

Analisi quantitativa di sperimentazioni su anelli radiali: caratteristiche del distacco al variare dei polimeri

Marco Silvestri, Edzeario Prati, Alessandro Tasora
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Parma, Italy
E-mail: silve@ied.unipr.it, prati@ied.unipr.it, tasora@ied.unipr.it

Keywords: viscoelasticità, anelli di tenuta, fluoroelastomero, edge detection

SOMMARIO: Il lavoro illustra lo sviluppo di un banco di prova per lo studio di tenute radiali a labbro che utilizza le tecniche della visione industriale per misurare le caratteristiche del distacco tra labbro ed albero che possono condurre a perdite di lubrificante e quindi al danneggiamento dei componenti meccanici coinvolti. Le prove sono state condotte sia su componenti in NBR, così da poter essere confrontate con studi precedenti che confermano i nuovi riscontri sperimentali, sia con tenute in FPM. I risultati mostrano come le grandezze studiate dipendono dalla temperatura del lubrificante.

1. INTRODUZIONE

Il contenimento dei fluidi lubrificanti e la protezione da agenti inquinanti esterni (polvere, impurità) costituiscono due problematiche estremamente comuni nella meccanica delle macchine e in particolare in tutti i casi in cui organi in movimento, tipicamente alberi rotanti, mettono in comunicazione le zone protette tramite carter o coperchi con l'ambiente esterno.

In passato l'interesse nello studio di queste problematiche è stato legato soprattutto alla identificazione delle condizioni che possono portare ad un cedimento degli organi di tenuta e di conseguenza al danneggiamento degli organi meccanici coinvolti.

Recentemente, anche per effetto di norme tecniche e legislative, si può riscontrare un rinnovato interesse per il problema del contenimento di fluidi inquinanti, non solo in caso di rottura del sistema ma anche durante il normale funzionamento, in relazione all'impatto ambientale determinato da eventuali perdite. Tra i documenti più rilevanti a questo riguardo è opportuno ricordare la direttiva 96/61/EC detta "IPPC", acronimo del titolo *Integrated Pollution Prevention and Control* che prevede l'obbligo, a partire dal 30 ottobre 2007, di implementare le "best available techniques", anziché le "best available techniques not entailing excessive cost" indicate dalle precedenti normative IPC.

Un altro ambito nel quale queste tematiche rivestono particolare rilevanza è quello degli ambienti produttivi che non possono tollerare la fuoriuscita di fluidi contaminanti, come gli impianti farmaceutici ed alimentari, per i quali la scelta degli organi di tenuta è ristretta all'impiego di polimeri siliconici (polidimetilsilossano) o di fluoroelastomeri che permettono la realizzazione di articoli atossici.

Recenti studi [Amabili, 2000] condotti presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale di Parma hanno permesso di consolidare una approfondita conoscenza del fenomeno del distacco labbro-albero e del legame tra la portata del fluido perduto e la velocità di rotazione dell'albero impiegando anelli di tenuta in polimeri a base nitrilica (NBR). Per le considerazioni appena esposte, si ritiene molto significativo procedere con una rigorosa indagine finalizzata a stabilire se i modelli sviluppati ed i comportamenti rilevati nel caso delle tenute nitriliche possono essere applicati anche ad altri materiali

il cui utilizzo è destinato ad aumentare considerevolmente nell'immediato futuro.

2. ANELLI DI TENUTA

Gli anelli di tenuta per alberi rotanti sono dispositivi largamente impiegati in meccanica allo scopo di contenere il lubrificante, impedire l'ingresso di contaminanti, separare fluidi o confinare la pressione. Poiché si tratta di componenti di basso costo, limitato ingombro e che tollerano vibrazioni o limitate eccentricità radiali, essi trovano largo impiego nelle più diverse tipologie di macchine e in presenza di condizioni operative anche estreme. In letteratura è ben documentato come alcuni parametri geometrici (interferenza di montaggio, eccentricità statica, eccentricità dinamica) risultino fondamentali per caratterizzarne le condizioni di funzionamento [Müller, 1987].

L'interferenza di montaggio è la semidifferenza tra il diametro dell'albero e il diametro interno della tenuta. Si tratta di un parametro fissato dal costruttore il cui rispetto è fondamentale per assicurare la corretta pressione di contatto sulla superficie del labbro.

L'eccentricità statica è costituita dalla distanza tra il centro di rotazione dell'albero e il centro della circonferenza interna della tenuta. Questa grandezza determina una distribuzione delle pressioni di contatto non uniforme lungo il profilo del labbro, determinando una zona nella quale l'interferenza di montaggio viene ad assumere un valore inferiore a quello nominale, dove l'eventuale distacco tra labbro e albero è facilitata.

L'eccentricità dinamica è data dalla distanza tra il centro geometrico della sezione dell'albero e il centro di rotazione della stessa. Evidentemente la presenza di tale eccentricità, di fatto sempre presente nelle applicazioni pratiche, provoca una oscillazione radiale dei punti del labbro a contatto con l'albero la cui frequenza corrisponde alla velocità di rotazione dell'albero stesso.

Complessivamente, anche nella condizione statica più sfavorevole, quando cioè gli allontanamenti tra labbro ed albero dovuti alle due eccentricità vengono a trovarsi nella stessa porzione di circonferenza, l'interferenza di montaggio permette di compensare le tolleranze descritte garantendo la continuità del contatto, sia pure con una pressione inferiore a quella media teorica.

Al variare delle condizioni operative, però, la capacità dell'insieme del dispositivo (labbro più molla) di mantenersi aderente all'albero si riduce, realizzando il fenomeno del distacco e determinando una perdita di fluido lubrificante. Precedenti studi hanno evidenziato che vi sono in particolare tre parametri che giocano un ruolo significativo a riguardo: ciclo di invecchiamento, velocità di rotazione e temperatura [Colombo, 2001].

Come è intuitivo, esiste comunque un limite della frequenza della sollecitazione dinamica, e quindi della velocità di rotazione dell'albero, oltre al quale il comportamento dell'anello di tenuta si allontana da quello di un corpo elastico ideale e, in particolare, il ritardo della risposta del materiale alla sollecitazione diventa critico. Tale limite viene considerevolmente abbassato sia dal ciclo di vita della tenuta, le cui prestazioni presentano un certo peggioramento nel corso dei primi cicli di lavoro per poi raggiungere una condizione di regime [Amabili, 2000], sia dalla temperatura del sistema, che influisce in maniera determinante sul valore del modulo di elasticità del materiale, in particolare in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa.

Nel campo specifico delle tenute radiali i materiali di più largo impiego sono:

- NBR: Butadiene-acrilonitrile, resistente agli oli minerali e ai grassi con temperature di esercizio comprese tra -40 e 100 °C.

- ACM: Acrilato di etile, adatto per tenuta di oli minerali e grassi additivati, con temperature di esercizio comprese tra -20 e 150 °C.
- FPM/FKM: Polimero fluorurato noto con il nome commerciale di Viton®, adatto ad un vasto campo di applicazioni e con temperature di esercizio comprese tra -60 e 180 °C. È disponibile una versione speciale per l'impiego in ambiente alimentare in grado di contenere efficacemente liquidi acquosi.
- VMQ: Polimero siliconico dotato di ottima elasticità e medie proprietà meccaniche. Ha temperature di esercizio comprese tra -25 e 200 °C.

La figura 1 mostra, a titolo d'esempio, le prescrizioni di un costruttore (BRC Bearings Ltd.) per l'utilizzo di queste diverse tipologie al variare delle condizioni operative. Si può osservare come una stima approssimativa del calore generato sul labbro della tenuta dipenda dalla velocità periferica della superficie di contatto e quindi dal diametro dell'albero.

In particolare, le prove illustrate nel presente lavoro mettono a confronto i risultati ottenuti con guarnizioni in NBR di durezza Shore A 70 (ISO R868 e ASTM D2240) e tenute in FPM di durezza Shore A 85.

3. L'APPARATO SPERIMENTALE

Il banco di prova è costituito da tre sottosistemi: una macchina con un albero rotante che riproduce le effettive condizioni operative per gli anelli di tenuta oggetto della ricerca, un circuito dell'olio che permette il controllo della temperatura e del livello dello stesso e il sistema di visione utilizzato per misurare la presenza di distacco fra labbro ed albero.

La macchina di prova è azionata da un motore elettrico a corrente continua che, tramite una cinghia dentata, mette in movimento un albero che termina con un disco di profilo circolare a contatto con il labbro della tenuta. L'eccentricità dinamica del disco può essere regolata con continuità nel campo di valori compreso tra 0 e 0,52 mm per mezzo di un accoppiamento conico; la posizione della scatola di contenimento dell'olio e di sostegno della guarnizione può essere regolata sia verticalmente che trasversalmente per ottenere il valore di eccentricità statica desiderato.

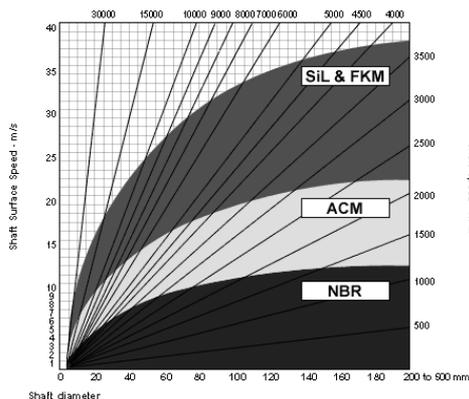


Figura 1: campi di impiego dei diversi polimeri in commercio.

Tale valore risulta dal compromesso tra l'esigenza di restringere il campo inquadrato grazie all'individuazione zona di distacco preferenziale ben precisa, e la necessità di mantenere un campo di variabilità abbastanza ampio per i valori dell'eccentricità dinamica, che è una delle variabili indipendenti i risultati delle prove devono essere messi in relazione. La sessione di prove qui presentata è stata condotta con eccentricità statica pari a 0,22 mm.

Il circuito del lubrificante permette di controllare sia la temperatura che il livello del fluido nel carter; come è mostrato in figura 2, il circuito è composto da un radiatore per l'olio, una pompa ad ingranaggi, un elemento riscaldatore all'interno del carter e da sensori di temperatura e di livello.

Al fine di garantire stabilità e robustezza al circuito di controllo, l'aspetto più critico è dato dalla portata del fluido in uscita dalla scatola di contenimento, che risulta relativamente ridotta, specialmente a temperature non elevate.

Dato che, ovviamente, non è possibile pressurizzare tale ambiente per non perturbare il comportamento del labbro (a questo scopo è stata anche realizzata una foratura sulla sommità della scatola), il fluido fuoriesce unicamente per effetto della gravità con un battente modesto ed in definitiva la portata dell'olio caldo in uscita limita la quantità di calore che è possibile sottrarre ad alte velocità.

Un considerevole miglioramento è stato ottenuto aggiungendo una valvola di by-pass regolabile sul condotto di mandata della pompa e programmando il software di controllo in modo da iniziare il ricambio dell'olio nella scatola al crescere della velocità di rotazione anticipando in qualche modo la formazione del calore per attrito, così che il transiente termico mantiene una velocità limitata in tutte le condizioni di funzionamento ed il controllo rimane stabile.

In particolare, è possibile mantenere il fluido in condizioni di regime nell'intervallo di temperatura compreso tra 30 e 70 °C con l'accuratezza di ± 1 °C. La temperatura è rilevata da una sonda Pt-100 alloggiata all'interno della scatola.

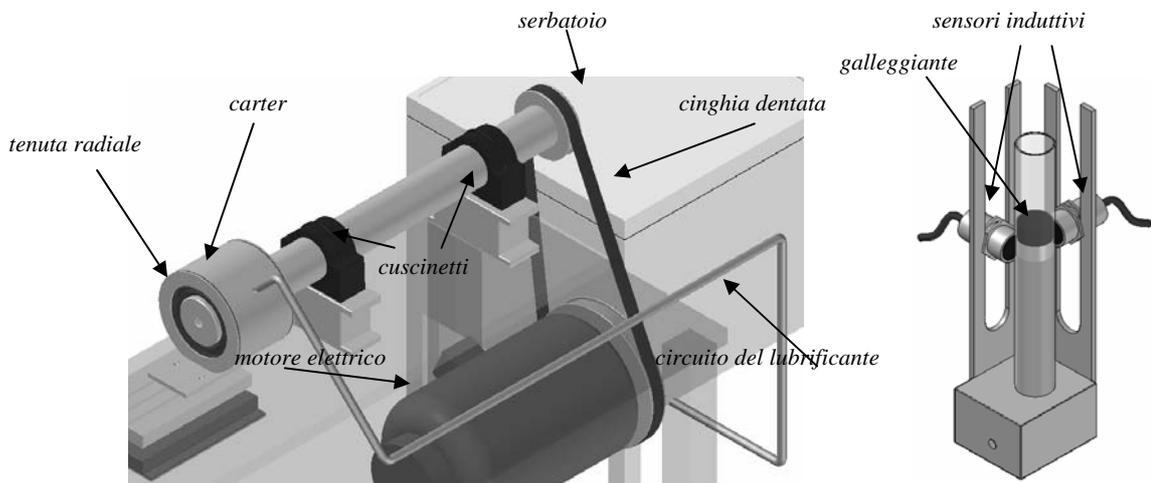


Figura 2: la macchina di test.

Il sistema di visione implementato è composto dai seguenti elementi principali:

- Telecamera ad alta velocità;
- Retroilluminatori e illuminatore frontale;
- PC con software di acquisizione e di analisi;

La telecamera utilizzata, modello Dalsa CA-D6-0256W permette di acquisire fino a 955 frames al secondo con una risoluzione di 256×256 pixel. L'elevata frequenza permette di studiare il moto relativo tra labbro e albero in tutte le sue fasi ma richiede, evidentemente, uno *shutter time* (tempo durante il quale la luce può sensibilizzare il sensore CCD) molto breve che deve essere compensato con una illuminazione particolarmente potente.

L'illuminazione frontale è ottenuta tramite un faro alogeno (mantenuto acceso solo per il tempo strettamente necessario per non alterare lo stato termico della tenuta) che permette di riconoscere con buon dettaglio gli elementi nel campo inquadrato. L'apertura tra labbro ed albero è messa in evidenza tramite un retroilluminatore costituito da una lampada alogena ed un fascio di fibre ottiche (cfr. figura 3) che entrano nella scatola di contenimento tramite apposite forature realizzate sul coperchio posteriore.

4. L'ANALISI DELL'IMMAGINE

Il software di analisi è finalizzato alla misurazione dell'ampiezza dell'apertura espressa come porzione della circonferenza di contatto tra labbro ed albero.

A questo scopo si è implementato un tool di analisi di tipo *edge detector* in grado di rilevare la presenza di *transizioni* (passaggi da chiaro a scuro e viceversa): l'analisi dell'immagine viene svolta identificando il centro dell'albero, posizionando una serie di tool *edge detector* lungo la circonferenza come mostrato nella parte sinistra della figura 4 e verificando in prima approssimazione la presenza dell'apertura.

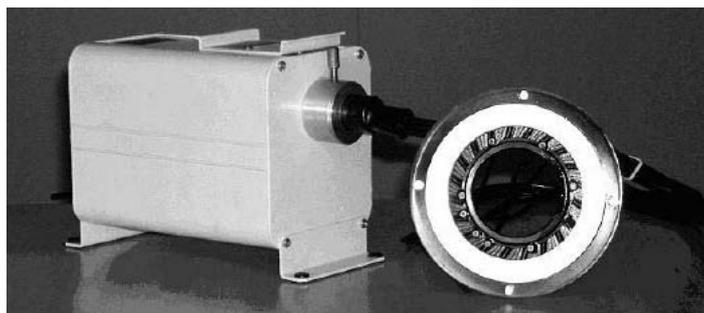


Figura 3: Fibre ottiche montate sul coperchio posteriore.

Il passaggio successivo consiste nel posizionamento dei tool *edge detector* in direzione tangenziale rispetto alla circonferenza di contatto in prossimità del risultato precedente (cfr. parte destra della figura 4), in modo tale da ottenere una stima più rigorosa dei limiti dell'arco misurato.

Il tool implementato permette di realizzare una analisi sub-pixel con un algoritmo che si richiama all'operatore di Canny [Canny, 1986] con l'aggiunta di qualche utile accorgimento.

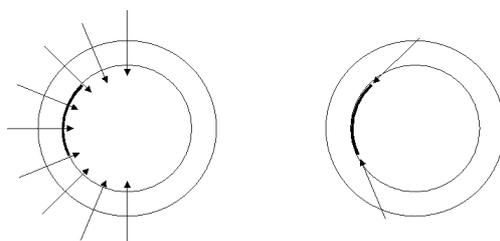


Figura 4: strategia di posizionamento dei tool di misura.

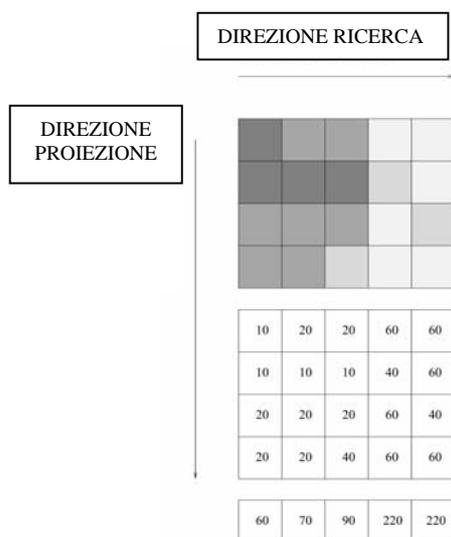


Fig.5. Metodo di proiezione (secondo la griglia)

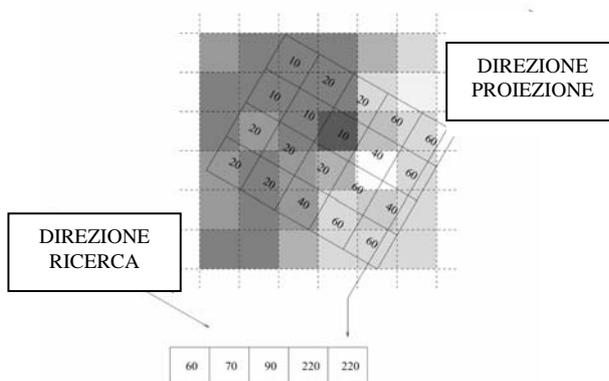


Fig. 6. Metodo di proiezione (direzione generica)

La prima elaborazione consiste nella proiezione dell'immagine su una linea parallela alla direzione di ricerca. Se ad esempio si immagina la ricerca di un edge verticale all'interno di un rettangolo, la direzione di ricerca risulta quella orizzontale. L'operazione di proiezione consiste in questo caso nella somma di tutti i valori di grigio di ogni segmento verticale: se, ad esempio, l'area di ricerca consiste in un rettangolo di 80×30 pixel, dopo la proiezione si ha un vettore di 80 elementi, ciascuno dei quali corrisponde alla somma dei 30 valori con pari ascissa. La figura 5 illustra questo concetto.

In generale però la direzione di ricerca dell'edge non coincide con quella dei pixel che compongono l'immagine. In figura 6 è illustrato il caso generale, nel quale, come si vede, ogni elemento della matrice che viene sommato si ottiene come media pesata dei livelli di grigio dei pixel ai quali è sovrapposto.

Il vettore risultante dalla proiezione è filtrato per mezzo di una trasformazione lineare volta a individuare il massimo gradiente dei livelli di grigio, che si presume corrisponda alla posizione dell'edge:

$$R_i = G_2 \cdot P_{i+2} + G_1 \cdot P_{i+1} - G_1 \cdot P_{i-1} - G_2 \cdot P_{i-2} \quad (4.1)$$

Dove i termini P sono il contenuto del vettore della proiezione e i coefficienti G sono ricavati derivando la curva di distribuzione di Gauss [Canny, 1986]. La figura 7 illustra l'algoritmo riassunto nella espressione (4.1).

I massimi relativi all'interno del vettore filtrato indicano le possibili posizioni dell'edge con una risoluzione pari alla dimensione del pixel: per ottenere una risoluzione più elevata, il contenuto del vettore è interpolato mediante una curva Bspline. Il fondamento di questa operazione è costituito dal fatto che ogni pixel non contiene semplicemente una informazione binaria, ma un valore ad 8-bit indicativo di quanto l'area del pixel sia occupata dal una porzione di immagine chiara o scura.

Questa ipotesi è tanto più accettabile quanto più l'area di ricerca del tool è larga (ovvero, la proiezione è effettuata su un numero elevato di elementi) e la direzione di ricerca dell'edge è impostata correttamente, ovvero ortogonalmente alla transizione cercata.

Tutti i flessi orizzontali della funzione interpolata sono possibili posizioni dell'edge. La scelta tra i punti candidati classicamente può essere effettuata secondo diverse strategie, quali il valore del contrasto o la posizione attesa. Nell'applicazione in esame si è individuata la migliore soluzione di compromesso in una strategia intermedia.

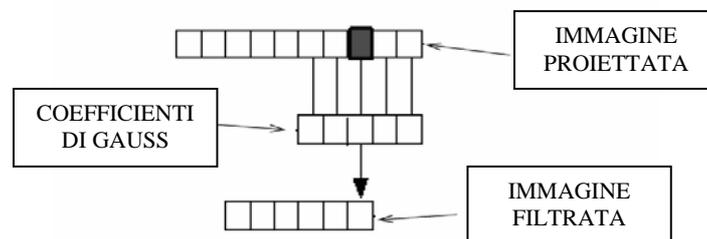


Figura 7: filtraggio mediante coefficienti di Gauss.

Infine i risultati in pixel vengono trasformati in millimetri tramite un coefficiente di calibrazione che viene ricalcolato ad ogni analisi, così da poter tenere conto di eventuali differenze nel posizionamento della telecamera e nella regolazione del teleobiettivo. La calibrazione viene svolta individuando il centro geometrico del disco in rotazione e quindi il valore di alcuni raggi, la cui media viene posta in corrispondenza col valore noto del pezzo meccanico.

Un'ultima osservazione deve essere dedicata alla misura della distanza tra labbro ed albero in direzione radiale. Tale parametro, già misurato per mezzo del trasduttore estensimetrico illustrato in [Silvestri, 2004], risulta, con l'attuale banco di prova, di difficile approccio. Come l'ingrandimento riportato nella parte destra della figura 8 mostra, infatti, lo shutter time è talmente ridotto che attraverso l'apertura tra labbro e albero è possibile riconoscere le posizioni delle singole fibre ottiche. Questo però significa che le immagini acquisite non permettono una stima diretta della massima ampiezza dell'apertura, che potrebbe eventualmente cadere in una zona d'ombra.

La difficoltà potrebbe essere superata tramite alcuni artifici di calcolo (che comporterebbero un notevole incremento del margine di errore associato alla misura) o, meglio, utilizzando un illuminatore a luce diffusa che possa essere alloggiato all'interno del carter della macchina utilizzata.

5. RISULTATI

Le prove condotte evidenziano un legame che si ripete con notevole coerenza tra la frequenza della sollecitazione alla quale si presenta il distacco e la temperatura del fluido contenuto. Tale relazione è in buon accordo con modelli numerici di simulazione FEM in precedenza sviluppati [Silvestri, 2004].

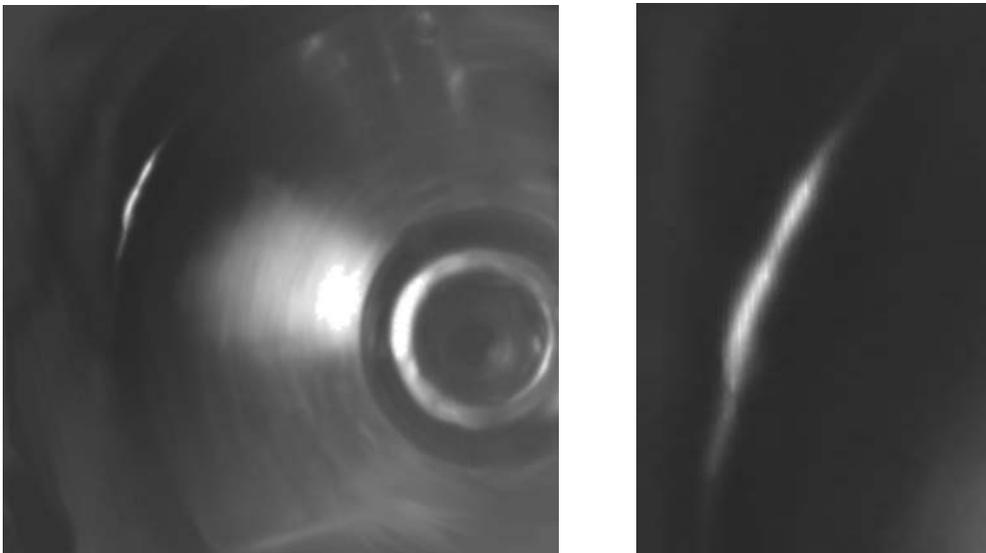


Figura 8: esempio di immagine scattata in presenza del distacco e ingrandimento del particolare.

I grafici riportati in figura 9 e 10 evidenziano come il valore dell'eccentricità dinamica influenza il comportamento della tenuta, determinando una traslazione delle curve di frequenza in funzione della temperatura.

Una seconda sequenza di prove è stata finalizzata a riconoscere in che misura si abbia isteresi nel comportamento del labbro: in particolare, una volta avvenuto il distacco e mantenendo la temperatura costante, si è cercata la frequenza della sollecitazione capace di fare riprendere il normale funzionamento. I diagrammi nei riquadri a sinistra delle figure 11 e 12 mostrano i valori assoluti dei regimi di rotazione per entrambi i polimeri studiati, mentre gli istogrammi nei riquadri a destra delle stesse figure mettono in evidenza le differenze tra le velocità corrispondenti, rispettivamente, al distacco ed alla ripresa del contatto. Questa grandezza sembra manifestare una correlazione inversa col valore assoluto della velocità.

I diagrammi in figura 13 e 14, infine, riportano i valori dell'arco del distacco misurati tramite il sistema di visione. Le analisi, ripetute su cinque serie di immagini diverse per ciascun punto riportato sul grafico, hanno fornito risultati caratterizzati da una ripetibilità pari a $\pm 3\%$.

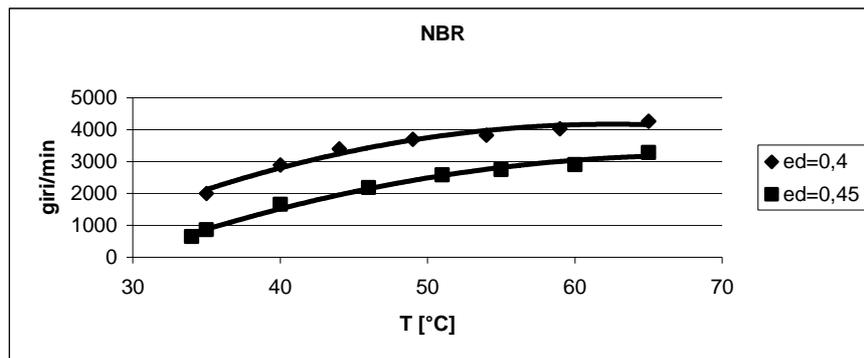


Figura 9: frequenza di distacco al variare della temperatura (NBR).

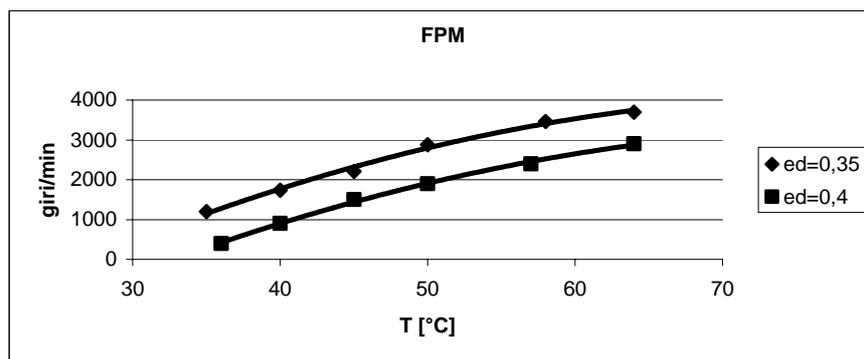


Figura 10: frequenza di distacco al variare della temperatura (NBR).

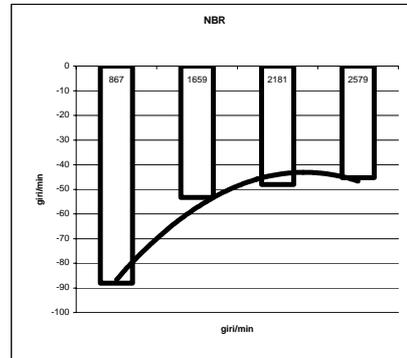
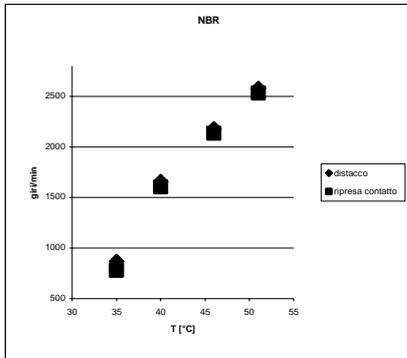


Figura 11: distacco e ripresa del contatto al variare della temperatura (NBR).

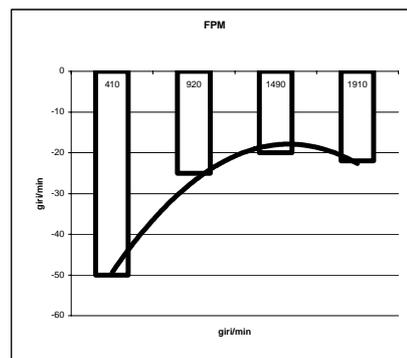
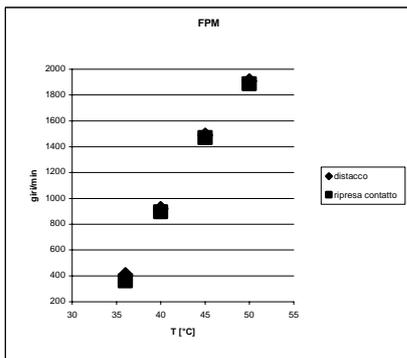


Figura 12: distacco e ripresa del contatto al variare della temperatura (FPM).

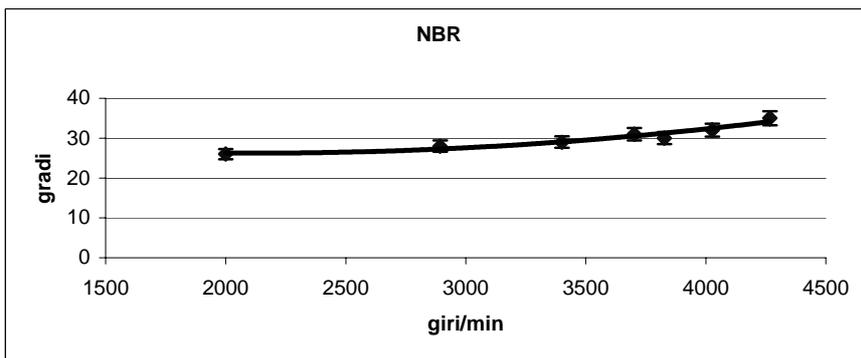


Figura 13: misura dell'arco di distacco (NBR).

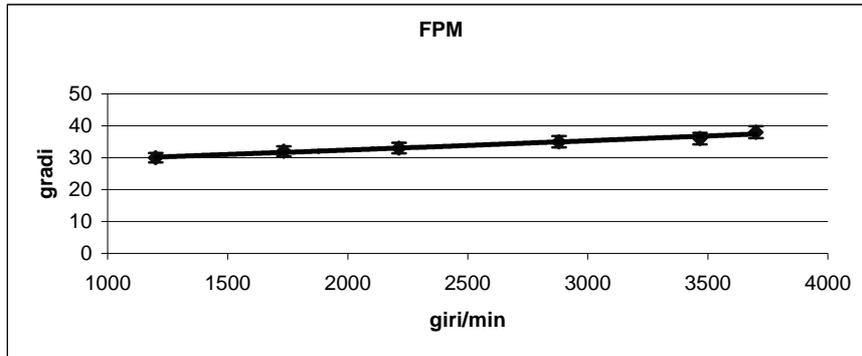


Figura 14: misura dell'arco di distacco (FPM).

6. CONCLUSIONI

Si è realizzato un sistema di misura che utilizza le tecniche della visione industriale per studiare il comportamento di anelli di tenuta in elastomero in condizioni controllate di temperatura del lubrificante e mettendo a confronto dispositivi realizzati con diverse tipologie di polimero.

I risultati mostrano un legame tra la temperatura del lubrificante e la frequenza della sollecitazione che determina il distacco del labbro dall'albero. Tale legame si ripete al variare dei parametri considerati ed è in accordo con le simulazioni numeriche condotte in precedenza.

La misura dell'ampiezza dell'arco del distacco viene effettuata automaticamente da un software di analisi specificamente sviluppato e fornisce risultati con un soddisfacente grado di ripetibilità. La misura della distanza massima tra labbro ed albero in direzione radiale non è al momento ricavabile a causa della insufficiente retroilluminazione della zona di indagine. La soluzione di questo problema costituisce, insieme all'estensione del metodo ad altre famiglie di materiali di interesse industriale, lo sviluppo al momento prevedibile di questa ricerca.

7. RINGRAZIAMENTI

Il presente studio fa parte di un programma di ricerca finanziato con fondi dell'Università degli Studi di Parma.

Si ringraziano il Dott. Marchesi e il Dott. Mantovani per la collaborazione prestata nell'effettuazione delle prove.

References:

- Amabili M. et al. 2000. *Leakage of Radial Lip Seals at Large Dynamic Eccentricities*, Proceedings of 16th International Conference on Fluid Sealing, September 18-20, Brugge, Belgium: 321-333.
- Müller, H.K. 1987. *Concepts of Sealing Mechanism of Rubber Lip Type Rotary Shaft Seals*, Proceedings of the 11th International Conference on Fluid Sealing, B.H.R.A, Paper K1: 698-709.
- Colombo, G. 2001. *Condizioni di tenuta con Guarnizioni Radiali per Alberi Rotanti*, Atti del XV Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata, 26-28 Settembre, Taormina, Italy.

- Canny, J. 1986. *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE Transactions on Patterns Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 6: 679-698.
- Silvestri, M. et al. 2004. *Dynamic Seals Behaviour under Effect of Radial Vibration*, Proceedings of 14th International Colloquium Tribology, Stuttgart, Germany: 1247-1254.
- Silvestri, M. et al. 2004. *Numerical Analysis of Sealing Conditions in Elastomeric Rings*, Proceedings of IV AITC, Rome, Italy, September 14-17: 509-606.