POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Forze di attrito in guarnizioni per cilindri pneumatici

Original
Forze di attrito in guarnizioni per cilindri pneumatici / Raparelli, T., Mazza, L., Trivella, A., Goti, E.. - In: OLEODINAMICA PNEUMATICA. - ISSN 2421-4388. - STAMPA. - Aprile(2023), pp. 44-50.

Availability:
This version is available at: 11583/2978680 since: 2023-05-22T13:33:13Z

Publisher:
Tecniche Nuove

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright
AAAS preprint/submitted version e/o post-print Author Accepted Manuscript

preprint/submitted version e/o post-print Author Accepted Manuscript

(Article begins on next page)

09 September 2026

Forze di attrito in guarnizioni per cilindri pneumatici

Terenziano Raparelli, Luigi Mazza, Andrea Trivella, Edoardo Goti
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
Politecnico di Torino

In questo articolo viene presentato un metodo sperimentale per la misura della forza di attrito in attuatori pneumatici mediante l'utilizzo di un tribometro standard da laboratorio opportunamente attrezzato per riprodurre reali condizioni di montaggio e di lavoro delle guarnizioni

Introduzione

L'uso di attuatori pneumatici nei dispositivi meccanici automatici richiede una conoscenza approfondita delle condizioni operative di questi componenti. Di conseguenza, definire e misurare le prestazioni degli attuatori pneumatici in termini di forza di attrito e durata è diventato essenziale. I componenti di scorrimento presenti negli attuatori (guarnizioni, boccole e anelli di guida) influiscono in modo determinante sulle prestazioni e sulla durata. In particolare, la scelta del tipo di tenuta (labbro, labbro arrotondato, lobato, ecc.), della geometria e del materiale, della configurazione della sede, delle tolleranze di lavorazione, delle condizioni di lubrificazione e della finitura superficiale è di importanza strategica per garantire una capacità di tenuta ottimale unitamente a una bassa resistenza all'attrito e alta resistenza all'usura. L'analisi dell'attrito in pneumatica comporta studi sperimentali o numerici/analitici sia su attuatori completi che su tenute considerate singolarmente. Nel primo tipo di studio, l'obiettivo è solitamente quello di ottimizzare la geometria e i materiali applicando un metodo di prova in grado di valutare correttamente la forza di attrito tenendo conto dei parametri fisici che la influenzano, mentre nel secondo tipo, l'obiettivo principale è quello di validare un modello di tenuta e quindi prevedere il comportamento di attrito sulla base di una formulazione analitica.
Diversi metodi sperimentali per determinare la forza di attrito in cilindri a doppio effetto a velocità costante in funzione del differenziale di pressione attraverso il pistone sono stati sviluppati da Belforte et al. [1], [2], Schroeder e Singh [3] e Kazama e Fujiwara [4]. Particolarmente efficace si è rivelato misurare la forza di attrito negli attuatori mediante l'uso di un sensore stazionario a cella di carico piuttosto che uno che si muove con l'asta in modo da rendere la misura insensibile ai carichi dinamici [2]. Belforte et al. [5] [6] hanno anche dimostrato l'influenza sulla misura della direzione del movimento dell'asta (corsa di uscita e rientro) ed è stata delineata una procedura per separare i singoli contributi di attrito delle guarnizioni dalla forza di attrito complessiva.

Nel loro lavoro sulla modellazione, Wassink et al. [7] hanno presentato un modello per stimare il coefficiente di attrito in guarnizioni a labbro sottoposte a moto alternato tenendo in considerazione le caratteristiche fisiche delle superfici di sfregamento, le perdite viscose dovute al lubrificante e i fenomeni di isteresi del materiale della tenuta; tutti aspetti di fondamentale importanza in presenza di tenute in elastomero o plastica. Salant et al. [8] hanno presentato un modello numerico 'multi-scale' per tenute striscianti affiancando all'analisi FEM delle deformazioni strutturali della tenuta l'analisi della meccanica del contatto alle asperità superficiali e la meccanica dei fluidi all'interno del film lubrificante. Il modello consente di analizzare le prestazioni delle tenute in relazione a molteplici possibili condizioni operative. Pinedo et al. [9] hanno sviluppato un modello tridimensionale per considerare l'effetto di un errato montaggio della guarnizione

con conseguente eccentricità del contatto tra guarnigione e asta. I risultati, che hanno mostrano una buona corrispondenza con i dati sperimentali, hanno evidenziato come piccole eccentricità delle aste possano portare a cambiamenti significativi nella forza di contatto e quindi nel deterioramento della guarnizione stessa.

In generale quindi le misure di attrito in applicazioni pneumatiche richiedono la preparazione, non sempre facile, di banchi prova per riprodurre le reali condizioni di funzionamento dei cilindri. In questo articolo viene descritto lo sviluppo di un metodo sperimentale per la misura della forza di attrito di guarnizioni pneumatiche a labbro. Il metodo prevede l'utilizzo di un tribometro standard da laboratorio opportunamente attrezzato in modo da riprodurre in modo più fedele possibile le condizioni di montaggio e di lavoro delle guarnizioni installate in un cilindro pneumatico. Il metodo può essere adottato, qualora si disponga di un tribometro, per evitare la costruzione di costosi banchi prova e limitare il tempo da investire della sperimentazione per questo tipo di misure. In particolare, possono essere misurati rapidamente il coefficiente di attrito e la forza di attrito tra guarnizione e canna e può anche essere studiata la rigidezza radiale e il danneggiamento da usura della guarnizione.
Nel seguito verrà presentata la metodologia e alcuni risultati ottenuti con guarnizioni a labbro in PTFE energizzate da molle a lamina montabili in cilindri pneumatici commerciali.

Descrizione della metodologia di prova

Il metodo pin-on-disc è uno dei metodi di misura da laboratorio più comunemente utilizzati per la caratterizzazione dei materiali per uso tribologico. La prova consiste nel misurare la forza di attrito che si genera per strisciamento all'interfaccia di contatto tra un pin ad estremità sferica o piana (solitamente fermo) installato su un braccio sensorizzato e un campione piano (solitamente posto in movimento). Il moto relativo tra il pin e il campione può essere sia di tipo rotativo che di tipo lineare alternato; in quest'ultimo caso la prova è anche nota con la denominazione *ball-on-flat*. Per quest'ultima configurazione, la normativa di riferimento è la ASTM G133 che stabilisce le specifiche minime richieste allo strumento e fornisce le linee guide per l'esecuzione delle misure sperimentali.

La condizione di contatto che si realizza premendo il pin contro una controparte piana è tuttavia molto diversa dalla geometria di contatto tipica di una guarnizione in esercizio: anche ammettendo di utilizzare i medesimi materiali del componente reale e la medesima pressione di contatto, il valore misurato del coefficiente di attrito potrebbe discostarsi dal valore caratteristico dell'applicazione.

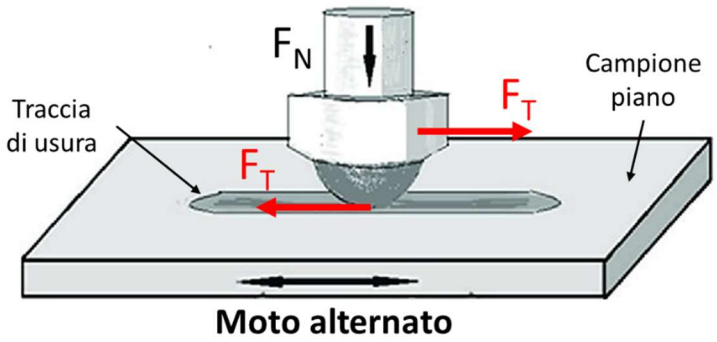


Figura 1. Schema di prova ball-on-flat secondo normativa ASTM G133, modificato da [10].

Per riprodurre le reali condizioni di funzionamento di una guarnizione a labbro per cilindri pneumatici è stata realizzato un attrezzo speciale nel quale è possibile montare un segmento circolare ritagliato dalla guarnizione intera (figura 2). Il limitato ingombro di questa configurazione, che sfrutta solo una porzione di guarnizione, consente di montare l'attrezzo su un tribometro pin-on-disc commerciale, garantendo che la geometria di contatto durante la prova tribologia sia paragonabile a quella dell'applicazione reale. La figura 2 mostra il sistema di prova, in cui l'attrezzo porta-guarnizione (3) è montato su un tribometro Anton Paar TRB. Il segmento di guarnizione (1) è posto radialmente a contatto con una porzione di canna (2) ricavata da un cilindro pneumatico commerciale. Il porta-guarnizione è vincolato al braccio di misura (4) del tribometro e il carico normale F_N di contatto è ottenuto mediante masse calibrate (5). Il braccio del tribometro è sensorizzato al fine di permettere la misura della forza di attrito che si sviluppa all'interfaccia di scorrimento guarnizione-canna ed è inoltre dotato di un apposito trasduttore per la misura dell'abbassamento del braccio (4) in direzione verticale, ovvero della deformazione verticale x del labbro sotto l'azione del carico.
La porzione di canna (2) è resa solidale alla slitta (6) del modulo lineare del tribometro mediante elementi di fissaggio e centraggio (7); la slitta (6) è dotata di moto lineare alternato lungo la direzione dell'asse della canna (2). Durante la misura il tribometro fornisce il valore istantaneo del coefficiente di attrito f come rapporto tra la forza tangenziale F_T, trasferita dalla guarnizione al braccio sensorizzato (4) del tribometro, e la forza normale F_N applicata. Nei dettagli di Figura 2 sono

visibili il segmento di guarnizione di lunghezza *Ls*, e l'elemento che riproduce la condizione reale di montaggio della guarnizione sul pistone. Inoltre, è mostrata parte della sezione radiale dell'anello porta guarnizione.

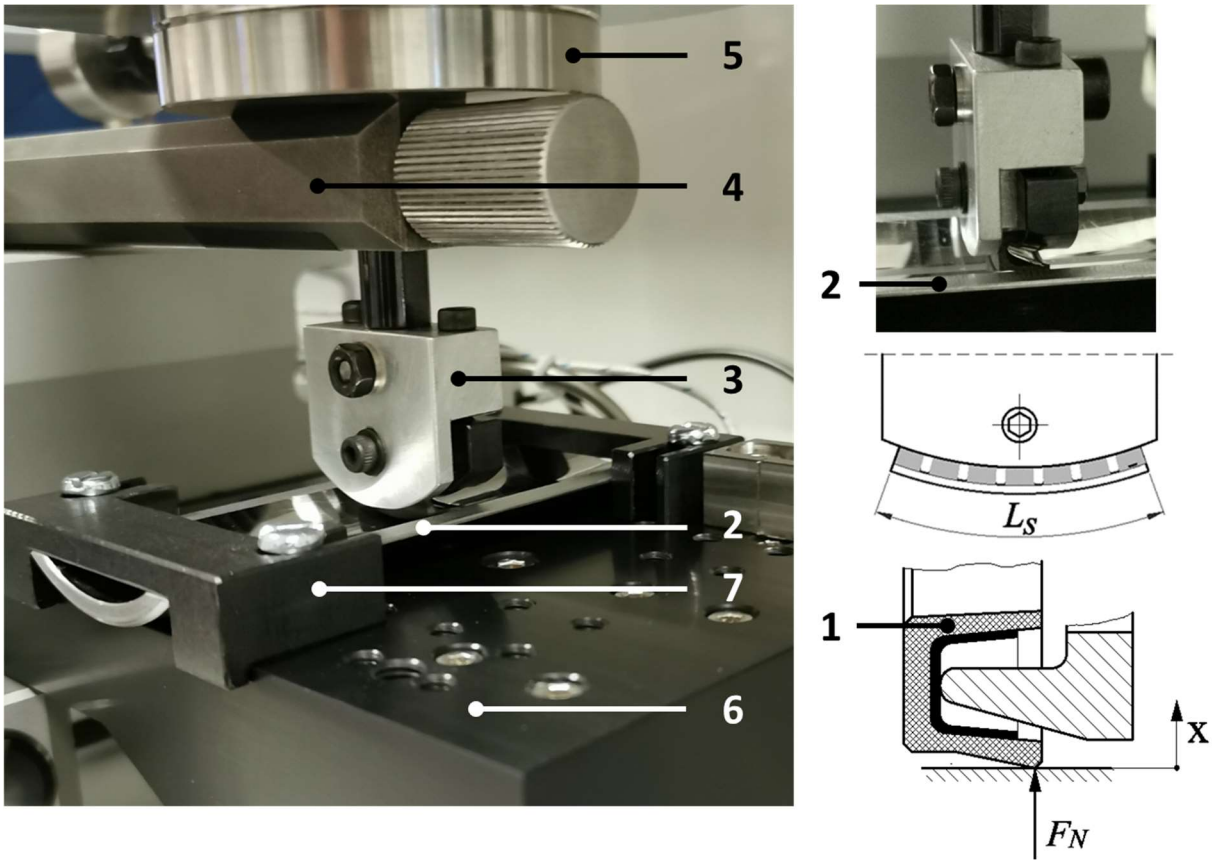
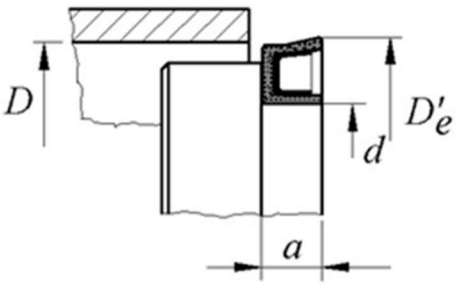


Figura 2: sistema di misura della rigidezza e del coefficiente di attrito della guarnizione

Risultati

Di seguito vengono presentati i risultati di una campagna di prove eseguita al tribometro con il porta-guarnizione descritto al paragrafo precedente. La guarnizione a labbro commerciale è realizzata in PTFE ed è energizzata mediante una molla a lamina metallica. La figura 3 mostra la guarnizione testata, unitamente alle relative specifiche dimensionali e di montaggio: a è la larghezza assiale, d il diametro della sede di tenuta, D'_e il diametro esterno effettivo della guarnizione una volta montata nella sua sede, D il diametro della canna e x_0 l'interferenza radiale che garantisce il precarico di tenuta sul labbro della guarnizione. I valori indicati sono le medie delle misurazioni effettuate su tre guarnizioni dello stesso tipo. Il valore del diametro della canna e di interferenza radiale è invece fornito come intervallo di valori caratteristico dell'applicazione reale. Le tolleranze di fabbricazione del cilindro pneumatico sono di grande importanza nelle tenute radiali a labbro in quanto sono responsabili dell'interferenza di assemblaggio delle guarnizioni, i cui effetti sulla forza radiale all'interfaccia tenuta-controparte non possono essere trascurati [11-13].



	[mm]
De'	51.24
d	40.56
D	50.0 - 50.2
a	6.71
x_0	0.62 – 0.52

Figure 3: Dimensioni della guarnizione a labbro commerciale in PTFE usta per le prove e della relativa sede di montaggio sul pistone pneumatico.

La porzione di canna di diametro nominale pari a 50 mm è realizzata in acciaio inossidabile con rugosità superficiale pari a Ra = 0,6 µm. L'entità del carico verticale applicato è stata scelta in modo da riprodurre l'effettiva precompressione x_0 della guarnizione reale in condizioni di esercizio dovuta all'interferenza al montaggio nella canna (x_0 è indicata nella tabella di figura 3).
Prima di eseguire le misure di attrito, sono state eseguite alcune prove di compressione sul segmento di guarnizione. Il carico normale F_N applicato sulla porzione di guarnizione è stato aumentato gradualmente fino a ottenere una deformazione circa pari all'interferenza al montaggio x_0; successivamente il carico è stato progressivamente ridotto fino a zero. La figura 4 mostra l'andamento della deformazione verticale totale x in funzione di F_N.
Nell'esecuzione di queste prove la distribuzione di pressione p lungo il labbro del segmento di guarnizione è stata considerata approssimativamente costante per via della limitata estensione del contatto. Si è quindi ipotizzato che ogni sezione del segmento di guarnizione contribuisca in egual misura alla deformazione verticale totale, indipendentemente dal proprio scostamento rispetto all'asse di carico. Le misure di deformazione sono state ripetute su tre segmenti di guarnizione e se ne è calcolato il valore medio.

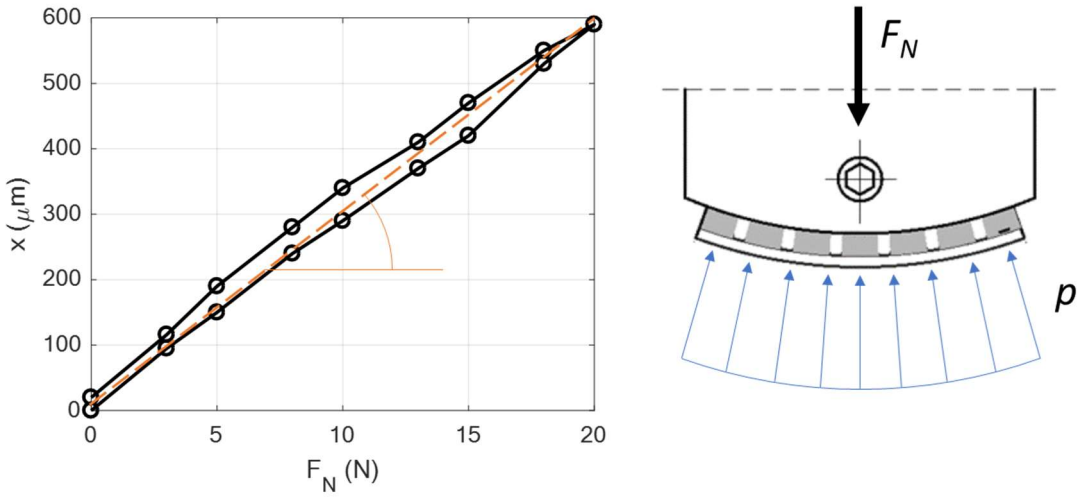


Figura 4. Deformazione x del segmento di lunghezza *Ls* di una guarnizione in funzione del carico F_N

Il risultato di questi test preliminari ha permesso di definire un carico da applicare pari a 18 N per ottenere una deformazione di 570 micron, simile a quella dovuta all'interferenza al montaggio nella canna: Il diagramma di figura 4 consente anche di ottenere una stima della rigidezza *K* della guarnizione che è circa costante in quanto lo schiacciamento varia in modo praticamente lineare rispetto al carico. La rigidezza K così valutata rappresenta la rigidezza complessiva della guarnizione in cui si sommano in serie i contributi di elasticità della molla a lamina e del materiale polimerico del labbro.

Una volta definito il carico applicato, sono state eseguite le prove dinamiche per la misura del coefficiente di attrito f tra guarnizione e canna; le prove sono state eseguite a velocità media pari a 0.01 m/s. Le misure sono state ripetute su tre porzioni di guarnizione.
Un esempio di curva di attrito è raffigurato in figura 5. La figura 5a rappresenta la curva di attrito rilevata durante la prova, dove i valori positivi e negativi di µ corrispondono al moto relativo in direzioni opposte. La figura 5b riporta invece l'andamento del CoF mediato ciclo per ciclo e mostra una buona stabilità del valore medio lungo tutto l'arco di esecuzione della prova.

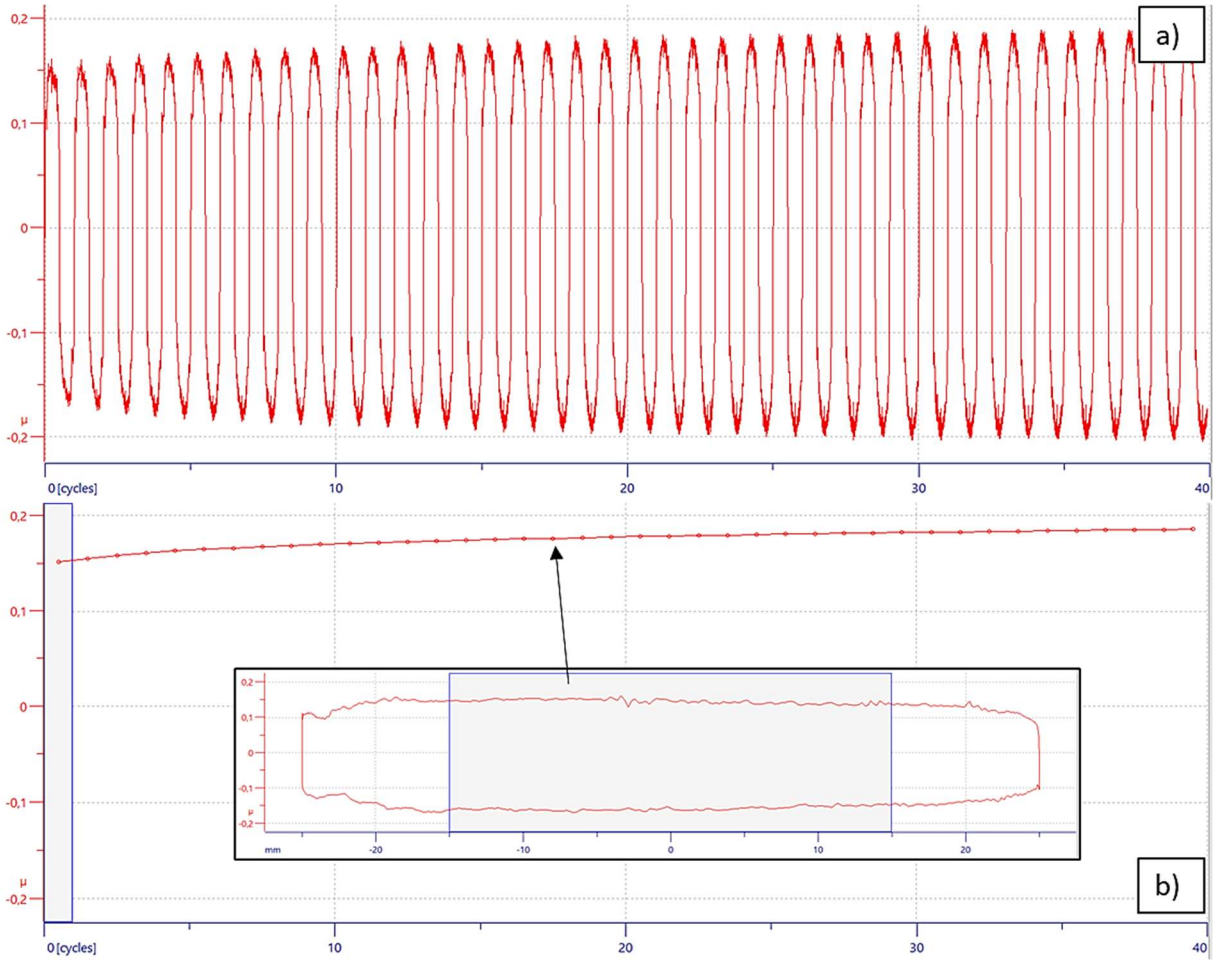


Figura 5. CoF misurato durante una prova di strisciamento su un segmento di guarnizione.

Dalla figura 5a è possibile rilevare che i picchi positivi del CoF hanno valore mediamente inferiore se paragonati ai corrispondenti valori in modulo dei picchi negativi. Questo fenomeno è dovuto un effetto della direzione della velocità relativa *v* tra guarnizione e canna.

La tabella 1 riassume i risultati delle misure eseguite con il tribometro. Il valore medio del coefficiente di attrito si attesta a 0.15 e presenta una deviazione standard, calcolata su una popolazione di 3 campioni, contenuta entro il 20 % del valore medio. È riportato inoltre il valore medio della rigidezza radiale per unità di lunghezza circonferenziale (1 mm di lunghezza), $K_u = K/(\pi D)$ prossimo a 2 N/mm^2, con una deviazione standard pari a circa il 15% del valore medio. Questo è dovuto sia alle tolleranze dimensionali delle guarnizioni sia a piccole variazioni di lunghezza del segmento di guarnizione e di molla a lamina (il bordo di taglio del segmento non è sempre risultato perfettamente radiale/rettilineo ed esente da bave).

Tabella 1 Valori medi della rigidezza e del coefficiente di attrito ottenuti al tribometro

	Media
f	0.150
K_u (N/mm^2)	2.100

Conclusione

In questo articolo è stato descritto lo sviluppo di un metodo sperimentale per la misura della forza di attrito di guarnizioni pneumatiche a labbro. Il metodo prevede l'utilizzo di un tribometro standard da laboratorio opportunamente modificato attrezzato in modo da riprodurre in modo più fedele possibile le condizioni di montaggio delle guarnizioni.
I risultati mostrano che con la metodologia descritta è possibile valutare il comportamento tribologico in termini di forza di attrito senza necessità di realizzare specifici banchi prova.
Un possibile sviluppo futuro di questa attività potrà essere la progettazione di un dispositivo che riproduca le condizioni di pressurizzazione delle camere del cilindro pneumatico durante le prove.

Bibliografia

[1] Belforte, G., D'Alfio, N., and Raparelli, T., 1989, "Experimental Analysis of Friction Forces in Pneumatic Cylinders," J. Fluid Control, 20(1), pp. 42–60.
[2] Belforte, G., Mattiazzo, G., Mauro, S., and Tokashiki, L. R., 2003, "Measurement of Friction Force in Pneumatic Cylinders," Tribotest J., 10(1), pp. 33–48.
[3] Schroeder, L. E., and Singh, R., 1993, "Experimental Study of Friction in a Pneumatic Actuator at Constant Velocity," ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control,
115(3), pp. 575–577.
[4] Kazama, T., and Fujiwara, M., 1999, "Experiment on Frictional Characteristics of Pneumatic Cylinders," 4th JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, pp. 453–458.
[5] Belforte, G., Manuello, A., and Mazza, L., 2013, "Test Rig for Friction Force Measurements in Pneumatic Components and Seals," Proc. Inst. Mech. Eng. Part J, 227(1), pp. 43–59.
[6] L. Mazza, G. Belforte, Analytical/Experimental Study of the Contribution of Individual Seals to Friction Force in Pneumatic Actuators, Journal of Tribology, 139, 022202/1-10, 2017
[7] Wassink, D. B., Lenss, V. G., Levitt, J. A., and Ludema, K. C., 2001, "Physically Based Modeling of Reciprocating Lip Seal Friction," ASME J. Tribol., 123(2), pp. 404–412.
[8] Salant, R. F., Maser, N., and Yang, B., 2007, "Numerical Model of a Reciprocating Hydraulic Rod Seal," ASME J. Tribol., 129(1), pp. 91–97.
[9] Pinedo, B., Aguirrebeita, J., Conte, M., and Igartua, A., 2014, "Tri-Dimensional Eccentricity Model of a Rod Lip Seal," Tribol. Int., 78, pp. 68–74.
[10] Harea, E., Stocek, R., Machovsky, M., Study of friction and wear of thermoplastic vulcanizates: the correlation with abraded surfaces topology, Journal of Physics Conference Series, 2017, 843(1):012070.
[11] Bulut T, Temiz V, Parlar Z. "The effect of interference on the friction torque characteristics of TPU based rotary lip seals", Tribol Ind 2015; 37: 346-353.
[12] Belforte G, Conte M, Mazza L. "Low fiction multi-lobed seal for pneumatic actuators", Wear 2014; 320: 7-15.
[13] Belforte G, Conte M, Manuello A, Mazza L. "Performance and behavior of seals for pneumatic spool valves". Trib Trans 2011; 54: 237-246