprintf(' Ts [K] = temperatura\n');
fprintf(' Rg [J/(kg*K)] = costante aria\n');
fprintf(' mu [Pa*s] = viscosita dinamica\n');
fprintf(' pa [Pa] = pressione atmosferica\n');
fprintf(' R [m] = raggio pattino\n');
fprintf(' rho [kg/m3] = densita aria\n');
fprintf(' k [-] = indice adiabatico\n\n');

fprintf('PARAMETRI FILE:\n');
fprintf(' ds [m] = diametro restrittore (NOMINALE)\n');
fprintf(' RO_reale [m] = raggio restrittore (REALE misurato da K18)\n');
fprintf(' ps [Pa] = pressione alimentazione (relativa)\n');
fprintf(' cG [-] = fattore conversione l/min --> kg/s\n\n');
```

```
VARIABILI PRONTE PER LO SCRIPT 3
Nel workspace sono disponibili (tutte in SI):
```

```
DATI MISURATI:
r1 [m] = posizione radiale
```

p1 [Pa] = pressione misurata (assoluta)
G1 [kg/s] = portata massica
F1 [N] = forza misurata

COSTANTI FISICHE:

Ts [K] = temperatura
Rg [J/(kg*K)] = costante aria
mu [Pa*s] = viscosita dinamica
pa [Pa] = pressione atmosferica
R [m] = raggio pattino
rho [kg/m3] = densita aria
k [-] = indice adiabatico

PARAMETRI FILE:

ds [m] = diametro restrittore (NOMINALE)
R0_reale [m] = raggio restrittore (REALE misurato da K18)
ps [Pa] = pressione alimentazione (relativa)
cG [-] = fattore conversione l/min --> kg/s

C.3 SCRIPT 3: Codice elaborazione dati

STEP 1: selezione della zona viscosa (3-16 mm)

STEP 2: $G_{medio_sperimentale}$ (portata media)

STEP 3: $F_{medio_sperimentale}$ (forza media)

STEP 4: h_{num} punto per punto (usando G_{medio} nella formula)

STEP 5: h_{medio_num} (media degli h_{num})

STEP 6: p_0 da $F_{medio_sperim}=F_{num}$ (con regola falsi)

STEP 7: interpolazione $p(r)$ con p_0 calcolato

STEP 8: calcolo G_{th} e C_d STEP 9: calcolo Re e Ma

STEP 9: CALCOLO REYNOLDS E MACH

```
close all
clc

fprintf('=====\\n');
fprintf('  SCRIPT 3: ELABORAZIONE DATI\\n');
fprintf('=====\\n\\n');
```

```
=====
  SCRIPT 3: ELABORAZIONE DATI
=====
```

===== VERIFICA DATI CARICATI =====

```
if ~exist('r1', 'var') || ~exist('p1', 'var') || ~exist('G1', 'var') || ~exist('F1', 'var')
    error('ERRORE: Dati non caricati!\\nEsegui prima: SCRIPT_2_conversioni_a_SI_FIXED.m');
end

fprintf('OK - Dati caricati correttamente (tutte unita SI)\\n');
fprintf('  r1 [m] = posizione radiale\\n');
fprintf('  p1 [Pa] = pressione misurata (assoluta)\\n');
fprintf('  G1 [kg/s] = portata massica\\n');
fprintf('  F1 [N] = forza misurata\\n\\n');
```

```
OK - Dati caricati correttamente (tutte unita SI)
  r1 [m] = posizione radiale
  p1 [Pa] = pressione misurata (assoluta)
  G1 [kg/s] = portata massica
  F1 [N] = forza misurata
```

===== VERIFICA R0_REALE =====

```
if ~exist('R0_reale', 'var')
    error('ERRORE: R0_reale non caricato!\nEsegui prima: SCRIPT_2_conversioni_a_SI_FIXED.m');
end

fprintf('OK - R0_reale caricato dal SCRIPT 2\n');
fprintf(' R0_reale [m] = raggio restrittore REALE misurato\n');
fprintf(' R0 reale = %.6e[m] = %.4f[mm]\n\n', R0_reale, R0_reale*1e3);
```

```
OK - R0_reale caricato dal SCRIPT 2
R0_reale [m] = raggio restrittore REALE misurato
R0 reale = 2.490000e-04[m] = 0.2490[mm]
```

===== COSTANTI FISICHE (già disponibili nello SCRIPT 2) =====

```
fprintf('===== \n');
fprintf('  COSTANTI FISICHE DISPONIBILI \n');
fprintf('===== \n\n');

% Se non disponibili, ridefiniscile
if ~exist('Ts', 'var')
    Ts = 293;
    Rg = 287.053;
    k = 1.4;
    mu = 1.81e-5;
    pa = 101325;
    rho = pa/(Rg*Ts);
    fprintf('Costanti ridefinite (non trovate dal SCRIPT 2)\n\n');
else
    fprintf('Costanti caricate dal SCRIPT 2\n\n');
end

R = 20e-3; % raggio esterno cuscinetto (=20 mm)

fprintf(' Ts = %d K\n', Ts);
fprintf(' Rg = %.3f J/(kg*K)\n', Rg);
fprintf(' k = %.1f\n', k);
fprintf(' mu = %.2e Pa*s\n', mu);
fprintf(' pa = %d Pa\n', pa);
fprintf(' R = %.3e m\n', R);
fprintf(' rho = %.6f kg/m3\n\n', rho);

% pressione di alimentazione
ps = ps + pa; % Assoluta in Pa
ps_bar = ps / 1e5; % Assoluta in bar
ps_rel = ps - pa; % Relativa in Pa
ps_rel_bar = ps_rel / 1e5; % Relativa in bar

fprintf('Pressione alimentazione:\n');
fprintf(' ps assoluta [Pa] = %.6e\n', ps);
fprintf(' ps assoluta [bar] = %.4f\n', ps_bar);
fprintf(' ps relativa [Pa] = %.6e\n', ps_rel);
fprintf(' ps relativa [bar] = %.4f\n\n', ps_rel_bar);
```

=====

COSTANTI FISICHE DISPONIBILI

=====

Costanti caricate dal SCRIPT 2

Ts = 293 K
 Rg = 287.053 J/(kg*K)
 k = 1.4
 mu = 1.81e-05 Pa*s
 pa = 101325 Pa
 R = 2.000e-02 m
 rho = 1.204722 kg/m3

Pressione alimentazione:

ps assoluta [Pa] = 7.026500e+05
 ps assoluta [bar] = 7.0265
 ps relativa [Pa] = 6.013250e+05
 ps relativa [bar] = 6.0133

===== STEP 1: SELEZIONE ZONA VISCOSA =====

```
fprintf('=====\\n');
fprintf(' STEP 1: SELEZIONE ZONA VISCOSA\\n');
fprintf('=====\\n\\n');

% Limiti zona viscosa in mm
raggio_est_mm = 16; % Raggio esterno [mm]
raggio_int_mm = 3; % Raggio interno [mm]

fprintf('Intervallo zona viscosa:\\n');
fprintf(' Raggio esterno: %.1f mm\\n', raggio_est_mm);
fprintf(' Raggio interno: %.1f mm\\n\\n', raggio_int_mm);

% Converti limiti a m per il confronto
raggio_est_m = raggio_est_mm * 1e-3;
raggio_int_m = raggio_int_mm * 1e-3;

% Seleziona punti nella zona viscosa
idx_visc = (r1 >= raggio_int_m) & (r1 <= raggio_est_m);

r1_visc = r1(idx_visc);
p1_visc = p1(idx_visc);
G1_visc = G1(idx_visc);
F1_visc = F1(idx_visc);

fprintf('Punti selezionati nella zona viscosa:\\n');
fprintf(' Numero punti totali: %d\\n', length(r1));
fprintf(' Numero punti in zona viscosa: %d\\n\\n', length(r1_visc));

fprintf('Intervalli nella zona viscosa:\\n');
fprintf(' r1_visc: %.4e - %.4e m (%.2f - %.2f mm)\\n', min(r1_visc), max(r1_visc),
min(r1_visc)*1e3, max(r1_visc)*1e3);
fprintf(' p1_visc: %.2e - %.2e Pa\\n', min(p1_visc), max(p1_visc));
fprintf(' G1_visc: %.6e - %.6e kg/s\\n', min(G1_visc), max(G1_visc));
fprintf(' F1_visc: %.4f - %.4f N\\n\\n', min(F1_visc), max(F1_visc));
```

```
=====
STEP 1: SELEZIONE ZONA VISCOSA
=====
```

Intervallo zona viscosa:

Raggio esterno: 16.0 mm

Raggio interno: 3.0 mm

Punti selezionati nella zona viscosa:

Numero punti totali: 91

Numero punti in zona viscosa: 26

Intervalli nella zona viscosa:

r1_visc: 3.0750e-03 - 1.5575e-02 m (3.07 - 15.58 mm)

p1_visc: 1.46e+05 - 3.23e+05 Pa

G1_visc: 3.433458e-05 - 3.553930e-05 kg/s

F1_visc: 91.8000 - 93.4000 N

```
===== STEP 2: G_MEDIO_SPERIMENTALE (ZONA VISCOSA)
=====
```

```
fprintf('=====\n');
fprintf(' STEP 2: G_MEDIO_SPERIMENTALE (ZONA VISCOSA)\n');
fprintf('=====\n\n');

G_medio_sperimentale = mean(G1_visc);

fprintf('Intervallo G1_visc:\n');
fprintf(' G_min = %.6e kg/s\n', min(G1_visc));
fprintf(' G_max = %.6e kg/s\n', max(G1_visc));
fprintf(' Numero valori: %d\n', length(G1_visc));
fprintf(' G_medio = %.6e kg/s\n\n', G_medio_sperimentale);
```

```
=====
STEP 2: G_MEDIO_SPERIMENTALE (ZONA VISCOSA)
=====
```

Intervallo G1_visc:

G_min = 3.433458e-05 kg/s

G_max = 3.553930e-05 kg/s

Numero valori: 26

G_medio = 3.499872e-05 kg/s

```
===== STEP 3: F_MEDIO_SPERIMENTALE (ZONA VISCOSA)
=====
```

```
fprintf('=====\n');
fprintf(' STEP 3: F_MEDIO_SPERIMENTALE (ZONA VISCOSA)\n');
fprintf('=====\n\n');

F_medio_sperimentale = mean(F1_visc);

fprintf('Intervallo F1_visc:\n');
fprintf(' F_min = %.4f N\n', min(F1_visc));
```

```
fprintf(' F_max = %.4f N\n', max(F1_visc));
fprintf(' Numero valori: %d\n', length(F1_visc));
fprintf(' F_medio = %.4f N\n\n', F_medio_sperimentale);
```

```
=====
STEP 3: F_MEDIO_SPERIMENTALE (ZONA VISCOSA)
=====
```

```
Intervallo F1_visc:
F_min = 91.8000 N
F_max = 93.4000 N
Numero valori: 26
F_medio = 92.6638 N
```

```
===== STEP 4: h_num PUNTO PER PUNTO =====
```

```
fprintf('===== \n');
fprintf(' STEP 4: h_num PUNTO PER PUNTO\n');
fprintf('===== \n\n');

fprintf('Formula utilizzata:\n');
fprintf(' h_num(i) = (12*mu*Rg*Ts*ln(R/r_i)*G_medio_sperimentale / (pi*(p_i^2 -
pa^2)))^(1/3)\n\n');

fprintf(' Utilizzo: G_MEDIO_SPERIMENTALE nella formula\n');
fprintf(' G_medio = %.6e kg/s\n\n', G_medio_sperimentale);

fprintf('Unita di misura:\n');
fprintf(' mu = %.2e Pa*s\n', mu);
fprintf(' Rg = %.3f J/(kg*K)\n', Rg);
fprintf(' Ts = %d K\n', Ts);
fprintf(' R = %.3e m\n', R);
fprintf(' G_medio = %.6e kg/s\n', G_medio_sperimentale);
fprintf(' p_i [Pa], pa = %d Pa\n', pa);
fprintf(' r_i [m]\n\n');

% Calcolo h_num nella zona viscosa
h_num = (12*mu*Rg*Ts*log(R./r1_visc).*G_medio_sperimentale./(pi*(p1_visc.^2-pa^2))).^(1/3);

fprintf('Risultati h_num (solo zona viscosa):\n');
fprintf(' Numero punti calcolati: %d\n', length(h_num));
fprintf(' h_num min: %.4e m = %.4f micrometri\n', min(h_num), min(h_num)*1e6);
fprintf(' h_num max: %.4e m = %.4f micrometri\n\n', max(h_num), max(h_num)*1e6);
```

```
=====
STEP 4: h_num PUNTO PER PUNTO
=====
```

```
Formula utilizzata:
h_num(i) = (12*mu*Rg*Ts*ln(R/r_i)*G_medio_sperimentale / (pi*(p_i^2 - pa^2)))^(1/3)

Utilizzo: G_MEDIO_SPERIMENTALE nella formula
G_medio = 3.499872e-05 kg/s
```

```
Unita di misura:
mu = 1.81e-05 Pa*s
Rg = 287.053 J/(kg*K)
```

```

Ts = 293 K
R = 2.000e-02 m
G_medio = 3.499872e-05 kg/s
p_i [Pa], pa = 101325 Pa
r_i [m]

```

```

Risultati h_num (solo zona viscosa):
Numero punti calcolati: 26
h_num min: 1.5893e-05 m = 15.8934 micrometri
h_num max: 1.6591e-05 m = 16.5907 micrometri

```

===== STEP 5: h_MEDIO_NUM =====

```

fprintf('=====\\n');
fprintf(' STEP 5: h_MEDIO_NUM\\n');
fprintf('=====\\n\\n');

h_medio_num = mean(h_num);

fprintf('Calcolo h_num_medio:\\n');
fprintf(' Numero valori: %d\\n', length(h_num));
fprintf(' h_medio = %.4e m = %.4f micrometri\\n\\n', h_medio_num, h_medio_num*1e6);

```

```

=====
STEP 5: h_MEDIO_NUM
=====

```

```

Calcolo h_num_medio:
Numero valori: 26
h_medio = 1.6155e-05 m = 16.1545 micrometri

```

===== STEP 6: CALCOLO p0 DA F CON REGULA FALSI =====

```

fprintf('=====\\n');
fprintf(' STEP 6: CALCOLO p0 DA F CON REGULA FALSI\\n');
fprintf('=====\\n\\n');

fprintf('Equazione da risolvere per trovare p0 con regola falsi:\\n');
fprintf(' F_medio_sperimentale = F_num(p0)\\n');
fprintf(' F_num(p0) = p0*pi*R0^2*sqrt(pi*A/8)*exp(2/A)*[erf(sqrt(2/A)) - erf(sqrt(2/A)*sqrt(pa/p0))]\\n\\n');

% Parametro R0 (raggio del restrittore REALE MISURATO - caricato da SCRIPT 2)
R0 = R0_reale; % Usa il RAGGIO REALE misurato (non il nominale)

fprintf('Parametri:\\n');
fprintf(' R = raggio pattino = %.3e m\\n', R);
fprintf(' R0 = raggio reale restrittore = %.6e m\\n', R0);
fprintf(' pa = pressione atmosferica assoluta = %d Pa\\n', pa);
fprintf(' F_target = F_medio_sperimentale = %.4f N\\n\\n', F_medio_sperimentale);

% Da risolvere: F_num(p0) - F_target = 0
function_F = @(p0) calc_F_residual(p0, R, R0, pa, F_medio_sperimentale);

% Parametri Regula Falsi

```

```

p0_min = pa + 1e3;      % Limite inferiore (appena sopra pressione atmosferica)
p0_max = ps;           % Limite superiore (pressione alimentazione + atmosferica)
tolleranza = 1e-6;     % Tolleranza risultato [Pa]
max_iter = 5000;       % Numero massimo iterazioni

fprintf('Parametri Regula Falsi:\n');
fprintf(' p0_min = %.2e Pa\n', p0_min);
fprintf(' p0_max = %.2e Pa\n', p0_max);
fprintf(' Tolleranza = %.2e Pa\n', tolleranza);
fprintf(' Max iterazioni = %d\n\n', max_iter);

% Verifica che la funzione cambi segno agli estremi
f_min = function_F(p0_min);
f_max = function_F(p0_max);

fprintf('Verifica cambio di segno:\n');
fprintf(' f(p0_min) = %.6e\n', f_min);
fprintf(' f(p0_max) = %.6e\n', f_max);

if f_min * f_max > 0
    error('ERRORE: La funzione non cambia segno negli estremi!\nImpossibile applicare Regula Falsi');
end
fprintf(' OK - La funzione cambia segno\n\n');

% ===== REGULA FALSI =====
iter = 0;
p0_a = p0_min;
p0_b = p0_max;
f_a = f_min;
f_b = f_max;

fprintf('Iterazioni Regula Falsi (fine iterazioni quando Errore > Tolleranza):\n');
fprintf('-----\n');
fprintf('Iter | p0_new (Pa) | f(p0_new) | Errore\n');
fprintf('----+-----+-----+-----\n');

while iter < max_iter
    iter = iter + 1;

    % Calcolo nuovo p0 con formula Regula Falsi
    p0_new = p0_a - f_a * (p0_b - p0_a) / (f_b - f_a);
    f_new = function_F(p0_new);

    % Errore assoluto
    errore = abs(f_new);

    if mod(iter, 10) == 1 || iter <= 5 || errore < tolleranza
        fprintf('%4d | %.6e | %.6e | %.2e\n', iter, p0_new, f_new, errore);
    end

    % Controllo convergenza
    if errore < tolleranza
        fprintf('CONVERGENZA RAGGIUNTA\n');
        break;
    end

    % Aggiorna intervallo
    if f_new * f_a < 0
        p0_b = p0_new;
    end
end

```

```

        f_b = f_new;
    else
        p0_a = p0_new;
        f_a = f_new;
    end
end

fprintf('\n');

if iter >= max_iter
    fprintf('ATTENZIONE: Raggiunto numero massimo iterazioni (%d)\n\n', max_iter);
end

% Assegna il risultato della Regula Falsi
p0_num = p0_new;

fprintf('Risultato Regula Falsi:\n');
fprintf('===== \n\n');

fprintf('p0 (pressione ingresso gap) trovata:\n');
fprintf(' p0 assoluta = %.6e Pa\n', p0_num);
fprintf(' p0 assoluta = %.4f bar\n', p0_num/1e5);
fprintf(' p0 relativa = %.6e Pa\n', p0_num - pa);
fprintf(' p0 relativa = %.4f bar\n', (p0_num - pa)/1e5);
fprintf(' Iterazioni: %d\n', iter);
fprintf(' Errore finale: %.6e Pa\n\n', errore);

```

```

=====
STEP 6: CALCOLO p0 DA F CON REGULA FALSI
=====

```

Equazione da risolvere per trovare p0 con regola falsi:

$F_{\text{medio_sperimentale}} = F_{\text{num}}(p0)$

$F_{\text{num}}(p0) = p0 \cdot \pi \cdot R0^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A/8} \cdot \exp(2/A) \cdot [\text{erf}(\sqrt{2/A}) - \text{erf}(\sqrt{2/A} \cdot \sqrt{pa/p0})]$

Parametri:

R = raggio pattino = 2.000e-02 m

R0 = raggio reale restrittore = 2.490000e-04 m

pa = pressione atmosferica assoluta = 101325 Pa

F_target = F_medio_sperimentale = 92.6638 N

Parametri Regula Falsi:

p0_min = 1.02e+05 Pa

p0_max = 7.03e+05 Pa

Tolleranza = 1.00e-06 Pa

Max iterazioni = 5000

===== STEP 7: INTERPOLAZIONE PRESSIONE CON p0 =====

```

fprintf('===== \n');
fprintf(' STEP 7: INTERPOLAZIONE PRESSIONE CON p0\n');
fprintf('===== \n\n');

fprintf('Formula di interpolazione p(r) con p0:\n');
fprintf(' p_interp(r) = p0 * sqrt[1 - (1 - (pa/p0)^2) * ln(r/R0)/ln(R/R0)]\n\n');

% Crea vettore r da R0 a R

```

```

r_interp = linspace(R0, R, 500);

% Calcola p_interpolata per ogni r
p_interp = p0_num * sqrt(1 - (1 - (pa/p0_num)^2) * log(r_interp/R0) / log(R/R0));

fprintf('Verifica condizioni al contorno:\n\n');
fprintf(' Quando r = R0 (raggio restrittore):\n');
p_at_R0 = p0_num * sqrt(1 - (1 - (pa/p0_num)^2) * log(R0/R0) / log(R/R0));
fprintf(' p(R0) = %.6e Pa = %.4f bar\n', p_at_R0, p_at_R0/1e5);
fprintf(' Atteso: p0 = %.6e Pa = %.4f bar\n', p0_num, p0_num/1e5);
fprintf(' Differenza: %.6e Pa\n', abs(p_at_R0 - p0_num));

fprintf(' Quando r = R (raggio cuscinetto):\n');
p_at_R = p0_num * sqrt(1 - (1 - (pa/p0_num)^2) * log(R/R0) / log(R/R0));
fprintf(' p(R) = %.6e Pa = %.4f bar\n', p_at_R, p_at_R/1e5);
fprintf(' Atteso: pa = %d Pa = %.4f bar\n', pa, pa/1e5);
fprintf(' Differenza: %.6e Pa\n\n', abs(p_at_R - pa));

```

=====

STEP 7: INTERPOLAZIONE PRESSIONE CON p0

=====

Formula di interpolazione $p(r)$ con p_0 :

$$p_{\text{interp}}(r) = p_0 * \sqrt{1 - (1 - (p_a/p_0)^2) * \ln(r/R_0)/\ln(R/R_0)}$$

Verifica condizioni al contorno:

```

Quando r = R0 (raggio restrittore):
p(R0) = 4.658416e+05 Pa = 4.6584 bar
Atteso: p0 = 4.658416e+05 Pa = 4.6584 bar
Differenza: 0.000000e+00 Pa
Quando r = R (raggio cuscinetto):
p(R) = 1.013250e+05 Pa = 1.0133 bar
Atteso: pa = 101325 Pa = 1.0132 bar
Differenza: 1.018634e-10 Pa

```

===== STEP 8: CALCOLO Gth E Cd =====

```

fprintf('===== \n');
fprintf(' STEP 8: CALCOLO PORTATA TEORICA E Cd \n');
fprintf('===== \n\n');

% PARAMETRI GEOMETRICI
fprintf('1) PARAMETRI GEOMETRICI: \n');

% Diametro del restrittore
d_restr = 2 * R0; % [m]

% Area della sezione circolare del restrittore
Ac = pi * R0^2;
fprintf(' Ac (area sezione circolare) = pi*R0^2 \n');
fprintf(' Ac = %.6e m2 \n\n', Ac);

% Area annulare intorno al restrittore
Aa = pi * d_restr * h_medio_num;
fprintf(' Aa (area annulare) = pi*d*h_medio_num \n');
fprintf(' Aa = %.6e m2 \n\n', Aa);

```

```

% Rapporto aree
delta = Ac / Aa;
fprintf(' delta (rapporto aree) = Ac/Aa\n');
fprintf(' delta = %.6f\n\n', delta);

% Area equivalente
Aeqv = Ac / sqrt(1 + delta^2);
fprintf(' Aeqv (area equivalente) = Ac / sqrt(1 + delta^2)\n');
fprintf(' Aeqv = %.6e m2\n\n', Aeqv);

% PARAMETRI AERODINAMICI
fprintf('2) PARAMETRI AERODINAMICI:\n');

% rho (densita locale all orifizio)
Tamb = 293; %Tempertura ambiente in K
rho_locale = p0_num / (Rg * Tamb);
fprintf(' rho_locale = p0_num/(R*Tamb) \n');
fprintf(' rho locale = %.6f kg/m3\n\n', rho_locale);

% kt (fattore di temperatura)
Tamb = 293; %Tempertura ambiente in K
kt = sqrt(Ts / Tamb); % Per questo caso Tamb = Ts = 293 K
fprintf(' kt = sqrt(Ts/Tamb) \n');
fprintf(' kt = %.6f\n\n', kt);

% bcr (rapporto di pressione critica per flusso sonico)
bcr = (2/(k+1))^(k/(k-1));
fprintf(' bcr (rapporto pressione critica) = (2/(k+1))^(k/(k-1))\n');
fprintf(' bcr = %.6f\n\n', bcr);

% b (rapporto pressione attuale)
b = p0_num / ps;
fprintf(' b (rapporto pressione attuale) = p0/ps\n');
fprintf(' b = %.6e / %.6e\n', p0_num, ps);
fprintf(' b = %.6f\n\n', b);

% DETERMINAZIONE CASO SONICO O SUBSONICO
fprintf('3) DETERMINAZIONE CASO:\n');
if b <= bcr
    case_type = 'SONICO';
    fprintf(' b (%.6f) <= bcr (%.6f): CASO SONICO\n\n', b, bcr);
else
    case_type = 'SUBSONICO';
    fprintf(' b (%.6f) > bcr (%.6f): CASO SUBSONICO\n\n', b, bcr);
end

% CALCOLO psi (psi) ---> uguale per sonico e subsonico
fprintf('4) CALCOLO PSI (fattore di espansione):\n\n');

psi = 0.686 / sqrt(Rg * Ts);
fprintf(' Formula: psi = 0.686 / sqrt(Rg*Ts)\n');
fprintf(' psi = 0.686 / sqrt(%.3f * %d)\n', Rg, Ts);
fprintf(' psi = %.6e [(J/(kg*K))*K]=[s/m]\n\n', psi);

% CALCOLO Gth (portata teorica)
fprintf('5) CALCOLO PORTATA TEORICA Gth:\n\n');

if b <= bcr
    % Caso sonico

```

```

fprintf(' CASO SONICO (b <= bcr):\n');
fprintf(' Formula: Gth = kt * psi * Ps * Aeqv\n\n');

Gth = kt * psi * ps * Aeqv;

fprintf(' Parametri:\n');
fprintf(' kt = %.6f\n', kt);
fprintf(' psi = %.6e s/m\n', psi);
fprintf(' Ps = %.6e Pa\n', ps);
fprintf(' Aeqv = %.6e m2\n\n', Aeqv);
fprintf(' Gth = %.6e kg/s\n\n', Gth);

else
% Caso subsonico
fprintf(' CASO SUBSONICO (b > bcr):\n');
fprintf(' Formula: Gth = kt * psi * Ps * Aeqv * sqrt[1 - (((p0/Ps) - bcr) / (1 -
bcr))^2]\n\n');

% Calcolo il termine di correzione subsonico
ratio = (b - bcr) / (1 - bcr);
correction_factor = sqrt(1 - (ratio^2));

Gth = kt * psi * ps * Aeqv * correction_factor;

fprintf(' Parametri:\n');
fprintf(' kt = %.6f\n', kt);
fprintf(' psi = %.6e s/m\n', psi);
fprintf(' Ps = %.6e Pa\n', ps);
fprintf(' Aeqv = %.6e m2\n', Aeqv);
fprintf(' b = %.6f\n', b);
fprintf(' bcr = %.6f\n', bcr);
fprintf(' Gth = %.6e kg/s\n\n', Gth);

end

% CALCOLO Cd (coefficiente di scarico)
fprintf('6) CALCOLO COEFFICIENTE DI SCARICO Cd:\n');

Cd = G_medio_sperimentale / Gth;

fprintf(' Formula: Cd = G_sperimentale / Gth\n');
fprintf(' G_sperimentale = %.6e kg/s\n', G_medio_sperimentale);
fprintf(' Gth = %.6e kg/s\n', Gth);
fprintf(' Cd = %.6f\n\n', Cd);

```

=====

STEP 8: CALCOLO PORTATA TEORICA E Cd

=====

1) PARAMETRI GEOMETRICI:

Ac (area sezione circolare) = $\pi \cdot R^2$
Ac = 1.947819e-07 m²

Aa (area annulare) = $\pi \cdot d \cdot h_{medio_num}$
Aa = 2.527396e-08 m²

delta (rapporto aree) = Ac/Aa
delta = 7.706822

```
Aeqv (area equivalente) = Ac / sqrt(1 + delta^2)
Aeqv = 2.506385e-08 m2
```

2) PARAMETRI AERODINAMICI:

```
rho_locale = p0_num/(R*Tamb)
rho_locale = 5.538709 kg/m3
```

```
kt = sqrt(Ts/Tamb)
kt = 1.000000
```

```
bcr (rapporto pressione critica) = (2/(k+1))^(k/(k-1))
bcr = 0.528282
```

```
b (rapporto pressione attuale) = p0/ps
b = 4.658416e+05 / 7.026500e+05
b = 0.662978
```

3) DETERMINAZIONE CASO:

```
b (0.662978) > bcr (0.528282): CASO SUBSONICO
```

4) CALCOLO PSI (fattore di espansione):

```
Formula: psi = 0.686 / sqrt(Rg*Ts)
psi = 0.686 / sqrt(287.053 * 293)
psi = 2.365425e-03 [(J/(kg*K))*K]=[s/m]
```

5) CALCOLO PORTATA TEORICA Gth:

CASO SUBSONICO (b > bcr):

```
Formula: Gth = kt * psi * Ps * Aeqv * sqrt[1 - (((p0/Ps) - bcr) / (1 - bcr))^2]
```

Parametri:

```
kt = 1.000000
psi = 2.365425e-03 s/m
Ps = 7.026500e+05 Pa
Aeqv = 2.506385e-08 m2
b = 0.662978
bcr = 0.528282
Gth = 3.992337e-05 kg/s
```

6) CALCOLO COEFFICIENTE DI SCARICO Cd:

```
Formula: Cd = G_sperimentale / Gth
G_sperimentale = 3.499872e-05 kg/s
Gth = 3.992337e-05 kg/s
Cd = 0.876647
```

==== STEP 9: CALCOLO REYNOLDS E MACH =====

```
fprintf('=====\n');
fprintf(' STEP 9: CALCOLO NUMERI DI REYNOLDS E MACH\n');
fprintf('=====\n\n');

fprintf('1) COSTANTI FISICHE:\n');
fprintf(' mu (viscosita dinamica aria) = %.2e Pa*s\n', mu);
fprintf(' rho (densita aria) = pa/(Rg*Ts) = %.6f kg/m3\n', rho);
fprintf(' k (indice adiabatico aria) = %.1f\n', k);
fprintf(' Rg (costante aria) = %.3f J/(kg*K)\n', Rg);
fprintf('2) PARAMETRI CALCOLATI NEGLI STEP PRECEDENTI:\n');
```

```

fprintf(' G_medio_sperimentale = %.6e kg/s\n', G_medio_sperimentale);
fprintf(' h_medio_num = %.6e m\n', h_medio_num);
fprintf(' Aeqv = %.6e m2\n', Aeqv);
fprintf(' Ts = %d K\n\n', Ts);

% CALCOLO REYNOLDS Re
fprintf('3) CALCOLO NUMERO DI REYNOLDS (Re=rho*u*h/mu):\n');
fprintf(' Formula teorica: Re_th = (Gth * h_medio) / (mu * Aeqv)\n');
fprintf(' Formula sperimentale: Re_exp = (G_medio_sperim * h) / (mu * Aeqv)\n\n');

% Calcolo Reynolds teorico
Re_th = (Gth * h_medio_num) / (mu * Aeqv);

fprintf(' Reynolds TEORICO (da Gth):\n');
fprintf(' Re_th = (%.6e * %.6e) / (%.2e * %.6e)\n', Gth, h_medio_num, mu, Aeqv);
fprintf(' Re_th = %.6f\n\n', Re_th);

% Calcolo Reynolds sperimentale
Re_exp = (Cd * Gth * h_medio_num) / (mu * Aeqv);

fprintf(' Reynolds SPERIMENTALE (da Cd * Gth):\n');
fprintf(' Re_exp = (%.6f * %.6e * %.6e) / (%.2e * %.6e)\n', Cd, Gth, h_medio_num, mu, Aeqv);
fprintf(' Re_exp = %.6f\n\n', Re_exp);

% CALCOLO MACH Ma
fprintf('4) CALCOLO NUMERO DI MACH ((Ma=u/(k*R*T)^0.5):\n');
fprintf(' Formula teorica: Ma_th = Gth / (rho * Aeqv * sqrt(k * Rg * Ts))\n');
fprintf(' Formula sperimentale: Ma_exp = (G_medio_sperim) / (rho * Aeqv * sqrt(k * Rg * Ts))\n\n');

% Calcolo Mach teorico
denom_Ma = sqrt(k * Rg * Ts);
Ma_th = Gth / (rho_locale * Aeqv * denom_Ma);

fprintf(' Mach TEORICO (da Gth):\n');
fprintf(' Ma_th = %.6e / (%.6f * %.6e * %.6e)\n', Gth, rho_locale, Aeqv, denom_Ma);
fprintf(' Ma_th = %.6f\n\n', Ma_th);

% Calcolo Mach sperimentale
Ma_exp = (Cd * Gth) / (rho_locale * Aeqv * denom_Ma);

fprintf(' Mach SPERIMENTALE (da Cd * Gth):\n');
fprintf(' Ma_exp = (%.6f * %.6e) / (%.6f * %.6e * %.6e)\n', Cd, Gth, rho_locale, Aeqv, denom_Ma);
fprintf(' Ma_exp = %.6f\n\n', Ma_exp);

```

```

=====
STEP 9: CALCOLO NUMERI DI REYNOLDS E MACH
=====

```

- 1) COSTANTI FISICHE:
 - mu (viscosita dinamica aria) = 1.81e-05 Pa*s
 - rho (densita aria) = pa/(Rg*Ts) = 1.204722 kg/m3
 - k (indice adiabatico aria) = 1.4
 - Rg (costante aria) = 287.053 J/(kg*K)
- 2) PARAMETRI CALCOLATI NEGLI STEP PRECEDENTI:
 - G_medio_sperimentale = 3.499872e-05 kg/s
 - h_medio_num = 1.615452e-05 m

Aeqv = 2.506385e-08 m2
Ts = 293 K

3) CALCOLO NUMERO DI REYNOLDS ($Re = \rho \cdot u \cdot h / \mu$):

Formula teorica: $Re_{th} = (G_{th} \cdot h_{medio}) / (\mu \cdot Aeqv)$

Formula sperimentale: $Re_{exp} = (G_{medio_sperim} \cdot h) / (\mu \cdot Aeqv)$

Reynolds TEORICO (da G_{th}):

$Re_{th} = (3.992337e-05 \cdot 1.615452e-05) / (1.81e-05 \cdot 2.506385e-08)$

$Re_{th} = 1421.657444$

Reynolds SPERIMENTALE (da $C_d \cdot G_{th}$):

$Re_{exp} = (0.876647 \cdot 3.992337e-05 \cdot 1.615452e-05) / (1.81e-05 \cdot 2.506385e-08)$

$Re_{exp} = 1246.292432$

4) CALCOLO NUMERO DI MACH ($Ma = u / (k \cdot R \cdot T)^{0.5}$):

Formula teorica: $Ma_{th} = G_{th} / (\rho \cdot Aeqv \cdot \sqrt{k \cdot R_g \cdot Ts})$

Formula sperimentale: $Ma_{exp} = (G_{medio_sperim}) / (\rho \cdot Aeqv \cdot \sqrt{k \cdot R_g \cdot Ts})$

Mach TEORICO (da G_{th}):

$Ma_{th} = 3.992337e-05 / (5.538709 \cdot 2.506385e-08 \cdot 3.431459e+02)$

$Ma_{th} = 0.838093$

Mach SPERIMENTALE (da $C_d \cdot G_{th}$):

$Ma_{exp} = (0.876647 \cdot 3.992337e-05) / (5.538709 \cdot 2.506385e-08 \cdot 3.431459e+02)$

$Ma_{exp} = 0.734712$

===== GRAFICI =====

Grafico 1: Pressione vs Posizione radiale CON p_0 , R_0 e $p_{interpolata}$

```
figure('Name', 'Pressione vs Posizione radiale')
plot(r1*1e3, p1*1e-5, 'b-', 'Linewidth', 2, 'DisplayName', 'Pressione misurata')
hold on
plot(r_interp*1e3, p_interp*1e-5, 'k-', 'Linewidth', 2, 'DisplayName', 'p interpolata da p0')
% Linea orizzontale per p0
p0_bar = p0_num*1e-5;
plot([min(r1*1e3), max(r1*1e3)], [p0_bar, p0_bar], 'r--', 'Linewidth', 2, 'DisplayName',
sprintf('p0 = %.2f bar', p0_bar))
% Linea verticale per R0
R0_mm = R0*1e3; % Converti da m a mm
p1_bar = p1*1e-5;
p_interp_bar = p_interp*1e-5;
ymin = min([min(p1_bar); min(p_interp_bar)]);
ymax = max([max(p1_bar); max(p_interp_bar)]);
plot([R0_mm, R0_mm], [ymin, ymax], 'g--', 'Linewidth', 2, 'DisplayName', sprintf('R0 = %.3f
mm', R0_mm))
xlabel('Posizione radiale [mm]')
ylabel('Pressione [bar]')
title('Profilo pressione: misurata, interpolata, con p0 e R0')
grid on
leg = legend('Location', 'best');
set(leg, 'Interpreter', 'none')
set(gca, 'FontSize', 11)

% Grafico 2: Portata vs Posizione radiale
figure('Name', 'Portata vs Posizione radiale')
plot(r1*1e3, G1, 'g-', 'Linewidth', 2)
```

```

xlabel('Posizione radiale [mm]')
ylabel('Portata [kg/s]')
title('Profilo portata misurata')
grid on
set(gca, 'FontSize', 11)

% Grafico 3: Forza vs Posizione radiale
figure('Name', 'Forza vs Posizione radiale')
plot(r1*1e3, F1, 'r-', 'LineWidth', 2)
xlabel('Posizione radiale [mm]')
ylabel('Forza [N]')
title('Profilo forza misurata')
grid on
set(gca, 'FontSize', 11)

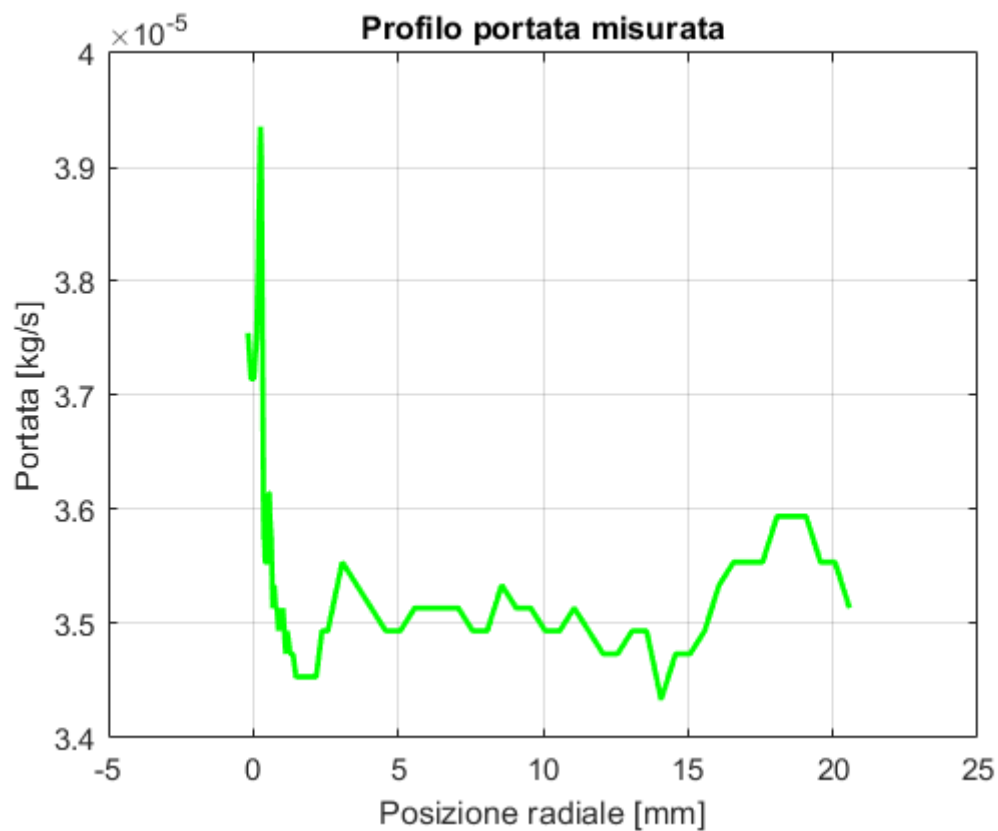
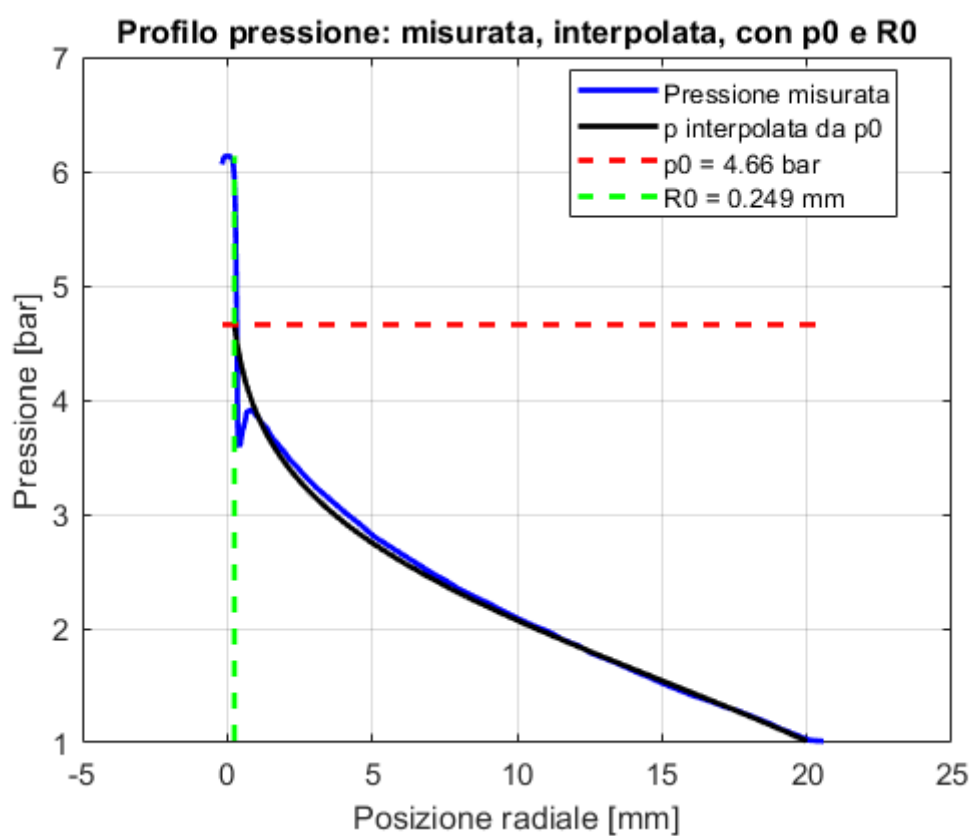
% Grafico 4: h_num vs Posizione radiale (SOLO ZONA VISCOSA - punto per punto e medio)
figure('Name', 'h_num vs Posizione radiale (ZONA VISCOSA)')
plot(r1_visc*1e3, h_num*1e6, 'bo', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 5)
hold on
plot(r1_visc*1e3, h_medio_num*1e6*ones(size(h_num)), 'r--', 'LineWidth', 2)
xlabel('Posizione radiale [mm]')
ylabel('Meato [micrometri]')
title('h num punto per punto e h medio num (ZONA VISCOSA 3-16 mm)')
leg = legend('h num (punto per punto)', sprintf('h medio num = %.4f um', h_medio_num*1e6));
set(leg, 'Interpreter', 'none')
grid on
xlim([2 17])
set(gca, 'FontSize', 11)

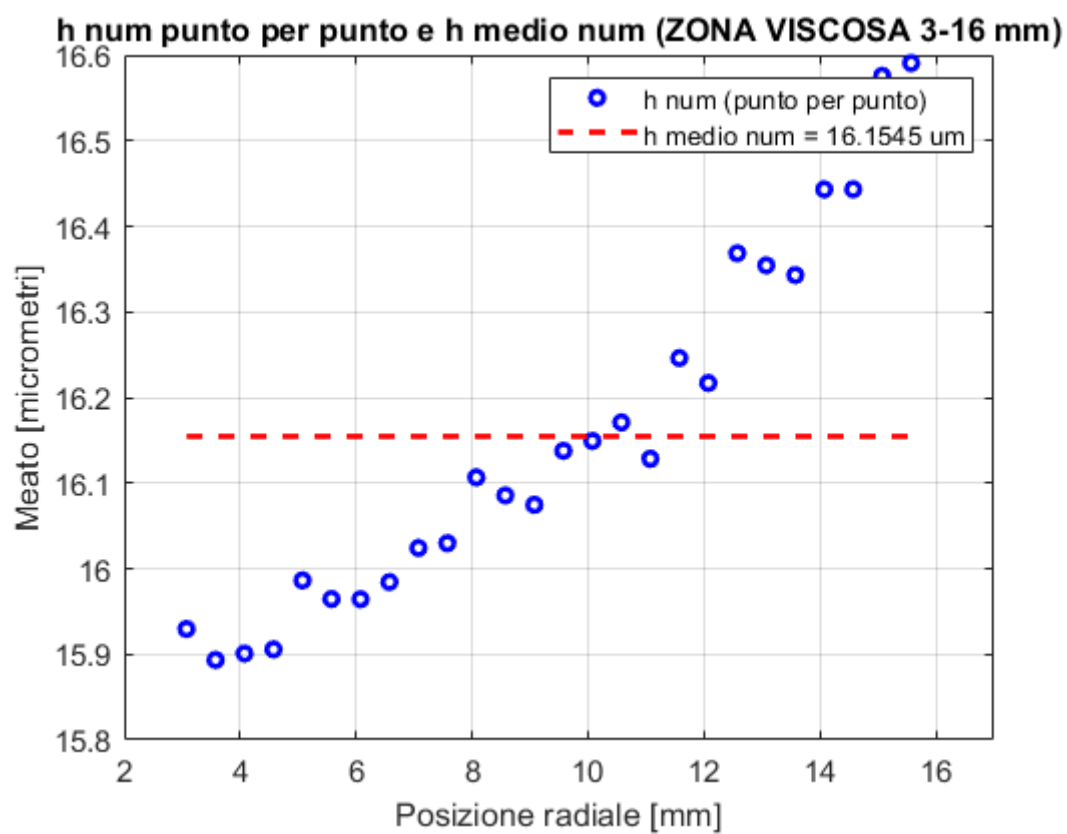
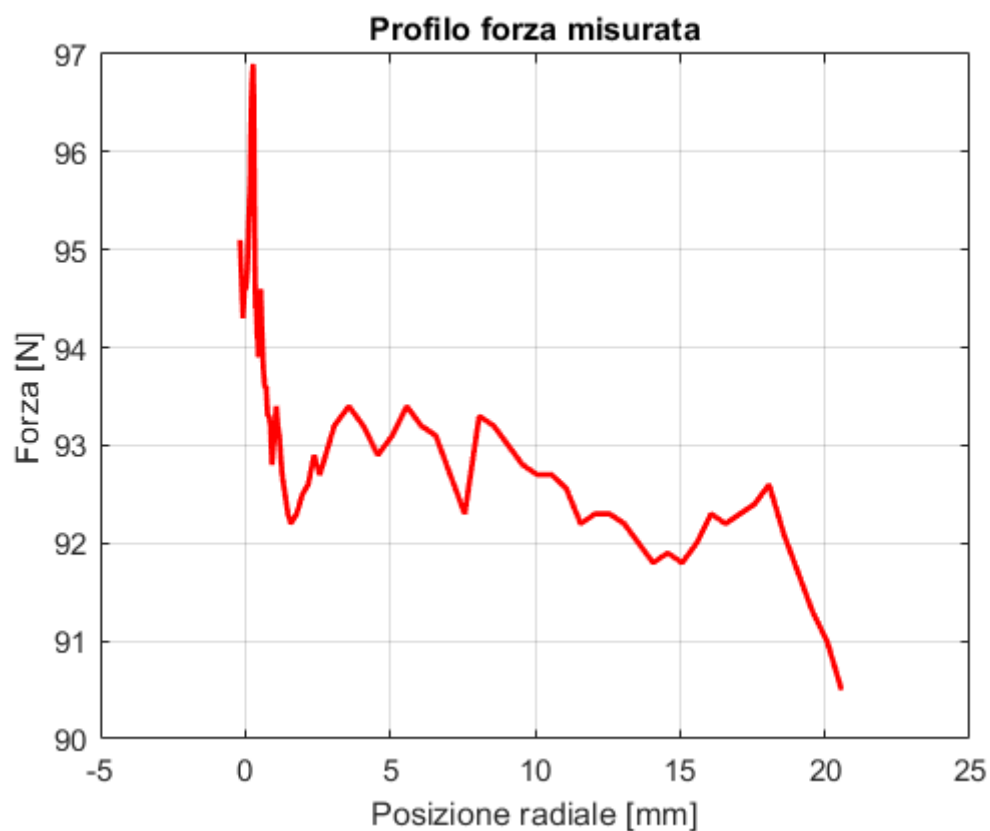
% Grafico 5: Ac, Aa, Aeqv vs h (come nel tuo script)
h_grafico = linspace(0, 0.5e-3, 1000); % [m]
d_grafico = R0_reale * 1e3 * 2; % Diametro in mm (= 2*R0_reale in mm)
Ac_grafico = pi * (d_restr/2)^2 * ones(1, 1000); % [m²]
Aa_grafico = pi * d_restr .* h_grafico; % [m²]
delta_grafico = Ac_grafico ./ Aa_grafico;
Aeqv_grafico = Ac_grafico ./ sqrt(1 + delta_grafico.^2);

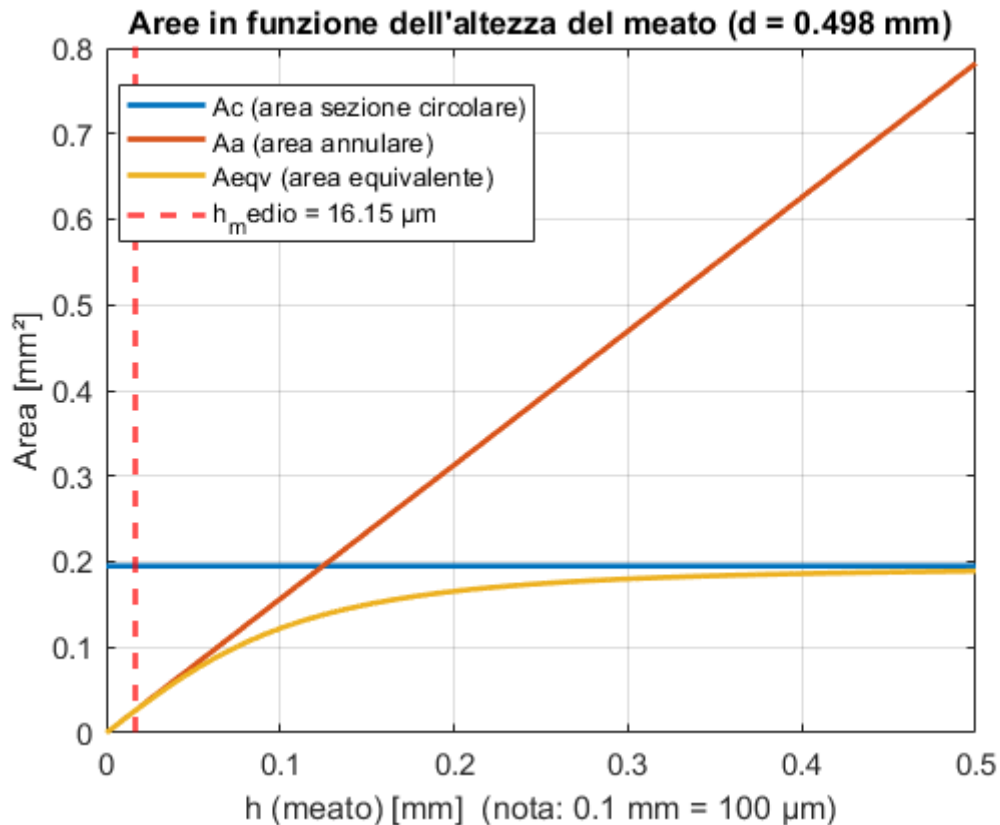
figure('Name', 'Aree vs h (meato)')
plot(h_grafico*1e3, Ac_grafico*1e6, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Ac (area sezione circolare)')
hold on
plot(h_grafico*1e3, Aa_grafico*1e6, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Aa (area annulare)')
hold on
plot(h_grafico*1e3, Aeqv_grafico*1e6, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Aeqv (area equivalente)')
% Linea verticale a h_medio_num
xline(h_medio_num*1e3, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', sprintf('h_medio = %.2f μm', h_medio_num*1e6))
xlabel('h (meato) [mm] (nota: 0.1 mm = 100 μm)')
ylabel('Area [mm²]')
title(sprintf('Aree in funzione dell\'altezza del meato (d = %.3f mm)', d_grafico))
grid on
legend('Location', 'best')
set(gca, 'FontSize', 11)

fprintf('OK - Grafici generati\n');
fprintf('=====\\n');

```







===== CALCOLO ESPLICITO DI F_{num} PER RIEPILOGO =====

Calcola F_{num} con il p_0 trovato per visualizzazione nel riepilogo

```
A_final = (1 - (pa/p0_num)^2) / log(R/R0);
F_num = pi * p0_num * R0^2 * exp(2/A_final) * sqrt(pi*A_final/8) * ...
        (erf(sqrt(2/A_final)) - erf(sqrt(2/A_final)*pa/p0_num));
```

===== RIEPILOGO FINALE COMPLETO =====

```
fprintf('\n');
fprintf('===== \n');
fprintf('|| RIEPILOGO FINALE COMPLETO || \n');
fprintf('===== \n\n');

fprintf('TABELLA RIASSUNTIVA:\n');
fprintf('----- \n');
fprintf('R0 reale [mm]           = %15.4f\n', R0*1e3);
fprintf('h_num medio [μm]        = %15.4f\n', h_medio_num*1e6);
fprintf('p0_num assoluta [Pa]     = %15.6e\n', p0_num);
fprintf('p0_num assoluta [bar]    = %15.4f\n', p0_num/1e5);
fprintf('F_num [N]                = %15.6f\n', F_num);
fprintf('G_sperimentale [kg/s]    = %15.6e\n', G_medio_sperimentale);
fprintf('G_sperimentale [l/min]   = %15.4f\n', G_medio_sperimentale * cG);
fprintf('G_teorica [kg/s]         = %15.6e\n', Gth);
fprintf('G_teorica [l/min]        = %15.4f\n', Gth * cG);
fprintf('cd                       = %15.6f\n', cd);
fprintf('Aeqv [m²]                = %15.6e\n', Aeqv);
fprintf('Ac [m²]                  = %15.6e\n', Ac);
fprintf('Aa [m²]                  = %15.6e\n', Aa);
```

```
fprintf('└─ Delta (=Ac/Aa)           = %15.6f\n', delta);
fprintf('└─ Re_teorico              = %15.6f\n', Re_th);
fprintf('└─ Re_sperimentale           = %15.6f\n', Re_exp);
fprintf('└─ Ma_teorico                 = %15.6f\n', Ma_th);
fprintf('└─ Ma_sperimentale             = %15.6f\n', Ma_exp);
fprintf('└─────────────────────────────────\n\n');
```

RIEPILOGO FINALE COMPLETO

TABELLA RIASSUNTIVA:

└─ R0 reale [mm]	=	0.2490
└─ h_num medio [μm]	=	16.1545
└─ p0_num assoluta [Pa]	=	4.658416e+05
└─ p0_num assoluta [bar]	=	4.6584
└─ F_num [N]	=	92.663846
└─ G_sperimentale [kg/s]	=	3.499872e-05
└─ G_sperimentale [l/min]	=	1.7431
└─ G_teorica [kg/s]	=	3.992337e-05
└─ G_teorica [l/min]	=	1.9883
└─ Cd	=	0.876647
└─ Aeqv [m²]	=	2.506385e-08
└─ Ac [m²]	=	1.947819e-07
└─ Aa [m²]	=	2.527396e-08
└─ Delta (=Ac/Aa)	=	7.706822
└─ Re_teorico	=	1421.657444
└─ Re_sperimentale	=	1246.292432
└─ Ma_teorico	=	0.838093
└─ Ma_sperimentale	=	0.734712

===== FUNCTION AUSILIARIA =====

```
function residual = calc_F_residual(p0, R, R0, pa, F_target)
    % Calcola F_num(p0) - F_target
    % dove F_num = pi * p0_num * R0^2 * exp(2/A) * sqrt(pi*A/8) * (erf(sqrt(2/A)) -
erf(sqrt(2/A)*pa/p0_num));
    % A = (1 - (pa/p0_num)^2) / log(R/R0);

    % Calcolo A in funzione di p0
    A = (1 - (pa/p0)^2) / log(R/R0);

    % Calcolo F_num
    F_num = pi * p0 * R0^2 * exp(2/A) * sqrt(pi*A/8) * (erf(sqrt(2/A)) -
erf(sqrt(2/A)*pa/p0));

    % Residuale
    residual = F_num - F_target;

end
```

Verifica cambio di segno:

```
f(p0_min) = -9.266385e+01
f(p0_max) = 7.792346e+01
```

OK - La funzione cambia segno

Iterazioni Regula Falsi (fine iterazioni quando Errore > Tolleranza):

```
-----  
Iter | p0_new (Pa) | f(p0_new) | Errore  
-----+-----+-----  
  1 | 4.284244e+05 | -1.161515e+01 | 1.16e+01  
  2 | 4.639976e+05 | -5.783243e-01 | 5.78e-01  
  3 | 4.657557e+05 | -2.694096e-02 | 2.69e-02  
  4 | 4.658376e+05 | -1.251043e-03 | 1.25e-03  
  5 | 4.658414e+05 | -5.808541e-05 | 5.81e-05  
  7 | 4.658416e+05 | -1.252133e-07 | 1.25e-07
```

CONVERGENZA RAGGIUNTA

Risultato Regula Falsi:

=====

p0 (pressione ingresso gap) trovata:

p0 assoluta = 4.658416e+05 Pa
p0 assoluta = 4.6584 bar
p0 relativa = 3.645166e+05 Pa
p0 relativa = 3.6452 bar
Iterazioni: 7
Errore finale: 1.252133e-07 Pa

C.4 SCRIPT 4: Codice loop automatico

```
clear all;  
close all;  
clc;
```

===== 1. RICERCA FILE .MAT NELLA CARTELLA =====

```
lista_file = dir('M*_S*_D*_PS*.mat');  
num_files = length(lista_file);  
  
if num_files == 0  
    error('Nessun file .mat trovato. Controlla la cartella di lavoro.');
```

end

```
dati_tabella_completa = {};  
fprintf('Inizio elaborazione di %d file .mat con logica SCRIPT 3 aggiornata...\n\n',  
num_files);
```

Inizio elaborazione di 12 file .mat con logica SCRIPT 3 aggiornata...

===== 2. CICLO SUI FILE =====

```
for f = 1:num_files  
    nome_file_mat = lista_file(f).name;  
    load(nome_file_mat);  
  
    % Estrazione parametri dal nome file  
    pattern = 'M(\d+)_S(\d+)_D(\d+)_PS(\d+)';  
    tokens = regexp(nome_file_mat, pattern, 'tokens');  
    if isempty(tokens), continue; end  
    ps_bar_nominale = str2double(tokens{1}{4});  
  
    % Costanti Fisiche SI (Allineate allo Script 3)  
    Ts = 293; Rg = 287.053; k = 1.4; mu = 1.81e-5; pa = 101325;  
    R_pattino = 20e-3; rho = pa/(Rg*Ts);  
    cG = 60000/rho;  
    Tamb = 293; % Temperatura ambiente per rho_locale e kt  
  
    campi = fieldnames(dati_salvati);  
    for c = 1:length(campi)  
        nome_forza = campi{c};  
        if startswith(nome_forza, 'F') && isstruct(dati_salvati.(nome_forza))  
            dati_f = dati_salvati.(nome_forza);  
  
            % Dati sperimentali  
            r1 = dati_f.R * 1e-3;  
            p1 = dati_f.P * 1e5 + pa;  
            G1 = dati_f.Q * (1/(60*1000)) * rho;  
            ps_assoluta_pa = (ps_bar_nominale * 1e5) + pa;  
            R0_reale = dati_f.R0_reale_m;  
  
            % STEP 1-5: Zona Viscosa e h_num  
            idx_v = (r1 >= 3e-3) & (r1 <= 16e-3);  
            G_med_exp = mean(G1(idx_v));
```

```

F_med_exp = mean(dati_f.F(idx_v));

h_v = (12*mu*Rg*Ts*log(R_pattino./r1(idx_v)).*G_med_exp./(pi*(p1(idx_v).^2-
pa^2))).^(1/3);
h_med_num = mean(h_v);

% STEP 6: Regola Falsi p0
R0 = R0_reale;
f_res = @(p) calc_F_residual_final(p, R_pattino, R0, pa, F_med_exp);
p0_a = pa + 1e3; p0_b = ps_assoluta_pa;
f_a = f_res(p0_a); f_b = f_res(p0_b);
iter = 0; p0_num = p0_a;
while iter < 5000
    iter = iter + 1;
    p0_num = p0_a - f_a * (p0_b - p0_a) / (f_b - f_a);
    f_n = f_res(p0_num);
    if abs(f_n) < 1e-6, break; end
    if f_n * f_a < 0, p0_b = p0_num; f_b = f_n; else, p0_a = p0_num; f_a = f_n;
end

end

% STEP 8: Calcolo Gth e Cd (Logica Aggiornata)
d_restr = 2 * R0;
Ac = pi * R0^2;
Aa = pi * d_restr * h_med_num;
delta = Ac / Aa;
Aeqv = Ac / sqrt(1 + delta^2);

rho_locale = p0_num / (Rg * Tamb);
kt = sqrt(Ts / Tamb);
bcr = (2/(k+1))^(k/(k-1));
beta = p0_num / ps_assoluta_pa; % p0/ps
psi = 0.686 / sqrt(Rg * Ts);

if beta <= bcr
    Gth = kt * psi * ps_assoluta_pa * Aeqv;
else
    ratio = (beta - bcr) / (1 - bcr);
    Gth = kt * psi * ps_assoluta_pa * Aeqv * sqrt(1 - ratio^2);
end

Cd = G_med_exp / Gth;

% STEP 9: Re e Ma (Logica Aggiornata)
Re_th = (Gth * h_med_num) / (mu * Aeqv);
denom_Ma = sqrt(k * Rg * Ts);
Ma_th = Gth / (rho_locale * Aeqv * denom_Ma);

% Archiviazione dati (AGGIUNTO Ac, Aa, delta)
dati_tabella_completa = [dati_tabella_completa; {nome_file_mat, nome_forza,
R0*1e3, ...
    h_med_num*1e6, p0_num, p0_num/1e5, F_med_exp, G_med_exp, G_med_exp*cG, ...
    Gth, Gth*cG, Ac, Aa, delta, Aeqv, Cd, h_med_num/d_restr, Re_th, Ma_th, beta}];

end
end
end

```

===== 3. CREAZIONE E SALVATAGGIO TABELLE EXCEL

=====

Aggiunte colonne Ac, Aa, delta

```
nomi_col =
{'file','scheda','R0_mm','hnum_mu','P0_Pa','P0_bar','F_N','Gexp_kgs','Gexp_lmin',...
'Gth_kgs','Gth_lmin','Ac','Aa','delta','Aeqv','cd','h_over_d','Re_th','Ma_th','beta_p0_ps'};
T = cell2table(dati_tabella_completa, 'VariableNames', nomi_col);

% 3.1 Salvataggio Tabella Completa
nome_excel_completo = 'Risultati_Elaborazione_Completa.xlsx';
writetable(T, nome_excel_completo);
fprintf('File Excel COMPLETO salvato: %s\n', nome_excel_completo);

% 3.2 Creazione e Salvataggio Tabella Ristretta
% --- MODIFICA QUI: Aggiunte 'file' e 'scheda' ---
T_ristretta = T(:, {'file','scheda','R0_mm','hnum_mu','P0_Pa','cd'});
nome_excel_ristretto = 'Risultati_Elaborazione_Ristretta.xlsx';
writetable(T_ristretta, nome_excel_ristretto);
fprintf('File Excel RISTRETTO salvato: %s\n', nome_excel_ristretto);
% -----
```

File Excel COMPLETO salvato: Risultati_Elaborazione_Completa.xlsx

File Excel RISTRETTO salvato: Risultati_Elaborazione_Ristretta.xlsx

===== 4. GENERAZIONE 5 GRAFICI (COLORE=PS, SIMBOLO=D, LINEE=TENDENZA) =====

```
D_v = zeros(height(T), 1); PS_v = zeros(height(T), 1);
for i = 1:height(T)
    tok = regexp(T.file{i}, 'D(\d+)_PS(\d+)', 'tokens');
    D_v(i) = str2double(tok{1}{1}); PS_v(i) = str2double(tok{1}{2});
end
uD = unique(D_v); uPS = unique(PS_v);
colori_ps = lines(length(uPS));
simboli_d = {'o', 's', 'd', '^', 'v', 'p', 'h'};

cfg = {'h_over_d', 'cd', 'Cd vs h/d', 'h/d [-]'; ...
'Re_th', 'cd', 'Cd vs Re_th', 'Reynolds Teorico [-]'; ...
'Ma_th', 'cd', 'Cd vs Ma_th', 'Mach Teorico [-]'; ...
'beta_p0_ps', 'cd', 'Cd vs p0/ps', 'p0_num / ps [-]'; ...
'Aeqv', 'cd', 'Cd vs Aeqv', 'Area Equivalente [m^2]'};

for g = 1:5
    figure('Name', cfg{g,3}, 'Color', 'w', 'Units', 'normalized', 'Position', [0.1+g*0.05 0.1 0.45 0.6]);
    hold on; grid on; box on;
    for ip = 1:length(uPS)
        for id = 1:length(uD)
            idx = (PS_v == uPS(ip)) & (D_v == uD(id));
            if any(idx)
                x_val = T.(cfg{g,1})(idx); y_val = T.(cfg{g,2})(idx);
                [x_sorted, s_idx] = sort(x_val); y_sorted = y_val(s_idx);
                plot(x_sorted, y_sorted, 'color', [colori_ps(ip,:), 0.35], 'Linewidth', 0.8,
```

```

'HandleVisibility', 'off');
    scatter(x_val, y_val, 40, color_ips(ip,:), simboli_d{mod(id-1,
length(simboli_d))+1}, ...
    'filled', 'MarkerFaceAlpha', 0.8, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'Linewidth',
0.2, ...
    'DisplayName', sprintf('PS=%d bar, D=%d', uPS(ip), uD(id)));
    end
end
end
xlabel(cfg{g,4}, 'FontWeight', 'bold'); ylabel('C_d [-]', 'FontWeight', 'bold');
title(cfg{g,3}); legend('Location', 'eastoutside', 'FontSize', 8); set(gca, 'FontSize',
10);
end

function r = calc_F_residual_final(p0, R, R0, pa, Ft)
    A = (1 - (pa/p0)^2) / log(R/R0);
    Fn = pi * p0 * R0^2 * exp(2/A) * sqrt(pi*A/8) * (erf(sqrt(2/A)) - erf(sqrt(2/A)*pa/p0));
    r = Fn - Ft;
end

```

