



# UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

STUDIO DELLA RECIPROCA USURA PROVOCATA DA  
ANELLI DI TENUTA A LABBRO SU ALBERI  
SOTTOPOSTI A DIVERSI TRATTAMENTI DI  
INDURIMENTO SUPERFICIALE

A STUDY OF THE MUTUAL WEAR DUE TO LIP SEALS  
ON SHAFTS EXPOSED TO VARIOUS TREATMENTS OF  
SURFACE HARDENING

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. Edzeario Prati

Correlatori:

Prof. Ing. Alessandro Tasora

Tesi di laurea di:  
Diego Bettega

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

# INDICE

	Pag.
Cap. 1: INTRODUZIONE	3
Cap 2: ALBERO	4
2.1 Caratteristiche generali	4
2.2 Bonifica	7
2.3 Cementazione	9
2.4 Nitrurazione	11
2.5 Cromatura	13
2.6 Rivestimento ceramico	16
Cap 3: ANELLI DI TENUTA	19
3.1 Caratteristiche generali	19
3.2 Struttura della guarnizione	21
3.3 Funzionamento	25
Cap 4: STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	31
4.1 Introduzione	31
4.2 Attrezzatura di prova	31
4.3 Sistema elettronico	34
4.4 Sistema acquisizione dati	36
Cap 5: STUDIO TEORICO	39
Cap 6: PROVE SPERIMENTALI	50
6.1 Introduzione	50
6.2 Modalità sperimentale	51
6.3 Dati rilevati	53
6.4 Elaborazione dati raccolti	58
6.5 Confronto	59
Cap 7: OSSERVAZIONI E CONCLUSIONI	61
BIBLIOGRAFIA & SITOGRAFIA	63
RINGRAZIAMENTI	64

## Capitolo 1

# INTRODUZIONE

Le guarnizioni a labbro sono dei prodotti largamente utilizzati nell'ambito meccanico, poiché evitano la fuoriuscita di fluido lubrificante, ma allo stesso tempo limitano l'ingresso di particelle estranee nella zona nel quale è contenuto il fluido.

Questo studio tratta principalmente il legame tra la guarnizione, l'olio lubrificante e la superficie dell'albero a contatto con il labbro della tenuta. Il fenomeno della lubrificazione riguarda principalmente la reciproca relazione tra questi elementi.

Nonostante l'ampio utilizzo degli organi di tenuta nelle applicazioni meccaniche [1], non si è ancora giunti a una formulazione teorica definitiva riguardante il processo di lubrificazione. Le ragioni vanno ricercate nella numerosità e complessità dei fenomeni coinvolti.

Il movimento relativo fra il labbro della tenuta e la superficie dell'albero rotante provoca una reciproca usura tra i due elementi. Durante l'indagine sperimentale si cercherà di fare chiarezza sulla correlazione tra l'asportazione di materiale dagli elementi analizzati e i trattamenti termici applicati all'albero. I risultati saranno ottenuti attraverso dei test su un banco di prova, che forniscono valori numerici riguardanti il momento resistente provocato dal labbro della guarnizione sull'elemento rotante. I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando un foglio di calcolo elettronico per migliorarne la comprensione e l'analisi.

## Capitolo 2

# ALBERO

### 2.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Il corretto contatto tra l'albero e il labbro della guarnizione è di fondamentale importanza ai fini dell'efficienza e della durata della tenuta. Per condurre uno studio approfondito riguardante quest'applicazione, è essenziale considerare tutti i requisiti di tolleranza dimensionale, di durezza e di rugosità superficiale dell'albero.

La durezza minima richiesta per l'albero è di 45 HRC. Questo parametro aumenta al crescere della velocità lineare della superficie dell'albero a contatto con la guarnizione. A velocità di 4 m/s la durezza minima richiesta è di 55 HRC; a 10 m/s di 60 HRC [3]. La durezza e la profondità d'indurimento superficiale variano secondo diversi fattori di condizioni ambientali di esercizio, come la velocità angolare dell'albero e il tipo di fluido da confinare.

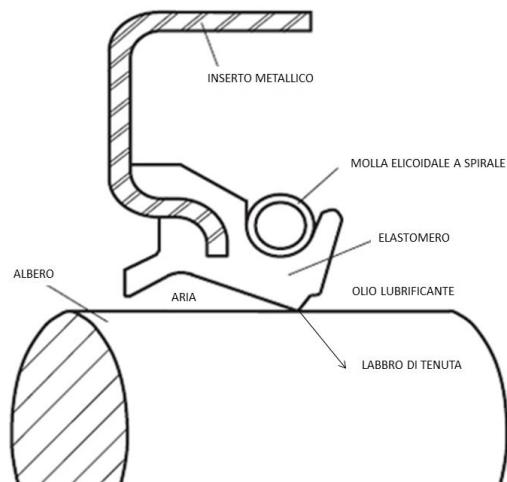
Una buona efficacia della lubrificazione è, inoltre, legata alla rugosità dell'albero. Questo parametro deve essere compreso tra  $R_a$  0,2÷0,8  $\mu\text{m}$  e  $R_z$  1÷5  $\mu\text{m}$ , con  $R_{z \max} \leq 6,3 \mu\text{m}$ , dove  $R_a$  indica la misura della rugosità ed esprime il valore medio aritmetico degli scostamenti del profilo reale della superficie rispetto alla linea media, mentre  $R_z$  indica la media aritmetica dei valori assoluti dei cinque picchi più alti e delle cinque valli più profonde, compresi in un intervallo di base. Come si vedrà in seguito, la rugosità superficiale svolge un ruolo essenziale per il buon funzionamento del sistema di lubrificazione.

Per molto tempo, tuttavia, tutti gli studi teorici e numerici sul comportamento delle tenute a labbro hanno considerato la superficie dell'albero perfettamente liscia, dato che il valore di  $R_a$  è pari solo al 10% di quello del labbro della tenuta.

Come indicato in precedenza, il valore di  $R_a$  dovrà essere limitato sia inferiormente, sia superiormente. L'utilizzo di superfici troppo rugose, infatti, genera molto attrito. Come è noto, l'attrito comporta un aumento di calore e usura precoce del labbro di tenuta, con una conseguente perdita delle sue funzionalità. Se, invece, la superficie dell'albero è eccessivamente liscia, non si riesce a formare lo strato del meato lubrificante tra le micro asperità della zona di contatto, portando a un danno termico dello spigolo di tenuta e una conseguente perdita del fluido lubrificante [2]. Gli spazi fra le asperità della superficie dell'albero fungono da riserva per l'olio in condizioni statiche, aiutando la formazione del sottile film lubrificante durante i primi istanti di rotazione. Questo spiega il motivo per cui è sconveniente operare con alberi eccessivamente lisci.

In conclusione, si può affermare che la rugosità dell'albero può produrre effetti rilevanti sul comportamento delle tenute a labbro dal punto di vista idrodinamico.

Vanno evitati anche segni o graffi di qualsiasi tipo che possono alterare lo strato di lubrificante contenuto nel menisco.



*Figura 1 - Schema anello di tenuta*

Il meccanismo di tenuta delle guarnizioni radiali per alberi rotanti è caratterizzato da un membro in materiale elastomerico circolare, nella cui sezione è introdotto un inserto metallico rigido, come illustrato in Figura 1.

Il metodo maggiormente utilizzato per la lavorazione superficiale degli alberi è la rettifica a tuffo, perché produce una superficie senza rigature elicoidali. Infatti, la rettifica avviene senza movimento assiale della mola. Un altro processo impiegato è la tornitura dura, in cui per ottenere una corretta superficie, devono essere rispettati parametri come il materiale dell'utensile, la velocità e la profondità di taglio. La ragione principale della scelta di questo tipo di lavorazione sta nella sua economicità, tuttavia comporta numerosi svantaggi. Infatti, l'albero deve essere lavorato circolarmente e senza rigature elicoidali in corrispondenza della zona di contatto, solchi che, però, sono creati sugli alberi torniti. In tal modo, potrebbe essere compromesso il corretto funzionamento della tenuta: gli intagli elicoidali generati fungono da micro filettatura, che consente la fuga di olio se orientata in modo tale da spingere il lubrificante verso l'esterno. La direzione di spinta dipende ovviamente dal verso di rotazione dell'albero ed è per questo motivo che se l'albero viene realizzato attraverso un processo di tornitura, bisogna prestare molta

attenzione a montare la guarnizione in modo tale che i solchi tendano a trattenere il lubrificante all'interno della camera a olio.

Per ottenere il giusto precarico del labbro della tenuta montata sull'albero, è necessario osservare i requisiti di tolleranza dimensionale. Occorre, inoltre, rispettare le tolleranze geometriche di eccentricità. Infatti, l'albero posto in rotazione deve avere scostamenti ridotti allo scopo di evitare il rischio che il labbro della guarnizione, a causa della sua inerzia, non sia più in grado di riassestarsi lungo il profilo dell'albero, non riuscendo così più a garantire l'assenza di perdite di fluido lubrificante.

Questo studio tratta l'analisi dell'usura provocata da una guarnizione su alberi di acciaio, sui quali sono stati fatti diversi trattamenti termici d'indurimento superficiale: bonifica, cementazione, nitrurazione, cromatura e rivestimento ceramico. Per ovvie ragioni pratiche, non sono stati eseguiti i vari trattamenti sullo stesso albero, ma sono stati realizzati cinque mozzi da poter calettare all'albero mediante organi filettati. Su ogni mozzo è stata realizzata una differente lavorazione. Il materiale utilizzato per tutti i pezzi è acciaio C40 bonificato, ad eccezione del particolare sul quale è stata eseguita la cementazione. In quest'ultimo caso, è stato impiegato acciaio 18NiCrMo5, per il basso tenore di carbonio presente nel materiale.

In seguito saranno elencate le caratteristiche principali dei trattamenti d'indurimento superficiale analizzati in questo studio.

## 2.2 BONIFICA

La bonifica è un trattamento termico effettuato su particolari tipi di acciai. Consiste in un processo tempra seguita da rinvenimento.

Nella prima fase di tempra dell'acciaio, si riscalda il pezzo fino al raggiungimento temperatura di austenizzazione (circa 900 °C). In seguito si

esegue un brusco raffreddamento dell'acciaio, usando liquidi preposti alla riduzione termica di tale materiale. Questo permette di ottenere la martensite, una struttura a elevata durezza e notevole carico di rottura, ma con una resilienza piuttosto bassa, che può dar luogo a rotture in seguito a urti. L'acqua non è un ottimo mezzo temprante, perché nel momento in cui immersiamo l'acciaio nel liquido, si produce un cuscinetto di vapore intorno alla superficie. Il cuscinetto rappresenta un ostacolo per il raffreddamento, poiché ha una conducibilità termica molto bassa. Il raffreddamento è destinato a rallentare, e non si formerà la martensite: è necessario, quindi, produrre poco vapore. E' per questa ragione che si utilizza acqua con sali disioliti, cosicché la temperatura di ebollizione sale e si avrà una tensione di vapore molto bassa. Aggiungendo grossi quantitativi di sale si ottiene la Salamoia. Quest'ultima è ottima per ottenere Martensite, perché sulla superficie del pezzo di acciaio l'acqua evapora e resta il sale. Si viene a creare uno strato solido salino che funge da conduttore, permettendo la formazione della martensite. Può essere usato anche l'olio, facendo molta attenzione alla sua alta infiammabilità. Con acciaio di grosse dimensioni bisogna eseguire una tempra a doppio stadio per un raffreddamento graduale. Se si raffreddasse l'acciaio con uno sbalzo termico eccessivo, sulla superficie si creerebbero delle fessure dovute all'espansività del materiale. Tali fenditure potrebbero portare a una rottura dell'oggetto.

La martensite è una fase metastabile: si forma solo perché gli atomi di carbonio non riescono a fuoriuscire dal reticolato a causa dell'elevata velocità di raffreddamento che impedisce i moti diffusivi.

Dato che la martensite, in assenza di elementi leganti, si forma solo con una percentuale di carbonio superiore allo 0,2%, sotto questo limite non è conveniente eseguire un trattamento di bonifica sugli acciai, perché non possono essere temprati con efficacia. In genere gli acciai destinati a questo trattamento hanno lo 0,4-0,6% di C e sono appunto detti acciai da bonifica.

Dopo il processo di tempra, l'acciaio è sottoposto a un trattamento termico di rinvenimento. Si riscalda l'acciaio a una temperatura intermedia ( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) per ottenere proprietà meccaniche ottimali. In questo modo, si può ottenere una struttura sorbitica, cioè una miscela meccanica di ferrite e piccoli globuli di cementite. Grazie al rinvenimento diminuisce la fragilità, mantenendo al contempo una buona resistenza [3]. In Figura 2 viene illustrato il cilindro bonificato.

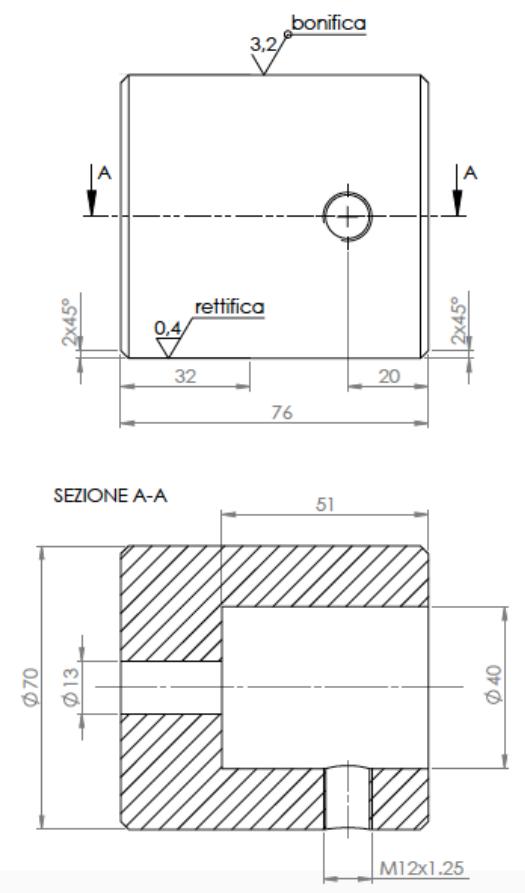
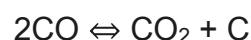


Figura 2 - Cilindro bonificato

### 2.3 CEMENTAZIONE

La cementazione e la nitrurazione sono definiti processi di termodiffusione in cui sono diffusi sulla superficie, rispettivamente, carbonio e azoto a caldo.

La cementazione è un processo metallurgico utilizzato per aumentare la resistenza all'usura degli acciai. Questa proprietà è conferita dall'arricchimento superficiale di carbonio (circa 0,8%), e la conseguente formazione di carburi. Conviene eseguire il trattamento su un acciaio dolce portato oltre la temperatura di austenizzazione (circa 900 °C), poiché l'austenite solubilizza meglio il carbonio che migra sulla superficie per diffusione. La reazione di equilibrio con cui è assorbito il carbonio è chiamata equilibrio di Boudouard



Il processo è seguito da rinvenimento a 150-180 °C per ridurre le tensioni interne prodotte dalla tempra, evitando di compromettere la durezza dello stato cementato. La durezza superficiale raggiunta è di 700 HV, la quale, tuttavia, subisce variazioni rilevanti per riscaldamenti a soli 200°C. I parametri che regolano l'efficacia del trattamento sono la temperatura, il tipo del reticolo cristallino e la differenza di concentrazione tra ambiente esterno e interno. E' per questa ragione che risulta conveniente utilizzare acciai dolci, con un tenore di carbonio minore dello 0,2%; in tal modo la forza motrice dovuta al gradiente di concentrazione è molto elevata [3].

In base ai materiali utilizzati, esistono diversi metodi di cementazione, ma l'ambiente di lavorazione in ogni sistema è sempre gassoso, poiché vi è la primaria necessità del trasporto operato dall'ossido di carbonio. A fine trattamento si otterrà uno strato superficiale cementato e duro. Nel caso preso in esame, il trattamento interessa uno strato superficiale di 0,7 mm. In Figura 3 viene illustrato il cilindro cementato.

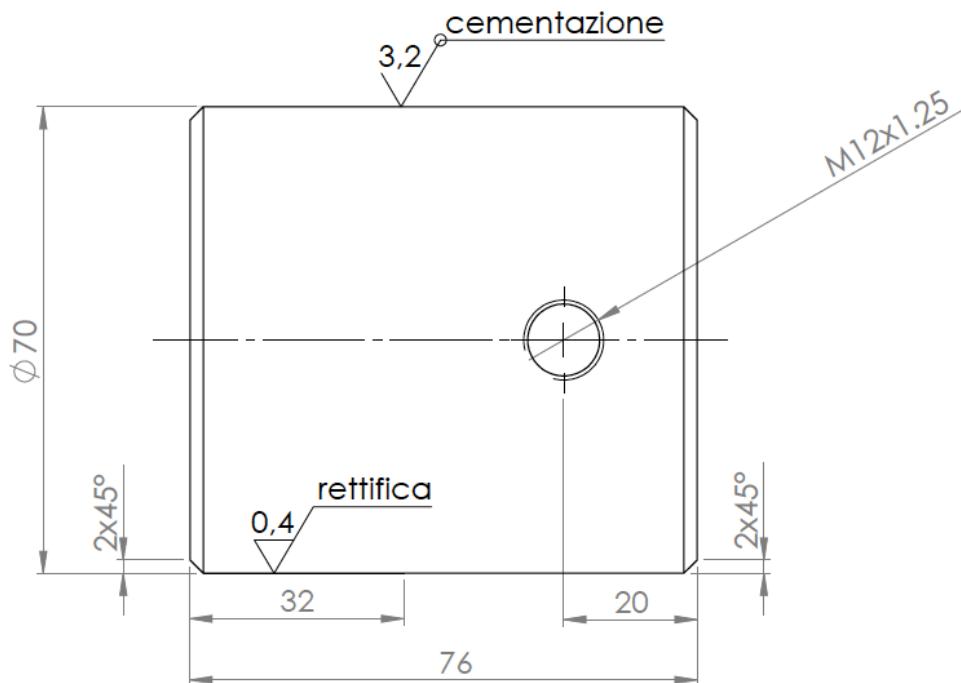


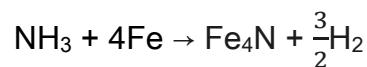
Figura 3 - cilindro cementato

## 2.4 NITRURAZIONE

La nitrurazione è un trattamento d'indurimento superficiale (900-1200HV), generalmente usato su un pezzo precedentemente bonificato. Questo trattamento non richiede un riscaldamento del materiale fino alla temperatura di austenizzazione. E' un processo condotto a temperature relativamente contenute a 480-570 °C per un ciclo di lavorazione molto lungo, della durata di circa 50 ore. Tali condizioni permettono una diffusione di azoto sulla superficie del particolare. Gli strati generati sono caratterizzati da un'ottima resistenza all'usura adesiva, al grippaggio e all'abrasione meccanica.

Analizzando la molecola di azoto molecolare ( $N_2$ ), si nota che tra i due atomi di azoto è presente un legame triplo. Questo è un tipo di legame molto difficile da rompere ed è per questa ragione che nei processi di nitrurazione si tratta il pezzo con ammoniaca ( $NH_3$ ), che, dissociandosi alla temperatura di 500°C

grazie all'effetto catalitico del ferro, permette di ottenere azoto atomico il quale, a sua volta, si diffonde nel reticolo cristallino dell'acciaio.



L'azoto forma con l'acciaio nitruri molto duri di natura diversa, che variano in funzione della composizione dell'acciaio, della percentuale di azoto diffusa e della temperatura di trattamento. Attraverso il diagramma Fe-N è possibile individuare i costituenti che l'azoto forma col ferro alle varie temperature [3].

Gli acciai nitrurati hanno una buona resistenza all'usura e non subiscono ossidazione. Per effetto della nitrurazione, i pezzi aumentano leggermente di dimensione (circa 10 micron per 100 mm) a causa dell'aumento di volume che si verifica nello strato superficiale.

I vantaggi di questo tipo di trattamento sono, quindi, una bassa temperatura di esercizio e contenute deformazioni. Inoltre, non è necessario temprare il particolare per conferire durezza. Gli aspetti più negativi, invece, sono elevati tempi di conduzione del processo e basse profondità massime ottenibili, di norma inferiori a 0,7 mm. Nel caso preso in esame, il trattamento interessa uno strato superficiale di 0,3 mm. In Figura 4 viene illustrato il cilindro nitrurato.

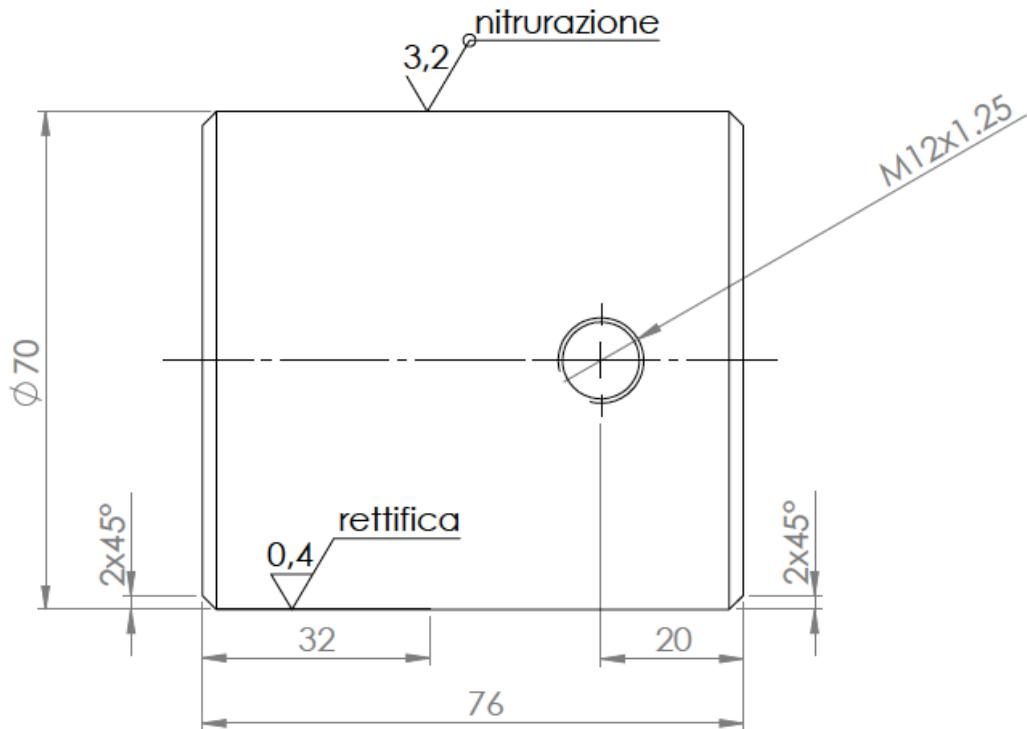


Figura 4 - Cilindro nitrurato

## 2.5 CROMATURA

La cromatura tecnica, meglio nota come cromatura dura a spessore (cromo duro), permette di ottenere rivestimenti funzionali di notevole durezza e resistenti all'usura e alla corrosione, con spessori compresi tra alcune decine di micron e 0,5 mm.

La diffusione dei processi di deposizione elettrolitica del cromo ha avuto inizio nel terzo decennio del ventesimo secolo. Questa tipologia di rivestimento è stata utilizzata in numerose applicazioni, grazie alle proprietà meccaniche acquisite anche con depositi di spessore molto limitato. Le principali caratteristiche conferite sono la resistenza all'ossidazione a caldo, la resistenza all'usura, all'abrasione, all'erosione e il basso coefficiente di frizione. La durezza superficiale dipende dalla struttura del cromo elettrodepositato.

I depositi di cromo rendono la superficie molto più dura degli acciai temprati.

La durezza Vickers è compresa fra  $1000 \text{ kg/mm}^2$  e  $1200 \text{ kg/mm}^2$ . La variabilità di questo valore dipende dalle condizioni di deposizione. Un'altra causa di discordanza dei dati è dovuta ai limitati spessori dei depositi, che sono anche caratterizzati da una fitta rete di cricature; perciò, depositi identici possono presentare differenti valori di durezza. In Figura 5 si può osservare il legame fra durezza e resistenza all'usura.

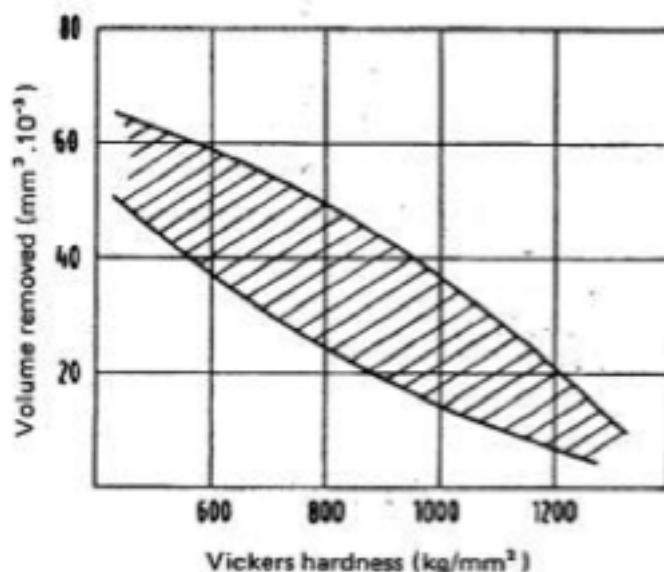


Figura 5 - Relazione tra durezza e volume di abrasione [3]

I valori della durezza Vickers e dei volumi abrasi sono stati racchiusi all'interno delle due curve. Si è visto che i depositi di cromo duro con  $\text{HV}=750-800 \text{ kg/mm}^2$  hanno una elevata resistenza ad usura poiché, utilizzando questi valori, il rapporto fra durezza e duttilità è molto favorevole (vedi Figura 6).

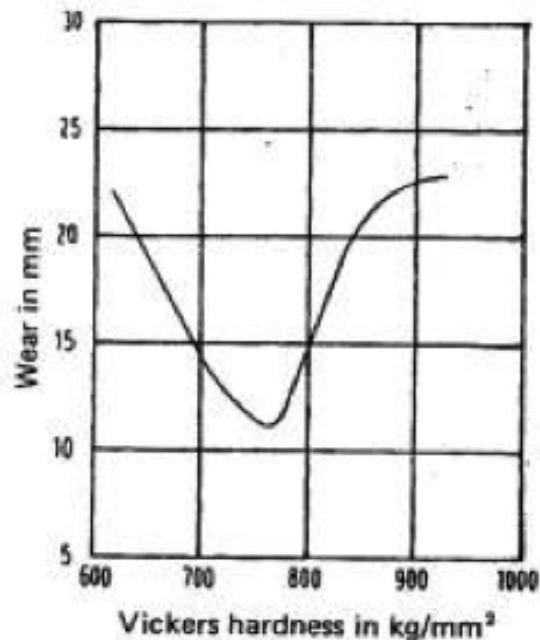


Figura 6 - Relazione fra durezza e altezza dello strato usurato [3]

Il mozzo utilizzato nell'analisi è stato cromato con uno spessore di 0,1 mm. Le dimensioni della superficie rivestita sono visibili nel disegno sottostante. Per ottenere uno strato di spessore uniforme su tutta la superficie, il pezzo è stato rettificato precedentemente al processo di elettrodeposito del cromo. Infine è stata fatta realizzare una successiva rettifica, per avere una rugosità che consenta una lubrificazione ottimale, assicurata dal corretto contatto con il labbro della guarnizione. In Figura 7 viene illustrato il cilindro cromato.

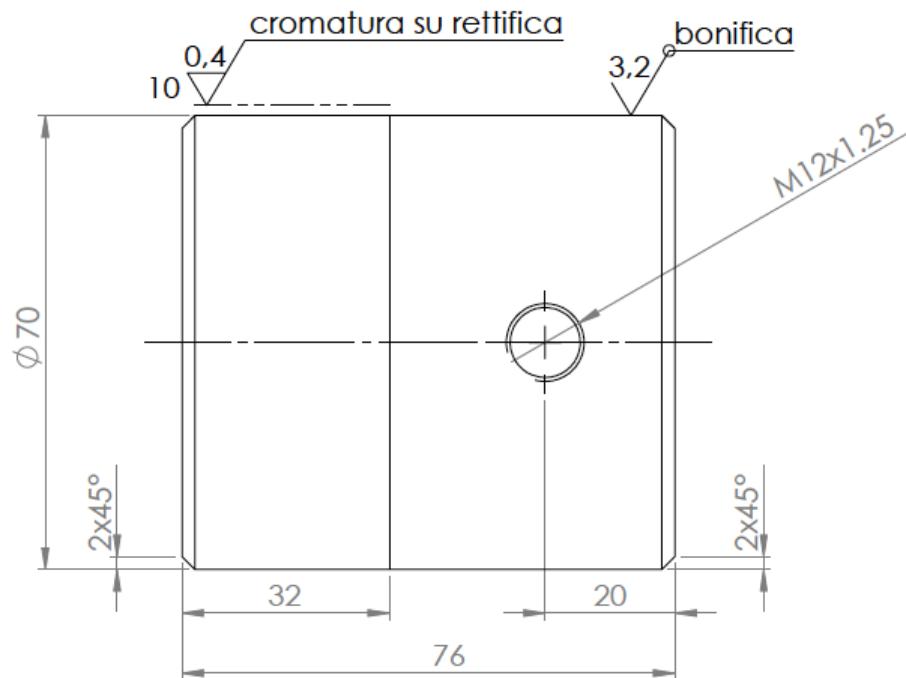


Figura 7 - Cilindro cromato

## 2.6 RIVESTIMENTO CERAMICO

I materiali ceramici avanzati hanno caratteristiche molto interessanti in ambito meccanico. Infatti, sono molto duri, resistenti ad alte temperature e agli agenti ambientali.

I ceramici avanzati uniscono resistenza meccanica, diminuzione dell'usura e stabilità dimensionale alle caratteristiche di base dei materiali ceramici tradizionali.

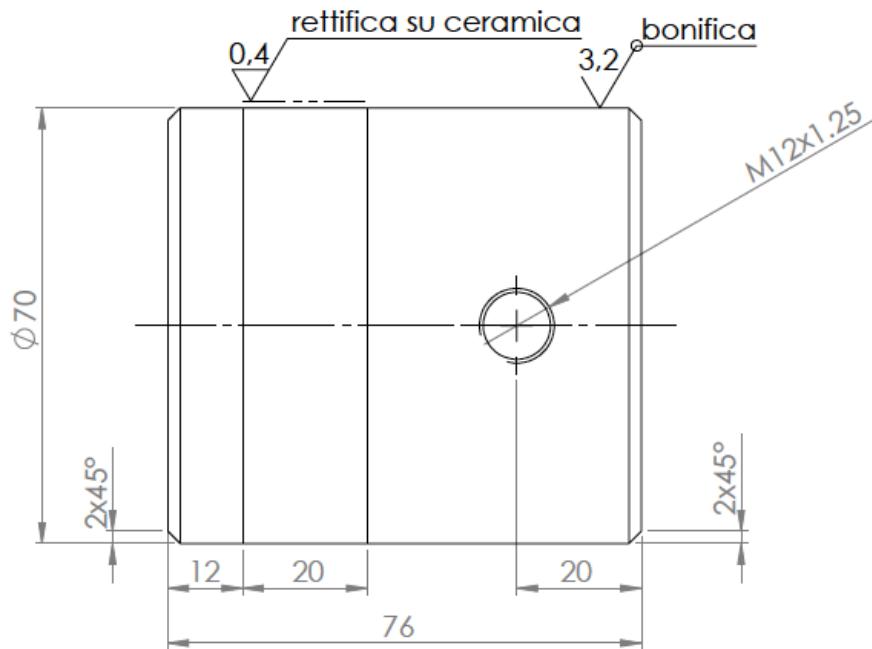


Figura 8 - Cilindro con rivestimento ceramico

Il mozzo studiato e rappresentato in Figura 8 presenta un rivestimento di colore nero lucido a base di ossido di cromo, con percentuali di altri minerali che esaltano particolari qualità, apprezzate nel campo della trafilettatura a secco di metalli ferrosi e non ferrosi. Questo materiale è chiamato Kerblack®.

Nella gamma dei rivestimenti altamente specializzati a base di ossidi di cromo, il KERBLACK® è risultato il miglior rivestimento antiusura e anti-grippaggio attualmente conosciuto in campo nazionale ed internazionale. Il materiale garantisce una forte riduzione del coefficiente di attrito sulla superficie. È usato soprattutto per cabestani e bobine, anelli e coni di trafilettatura anche per impianti di smaltatura, rulli guidafilo e pulegge di rinvio.

Il processo mediante il quale è realizzato il rivestimento è l'HVOF (High Velocity oxygen fuel). È una tecnica di deposizione a spruzzo di polveri illustrata schematicamente in Figura 9, che permette, a costi sostenibili, di migliorare le caratteristiche superficiali di un materiale e di prolungarne la durata, anche in ambienti di lavoro particolarmente corrosivi e usuranti. In genere questo risultato è ottenibile senza interferire con le caratteristiche

meccaniche e strutturali del substrato e quindi senza la necessità di altri trattamenti. Il rivestimento finale è caratterizzato principalmente da alta densità, da elevata forza di legame che garantisce un incremento del grado di ancoraggio del riporto, da alti valori di durezza, da una riduzione di eventuali porosità, da un limitato livello di rugosità superficiale e da una forte resistenza all'usura. L'alta velocità consente inoltre di mantenere basse le temperature di preriscaldamento del substrato da rivestire. Il processo fa uso di una miscela di combustibili: il cherosene brucia con un'elevata percentuale di ossigeno e produce una fiamma la cui velocità del flusso dei gas supera i 2000 m/s. In questo flusso sono iniettate radialmente le polveri metalliche che vengono immediatamente fuse ed accelerate sino a circa 1000m/s. Una volta impattato il substrato, le particelle solidificano rapidamente dando luogo, grazie all'elevata energia cinetica posseduta, a strutture lamellari.

## High Velocity Oxy-Fuel Process

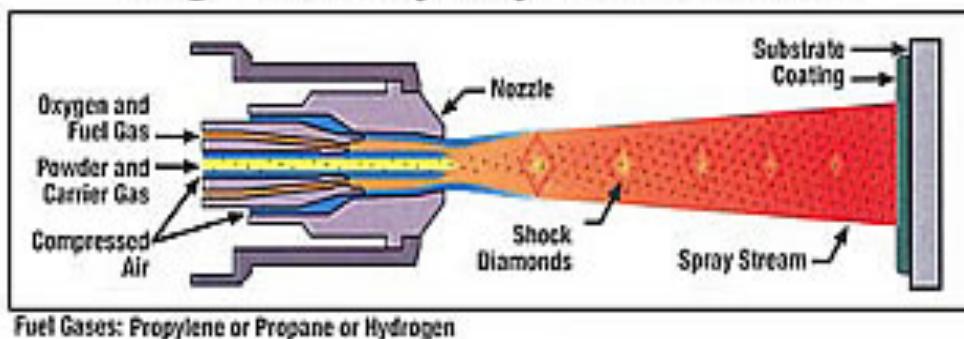


Figura 9 - Processo HVOF [4]

## Capitolo 3

# ANELLI DI TENUTA

### 3.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Esistono innumerevoli varietà di anelli di tenuta (vedi Figura 10) che si differenziano per specifici accorgimenti costruttivi, permettendo un migliore adattamento alle varie condizioni operative. La scelta della corretta tipologia di tenuta è fatta considerando molti parametri, come la pressione e la temperatura di esercizio, il tipo di fluido utilizzato e la velocità periferica.

La guarnizione utilizzata in questo studio appartiene alla macro classe delle tenute dinamiche.



Figura 10 - Anello di tenuta in NBR

La caratteristica che accomuna i vari modelli di guarnizioni a labbro è il confinamento del fluido lubrificante in uno spazio chiuso. La lubrificazione è necessaria per la riduzione delle influenze meccaniche secondarie come, per esempio, l'attrito della guarnizione sull'albero; ciò comporta un aumento di calore nell'immediata vicinanza dell'anello in elastomero, con conseguenti perdite di funzionalità [5].

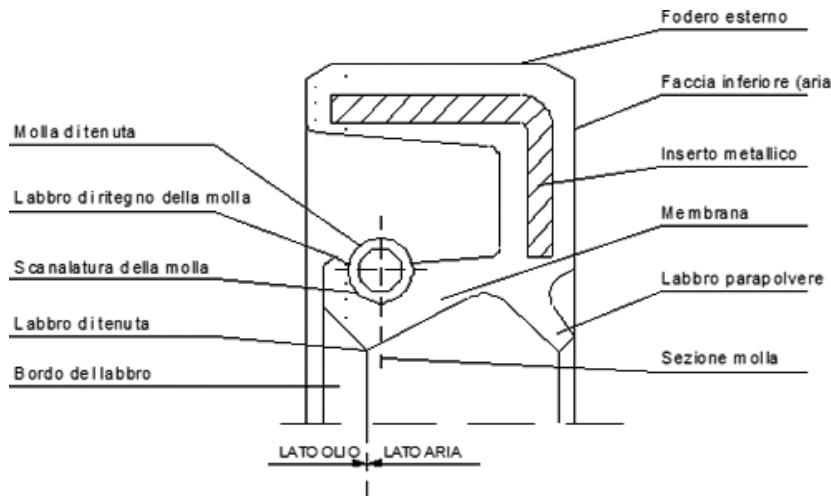
Grazie a questo confinamento, inoltre, si riesce a prevenire la contaminazione di micro-particelle tra i due ambienti, che potrebbero danneggiare i membri meccanici contenuti all'interno della camera a olio.

Le guarnizioni a labbro è la tenuta maggiormente utilizzata in ambito meccanico per applicazioni riguardanti alberi posti in rotazioni o dotati di movimenti oscillatori.

Il componente principale delle guarnizioni a labbro radiali è l'elastomero circolare di gomma sintetica. E' una membrana flessibile terminante con uno spigolo, che si accoppia con la superficie dell'albero, fungendo da tenuta dell'olio usato per la lubrificazione.

Il materiale è costituito da una base elastomerica alla quale sono aggiunti riempitivi, plastificanti, antiossidanti, anti invecchianti e agenti indurenti. Lo scopo è di aumentare la stabilità con il fluido, migliorare la plasticità e la resistenza all'usura, diminuendo allo stesso tempo il coefficiente d'attrito.

Di seguito è riportato un disegno costruttivo dettagliato della sezione di una guarnizione a labbro. Le dimensioni variano proporzionalmente al valore del raggio dell'albero.



*Figura 11 – Sezione della guarnizione a labbro*

All'interno di questo membro è presente un inserto metallico rigido come illustrato in Figura 11, che garantisce la stabilità necessaria all'accoppiamento. Inoltre, lungo un'apposita scanalatura, è posta una molla elicoidale di acciaio armonico ad alta resistenza usata per precaricare la tenuta.

Il labbro è soggetto a usura, causata dalla forza che nasce dall'interferenza dei due membri accoppiati: la pressione è proporzionale alla differenza tra il diametro esterno dell'albero e quello interno del labbro. Attraverso il precarico della molla si riesce così a mantenere pressoché costante la pressione voluta, contrastando la tendenza alla diminuzione dell'efficienza della tenuta dovuta all'invecchiamento del materiale elastomerico.

### 3.2 STRUTTURA DELLA GUARNIZIONE

La scelta dell'elastomero da utilizzare per la realizzazione della guarnizione, rappresenta l'aspetto più importante per prevedere la durata della tenuta.

Dopo la realizzazione della mescola, il materiale è posto in uno stampo e sottoposto a diverse operazioni:

- Vulcanizzazione, grazie alla quale l'inserto metallico è unito saldamente alla gomma circostante.
- Taglio, con il quale si riesce ad ottenere lo spigolo della tenuta.
- Trasformazioni chimico-fisiche che permettono alla gomma di passare prevalentemente da uno stato plastico a una condizione elastica, raggiungendo le caratteristiche finali volute.

Questi processi sono irreversibili e vanno controllati per avere le proprietà volute. Il materiale deve essere compatibile con il fluido con cui si vuole lavorare; inoltre, deve essere resistente all'usura mantenendo tali proprietà per un periodo di tempo abbastanza prolungato.

Il materiale maggiorente utilizzato per gli anelli di tenuta è l'NRB (gomma nitrilica). Questo è un materiale largamente diffuso per il costo contenuto e le buone proprietà di resistenza meccaniche e all'abrasione.

Lo svantaggio di usare la base polimerica di nitrile consiste nella scarsa resistenza alle temperature elevate. Maggiore è la temperatura effettivamente raggiunta dal labbro di tenuta, più veloce è l'invecchiamento dell'elastomero e quindi minore è la vita utile dell'anello. Il materiale si indurisce, con la conseguente formazione di crepe e perdita di elasticità. Ciò causa una minore tenuta del labbro per la diminuzione di aderenza con la superficie dell'albero. Il range di funzionamento di questa tipologia di tenute varia da -40 a +110 °C. La temperatura del labbro è pari a quella del lubrificante contenuto, sommata all'effetto locale dell'attrito dell'albero di tenuta sull'albero. Il riscaldamento per attrito dipende dalla velocità di rotazione dell'albero, dal precarico del labbro di tenuta, dalla rugosità della superficie dell'albero nel punto di contatto con il labbro di tenuta e dalla qualità della lubrificazione.

Nelle prove svolte in laboratorio, è stata utilizzata la tenuta A+P RWDR realizzata con un elastomero a base nitrilica NBR, con durezza di 70 Shore A e dimensioni 70x100x12 mm della Angst-Pfister®. Il materiale dell'inserto metallico è acciaio non legato AISI 1008/1010, mentre quello della molla

elicoidale è AISI 1070/1090. La velocità massima periferica è di 14 m/s e la pressione ammissibile è 0,05 MPa [5].

La realizzazione di un alloggiamento accurato è di notevole importanza per il buon funzionamento dell'anello di tenuta. La sede, infatti, deve accogliere e tenere ben fermo l'anello nella posizione ottimale rispetto all'albero e, contemporaneamente, deve garantire la tenuta ai fluidi tra sede e anello, nonché un montaggio agevole. La rugosità della sede deve essere adeguata a trattenere saldamente l'anello di tenuta, e comunque non deve essere superiore a  $3,2 \mu\text{m}$ . La rugosità e la dimensione corretta garantiscono una perfetta tenuta dell'anello nella sede e l'assenza di movimenti indesiderati. È importante che il montaggio avvenga con strumenti adeguati, tali da evitare la deformazione dell'anima metallica dell'anello e di assicurare il corretto posizionamento di questo rispetto all'albero. A tal fine è sempre buona norma prevedere uno spallamento contro cui far appoggiare l'anello una volta in sede come illustrato, per esempio, in Figura 12. Un montaggio sicuro è dato dalla forza di attrito: è necessario che questa componente sia maggiore della forza assiale che agisce sulla tenuta, generata dalla risultante delle differenti pressioni dei due ambienti separati dalla guarnizione. Occorre quindi prevedere le tolleranze di accoppiamento sul diametro esterno dell'anello secondo il tipo di materiali a contatto. È necessario fare molta attenzione alla fase di montaggio. Infatti, circa il 30% di tutti i guasti riguardanti gli anelli di tenuta è da ricondurre a un'installazione non corretta. Prima del montaggio occorre assicurarsi che l'anello sia pulito, senza la presenza di polvere o particelle. Questi elementi potrebbero compromettere l'integrità della tenuta o ridurre sensibilmente la durata dell'anello.

Un altro compito della superficie esterna dell'anello di tenuta è di compensare i giochi radiali risultanti dal montaggio e dalla dilatazione termica dei vari materiali coinvolti.

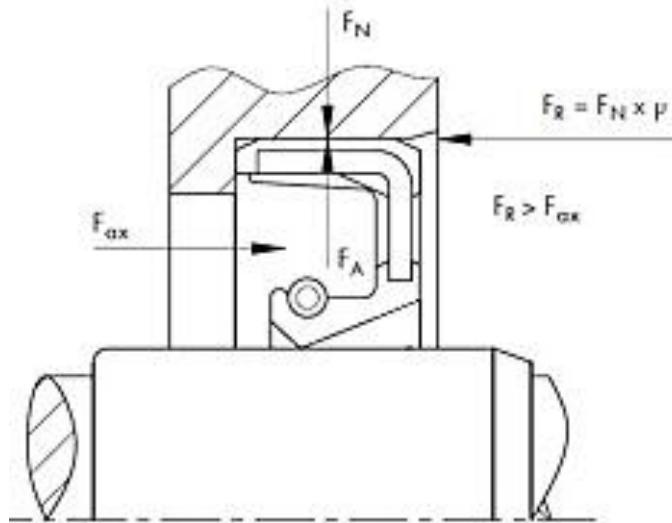


Figura 12 – Fissaggio anello di tenuta

Il meccanismo di tenuta dinamica interviene durante le condizioni di esercizio.

La differenza dei diametri nominali dei due membri genera una pressione radiale tra le due superfici a contatto; questa differenza è definita precarico, il quale, sommato all'effetto dell'azione della molla, origina una pressione nell'area di contatto.

L'effetto di tenuta del labbro dipende da vari parametri come le proprietà dell'elastomero, la geometria del labbro, la finitura superficiale dell'albero, lo stato di lubrificazione e l'allineamento della molla. Nella fase iniziale si ha un'azione di tenuta statica, basata sulla pressione radiale esercitata dalla tenuta sulla superficie esterna dell'albero. Questa darà origine a una deformazione elastica del labbro della guarnizione, con una conseguente aderenza superficiale.

In Figura 13 è possibile notare come la forza radiale risultante è data dalla somma della componente dovuta all'azione dell'elastomero e da quella esercitata dalla molla elicoidale. Nella figura seguente si ha un'illustrazione dei concetti appena descritti.

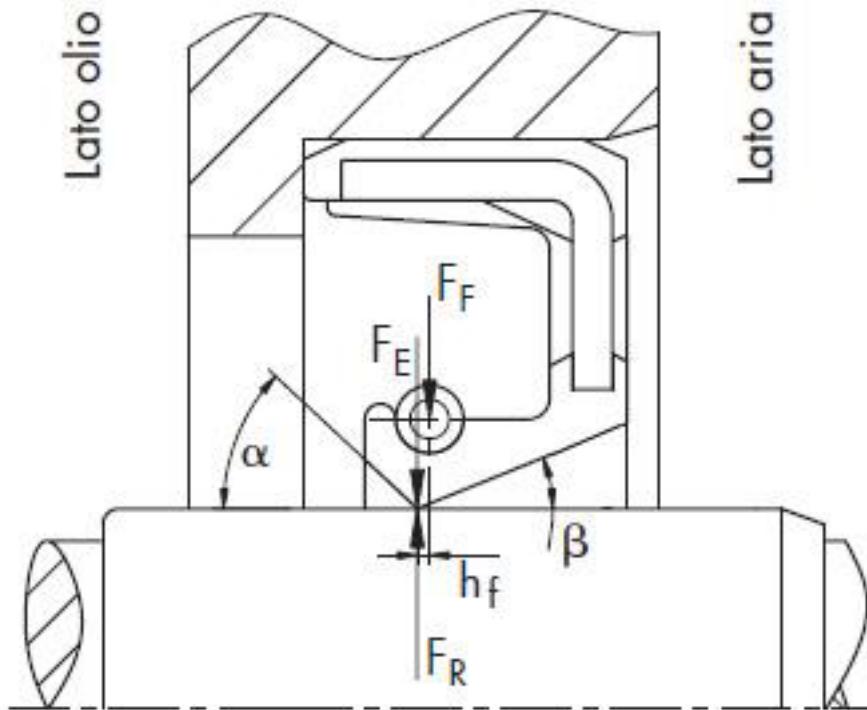


Figura 13 – Forze scambiate tra tenuta e albero

$h_f$  rappresenta la distanza tra l'asse della molla e il punto di applicazione della forza. Gli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri che descrivono l'angolo formato tra l'albero e le superfici laterali della guarnizione, rispettivamente con il lato olio e con il lato aria. Questi angoli sono compresi in un range di che varia rispettivamente da  $40^\circ \div 70^\circ$  e  $20^\circ \div 35^\circ$ .

### 3.3 FUNZIONAMENTO

Il meccanismo di tenuta delle guarnizioni è argomento di studio da oltre 60 anni. A causa della complessità dell'argomento non si è ancora giunti a una formulazione teorica che descriva nella sua totalità il fenomeno della lubrificazione idrodinamica.

Lo scopo principale della tenuta è di ritenere il fluido lubrificante. Il meccanismo deve essere studiato sia dal punto di vista statico che da quello

dinamico: il primo concerne il contatto tra la superficie esterna della guarnizione e la relativa sede di alloggiamento, mentre il secondo riguarda l'impedimento della fuoriuscita di olio nel contatto superficiale labbro-albero, accoppiamento caratterizzato da un moto relativo fra i due membri.

Nel 1957 fu dimostrata la presenza di un sottile strato di fluido lubrificante che, dopo un breve periodo di funzionamento, si interpone tra il labbro della guarnizione e l'albero rotante, impedendone il contatto diretto e quindi garantendo una maggiore durata della tenuta. Il labbro, infatti, non deve strisciare a diretto contatto con la superficie metallica per garantire un corretto funzionamento. Lo spessore di questo strato è di  $1\div 3 \mu\text{m}$  ed è influenzato dalla viscosità del lubrificante, dalla temperatura, dalla rugosità dell'albero e dal carico radiale. Inoltre, la presenza del film lubrificante contribuisce a mantenere bassa la temperatura del labbro di tenuta, garantendo una maggiore vita attesa della tenuta.

Dopo il montaggio, una tenuta nuova presenta un labbro appuntito a spigolo vivo; dopo qualche ora di funzionamento l'area di contatto aumenta, allargandosi fino a  $0,2\div 0,3 \text{ mm}$  e raggiungendo, infine, un limite massimo di circa 0,5 mm.

La prova parte da una condizione statica, in cui non c'è moto relativo tra gli elementi cinematici, i quali sono a diretto contatto. Poco dopo la messa in moto, si passa da una condizione di attrito statico a una di attrito misto, nella quale il fluido lubrificante inizia a insinuarsi fra le due superfici a contatto. Questa condizione è definita lubrificazione limite: si verifica quando lo strato di lubrificante è così sottile da non impedire il contatto fra le asperità delle due superfici, riducendo tuttavia sensibilmente il coefficiente di attrito di strisciamento rispetto al caso di superfici asciutte [2].

Durante questa fase transitoria, il labbro di tenuta si assesta, generando per usura delle microscopiche sporgenze in direzione radiale fondamentali per una lubrificazione idrodinamica efficiente. Le dimensioni delle micro-asperità

sono influenzate dalla finitura superficiale dell'albero e dal tipo di gomma della guarnizione. In seguito, il sistema si troverà in una condizione di lubrificazione completa, in cui tutta l'area di contatto è interamente mediata da uno strato di fluido lubrificante come mostrato in Figura 14, proteggendolo da usura e stress termico.

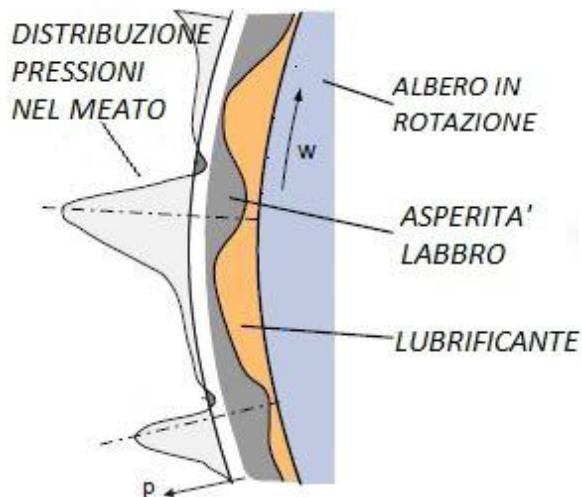


Figura 14 – Formazione meato lubrificante

La velocità relativa, dovuta alla rotazione dei due corpi, trascina il fluido sotto le asperità che si sono create per la distorsione del materiale elastico. Il risultato finale è una deformazione radiale del labbro che causa un aumento della pressione locale. La compressione creata origina una capacità portante delle sporgenze generate sul labbro, che fungono da micro-pattini [6]. Questo è uno dei principi fondamentali della teoria della lubrificazione idrodinamica [2].

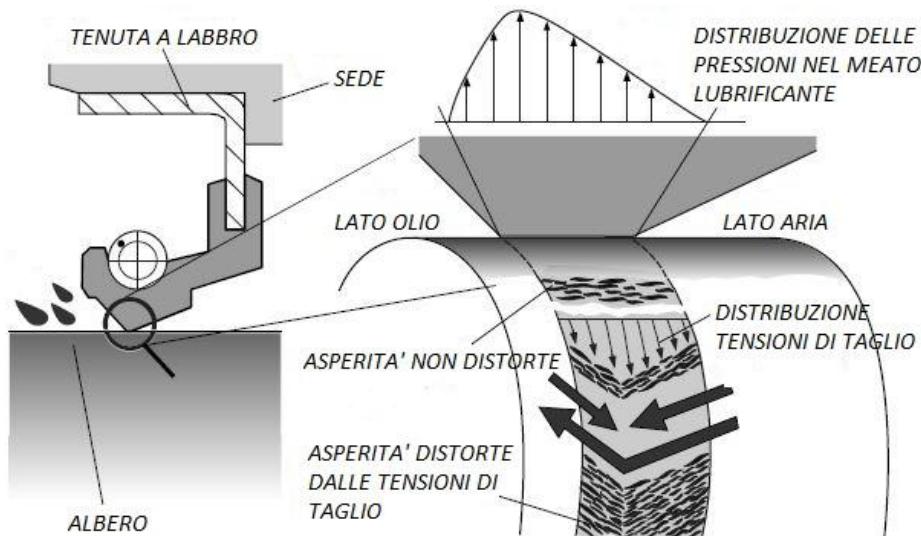


Figura 15 – Meccanismo del pompaggio inverso

Le asperità sulla superficie del labbro in elastomero nella zona di contatto svolgono un ruolo molto importante nel mantenere attivo il film lubrificante. Le tensioni di taglio, legate alla viscosità del fluido, tenderanno a deformare queste sporgenze in direzione circonferenziale con un determinato angolo rispetto all'asse dell'albero (Figura 15). Queste distorsioni del materiale tendono a spingere il lubrificante verso il labbro (pompaggio inverso), prevenendo così le perdite [7].

Osservando la figura sovraesposta si nota come la zona delle asperità del lato aria sia più estesa rispetto a quella del lato olio, causando un pompaggio verso l'interno della tenuta maggiore rispetto a quello del flusso di perdita. A causa di questo tipo di orientamento assunto dalle asperità del labbro, infatti, una guarnizione usata non riesce più a svolgere adeguatamente il proprio lavoro in caso d'inversione del senso di rotazione dell'albero, perché non riesce più garantire un pompaggio corretto.

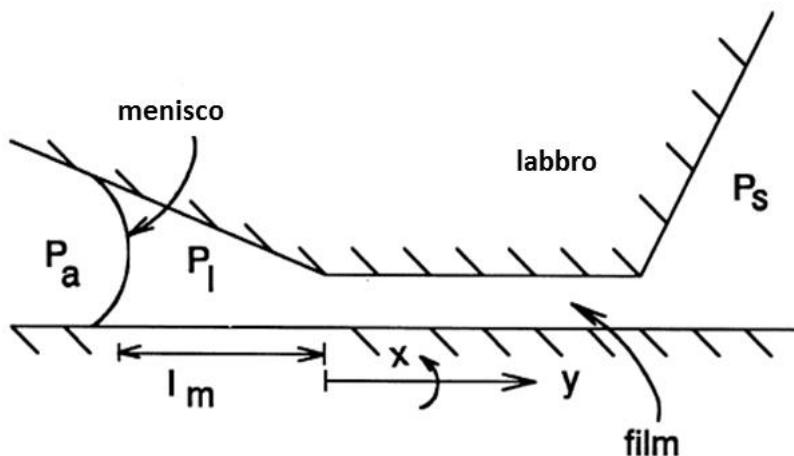


Figura 16 – Menisco nelle tenute a labbro

La Figura 16 mostra cosa succede a livello microscopico nella regione di contatto labbro-albero. Il flusso risultante del film lubrificante è dato dalla risultante di due componenti: la prima è indotta dalla pressione di Poiseulle nel verso delle perdite, mentre la seconda è data dal pompaggio inverso, nel verso opposto. E' possibile osservare la presenza di un menisco nella posizione in cui i due flussi sono in equilibrio, evitando una perdita netta. Esso si forma a causa della tensione superficiale presente tra fluido, albero e aria.

Il pompaggio inverso è proporzionale alla velocità di rotazione, quindi, all'aumentare del numero di giri si ridurrà la coordinata  $l_m$ , spostandosi in un'altra posizione di equilibrio. Si parlerà di menisco ingerito quando la velocità angolare supererà un valore critico e la sua posizione di equilibrio sarà interna all'area di tenuta, garantendo comunque l'assenza di perdite [8].

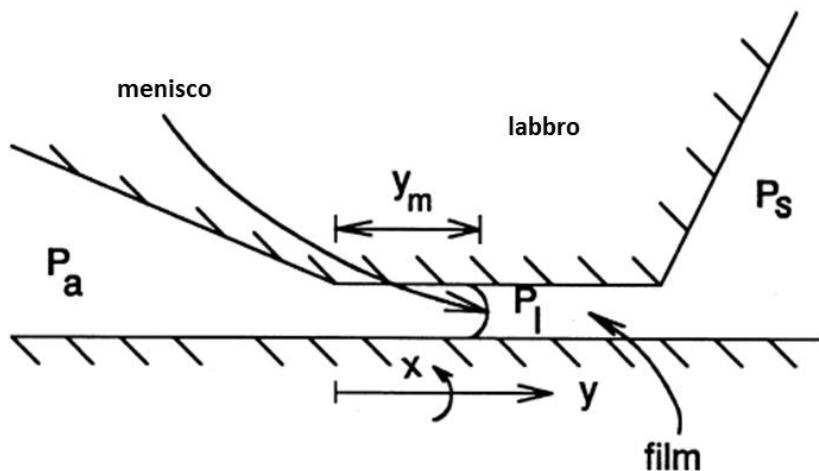


Figura 17 – Menisco ingerito [9]

La Figura 17 mostra la situazione in cui la pressione  $P_l$  del menisco è inferiore alla pressione atmosferica  $P_a$ , mentre quella all'interno della tenuta  $P_s$  è assunta maggiore rispetto a  $P_a$ .

In conclusione si può affermare che il meccanismo di pompaggio non può prescindere né dalla geometria asimmetrica né dalla struttura superficiale dell'elastomero nella zona di contatto.

## Capitolo 4

# STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

### 4.1 INTRODUZIONE

Per lo svolgimento delle prove sperimentali è stato preparato un banco di prova appositamente equipaggiato, allo scopo di simulare fedelmente le condizioni di lavoro reali. Oltre all'attrezzatura meccanica, la strumentazione utilizzata comprende anche un sistema elettronico per l'acquisizione dei dati e un software per la loro elaborazione. In seguito saranno elencati i dettagli dei vari tipi di attrezzatura utilizzata.

### 4.2 ATTREZZATURA DI PROVA

L'attrezzatura utilizzata è costituita essenzialmente da una struttura meccanica con albero rotante. Esso è montato su due cuscinetti radiali rigidi a sfere che fungono da supporto. A un'estremità dell'albero è calettata una puleggia che trasmette il moto rotatorio attraverso una cinghia dentata, la quale ingranata su un motore Beckhoff® serie AM 3000 sincrono trifase (vedi Figura 18).



Figura 18 – Motore sincrono trifase

Di seguito sono riportate alcune delle specifiche del motore:

- Coppia di spunto: 17,00 Nm
- Corrente di spunto: 17,35 Arms
- Tensione nominale: 400 V
- Velocità nominale: 5000 rpm
- Momento d'inerzia: 24,20 Kg cm<sup>2</sup>
- Misura di posizione: revolver a due poli

Il sistema utilizza un dispositivo elettromeccanico analogico per la misura degli spostamenti angolari. Il campo di misura del dispositivo è 360°C.

L'altra estremità dell'albero termina con il calettamento di un mozzo; il collegamento assiale tra i due membri è assicurato tramite una vite a filettatura fine. Per impedire slittamenti circonferenziale, è stato realizzato un grano filettato, che si avvita sul mozzo facendo presa nella sede di una linguetta realizzata sull'albero.

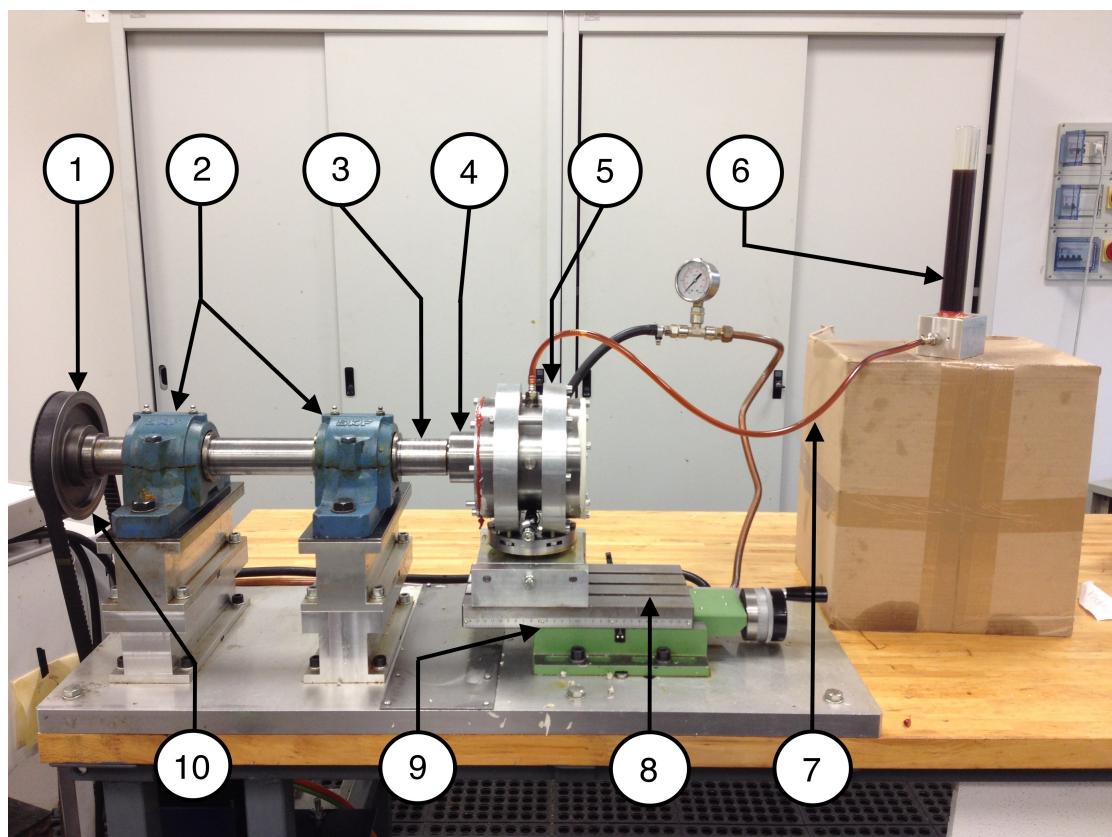


Figura 19 – Banco di prova

LEGENDA FIGURA 19:

- 1 – Cinghia dentata
- 2 – Cuscinetti radiali rigidi a sfere
- 3 – Albero
- 4 – Cilindro
- 5 – Camera dell'olio
- 6 – Cilindro pieno di olio lubrificante
- 7 – Tubicino di gomma
- 8 – Slitta
- 9 – Scala graduata  $\pm 1$  mm
- 10 – Puleggia

Il mozzo lavorato è parzialmente inserito all'interno della camera piena di olio, che ha la duplice funzione di contenere il fluido lubrificante e fungere da supporto per l'anello di tenuta. Questa camera è montata su una slitta assialmente scorrevole rispetto all'asse dell'albero, per mezzo di una vite graduata. Questo consente di posizionare il labbro della guarnizione nella posizione voluta. Sull'estremità superiore della camera è presente un foro, che permette di introdurre regolarmente del lubrificante per mantenere la struttura completamente piena, equilibrando il flusso di perdita.

Durante il funzionamento è utilizzato olio lubrificante Vanguard Gearing® EP 220, adatto alle trasmissioni sottoposte a intensi carichi dinamici, alte temperature operative ed elevate velocità di strisciamento. La massima temperatura di utilizzo è 110°C; ha una densità di 0,898 kg/dm<sup>3</sup> alla temperatura di 20°C e una viscosità di ISO 220, corrispondente alla classe SAE 90 [9].

Per rilevare la temperatura del labbro della guarnizione a intervalli regolari, è stato utilizzato un termometro digitale con una termocoppia.

#### 4.3 SISTEMA ELETTRONICO

Il sistema elettronico costituisce il secondo sottoinsieme della strumentazione utilizzata.

Al motore è connesso un servo azionamento (PLC) modello AX5118, il quale richiede un regolatore di tensione. L'azionamento elettrico permette di interfacciare l'apparato meccanico con il sistema software, in particolare consente l'acquisizione dei dati di posizione, coppia e velocità del motore, riuscendo così a studiare la tenuta.

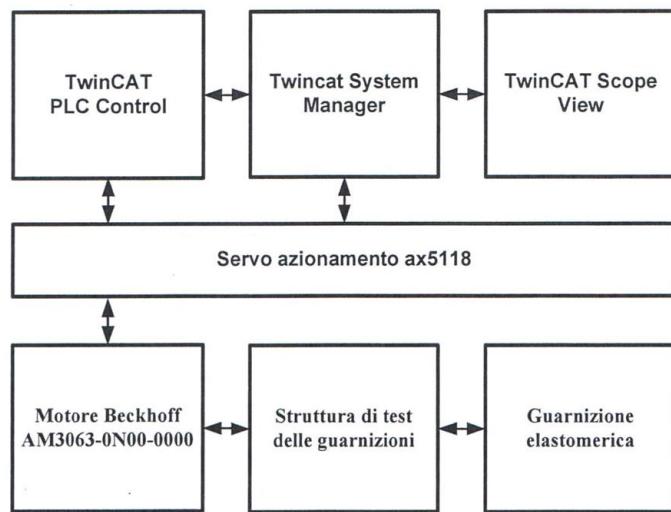


Figura 20 – Flussi caratterizzanti il sistema Beckoff [10]

In Figura 20 è riportato lo schema dei flussi scambiati tra il sistema elettromeccanico e il software: il motore invia i dati di coppia rilevati dal banco di prova sotto forma d'impulsi elettrici al sistema elettronico, il quale li trasforma in sequenza di dati che saranno poi letti ed elaborati dal pacchetto software, permettendo così di apprezzare le minime variazioni di coppia e limitando il rumore del segnale.

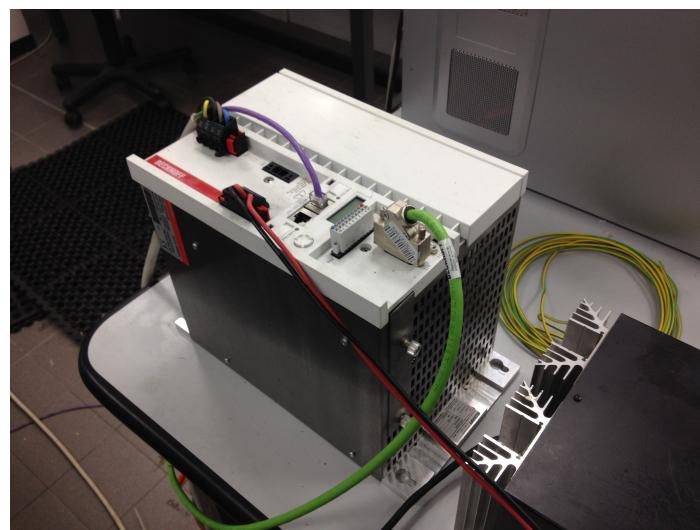


Figura 21 - Funzionamento elettrico

E' presente anche un sistema di servo azionamento elettrico (Figura 21), attraverso il quale si attua il controllo del sistema fisico, in modo inverso al procedimento sopraesposto: il sistema informatico invia la sequenza di dati per il controllo del motore, modificandone i parametri.

#### 4.4 SISTEMA ACQUISIZIONE DATI

Il servo azionamento è controllato da un pacchetto software composto da tre parti principali:

- I. TwinCat System Manager per gestire e configurare i dispositivi fisici collegati al computer.
- II. TwinCat PLC Control per lo sviluppo della routine di controllo e gestione del sistema tramite il linguaggio di programmazione PLC.
- III. TwinCat Scope View per la visualizzazione e il salvataggio dei segnali.

La comunicazione tra computer e azionamento avviene a intervalli regolari di durata pari a 1 s, attraverso una scheda di rete Beckhoff. L'azionamento elettrico presenta tre anelli di controllo: posizione, velocità e corrente che è un parametro proporzionale alla coppia.

Il secondo e terzo programma sono dotati di interfaccia grafica, attraverso cui l'utente può interagire con il macchinario. Utilizzando il TwinCat PLC Control la cui interfaccia è illustrata in Figura 22, è possibile avviare o arrestare il motore e regolare i parametri che determinano la velocità angolare di rotazione. Inoltre, è possibile anche valutare i valori istantanei della coppia durante il funzionamento.

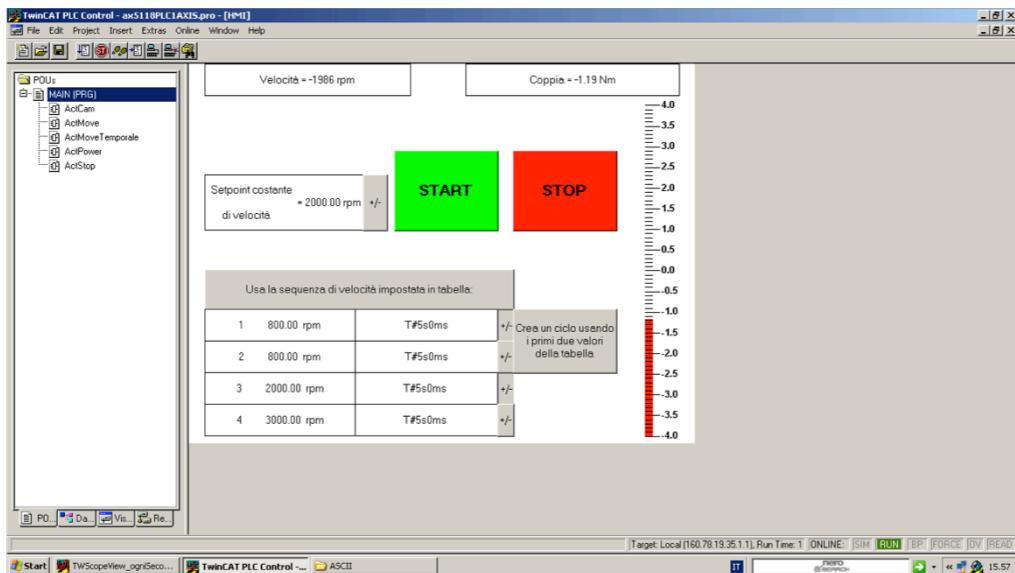


Figura 22 – Interfaccia di TwinCAT PLC Control

I dati subiscono una prima elaborazione a livello software grazie al programma TwinCat Scope View (Figura 23). Il sistema elettronico rileva i valori di coppia quasi istantaneamente e li visualizza sull’interfaccia grafica su una coppia di assi cartesiani in funzione del tempo. Viene anche rappresentato l’andamento della velocità angolare del motore. Nel grafico sono quindi riportati contemporaneamente gli andamenti della coppia rilevata in colore blu [Nm] e quello della velocità di rotazione dell’albero in rosso [rpm]. Nelle impostazioni è possibile stabilire la durata della prova; questo parametro è visualizzato sull’asse delle ascisse [s].

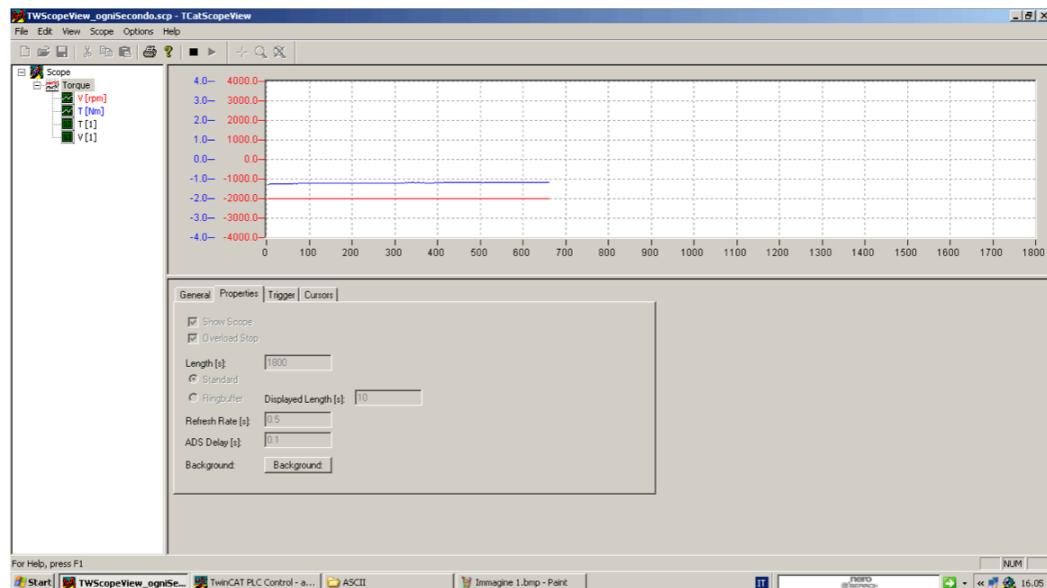
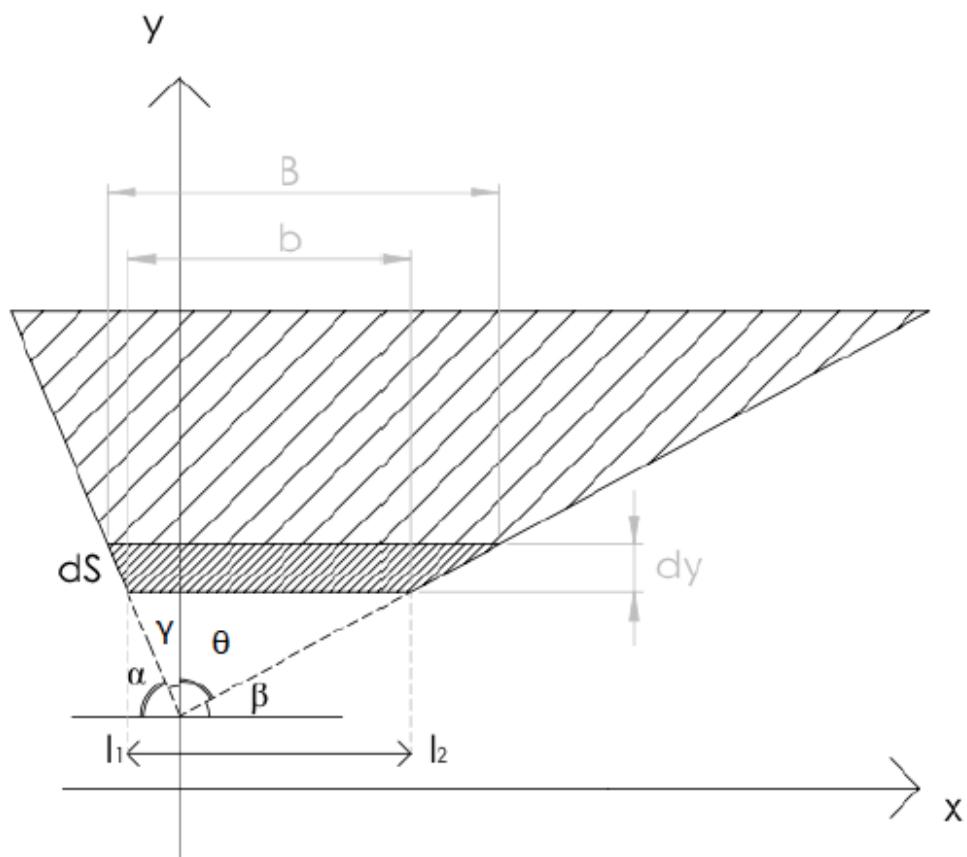


Figura 23 - Interfaccia di TwinCAT Scope View

## Capitolo 5

# STUDIO TEORICO

Si assume che la sezione del volume usurato del labbro della guarnizione, abbia forma triangolare, come illustrato in Figura 24.



*Figura 24 – Sezione del labbro*

Per studiare il fenomeno utilizziamo l'ipotesi del Reye, secondo cui nel contatto dinamico tra due membri, il lavoro compiuto dalle forze d'attrito è proporzionale al volume asportato per usura.

$$L_{\text{att}} \propto V_{\text{asportato}}$$

Bisogna valutare il volume infinitesimo asportato. Considerando che la sezione del volume infinitesimo asportato abbia forma trapezoidale, è possibile scrivere:

$$dS = \frac{(B + b) dy}{2}$$

$$\gamma = 90^\circ - \alpha$$

$$\theta = 90^\circ - \beta$$

$$dS = \frac{(b + B)dy}{2} = \frac{[y(\tan \gamma + \tan \theta) + (y + dy)(\tan \gamma + \tan \theta)]dy}{2}$$

$$\tan \gamma + \tan \theta = K$$

$$dS = \frac{(2yK + dyK)dy}{2}$$

$$dS = \left( Ky + \frac{K}{2} dy \right) dy$$

$$dS = \left( y + \frac{dy}{2} \right) Kdy$$

E' possibile trovare un riscontro geometrico della relazione appena ricavata. Infatti, si osserva che la sezione trapezoidale è data dalla somma di tre aree, come illustrato in Figura 25.

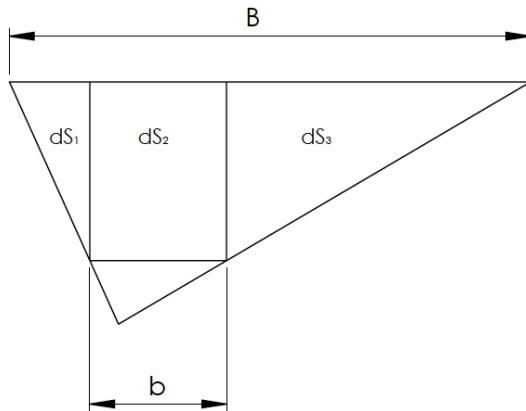


Figura 25 – Scomposizione dell'area della sezione

$$dS = dS_1 + dS_2 + dS_3$$

$$dS = \frac{dy \tan \gamma dy}{2} + bdy + \frac{dy \tan \theta dy}{2}$$

$$dS = \frac{Kdy^2}{2} + Kydy$$

$$dS = \left( y + \frac{dy}{2} \right) Kdy$$

$$dV = 2\pi R dS$$

R indica il raggio dell'albero ed è assunto costante. Questo parametro varia in base all'usura sull'albero. Dalle prove effettuate si è osservato che, per un periodo relativamente breve di funzionamento, la quantità di materiale usurato sull'albero è trascurabile. E' possibile ipotizzare, dunque,  $R = \text{costante}$ .

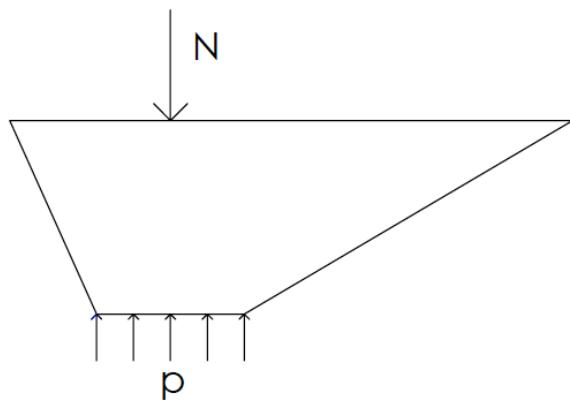


Figura 26 – Forza agenti sul labbro

$$dF_{\perp} = 2\pi R p db$$

$$p = \frac{N}{A} = \frac{N}{2\pi R b}$$

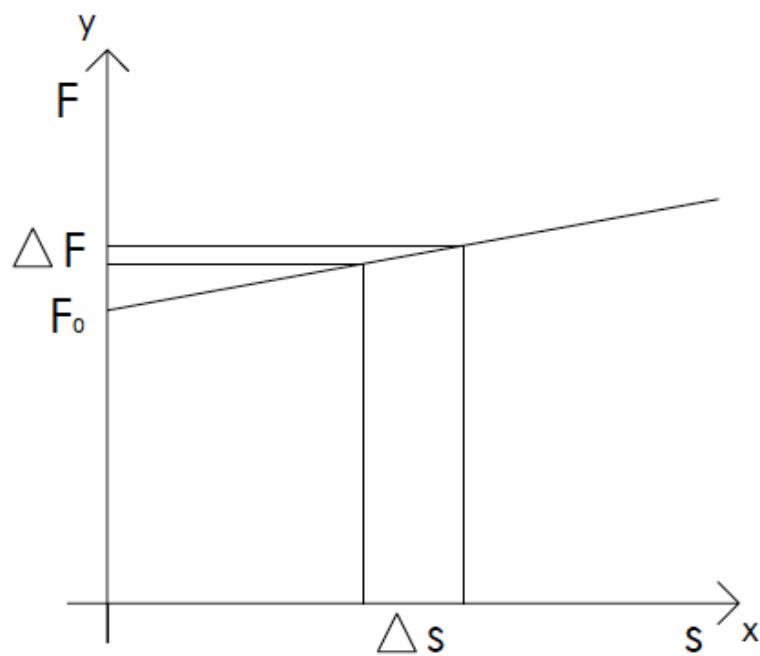


Figura 27 – Forza  $N$  agente sul labbro in funzione del raggio

Dalla Figura 27 si nota come per piccoli spostamenti radiali dovuti all'usura, la forza agente sulla guarnizione subisce una variazione talmente piccola da essere considerata nulla. In tal modo, possiamo assumere la forza N costante.

$$dF_{\perp} = \frac{N}{b} db$$

$$dF_{ATT} = f dF_{\perp}$$

$$dF_{ATT} = f \frac{N}{b} db$$

$$dL_{ATT} = f \frac{N}{b} \phi R db$$

$$dL_{ATT} = f \frac{N}{b} \omega t R db$$

Sfruttando l'ipotesi del Reye ricordata in precedenza, si ottiene:

$$dL_{ATT} = f \frac{N}{b} \omega t R db \propto 2\pi R dS = dV$$

$$\frac{fN\omega tRdb}{y(\tan \gamma + \tan \theta)} \propto 2\pi R(\tan \gamma + \tan \theta) \left( y + \frac{dy}{2} \right) dy$$

$$db = d[y(\tan \gamma + \tan \theta)] = d(yK) = Kdy$$

$$fN\omega t Kdy \propto 2\pi y K^2 \left( y + \frac{dy}{2} \right) dy$$

$$fN\omega t \propto 2\pi y K \left( y + \frac{dy}{2} \right)$$

$$ft = C_0 \frac{2\pi K}{N\omega} y \left( y + \frac{dy}{2} \right)$$

$$C_1 = C_0 \frac{2\pi K}{N\omega}$$

$$ft = C_1 y \left( y + \frac{dy}{2} \right)$$

Il coefficiente d'attrito non è costante, ma dipende dal tempo di funzionamento della macchina. Questa dipendenza può non essere facilmente intuibile, tuttavia, osservando la catena esposta in Figura 28 tra i vari parametri, si riesce a intuire che il coefficiente d'attrito varia in funzione del tempo.

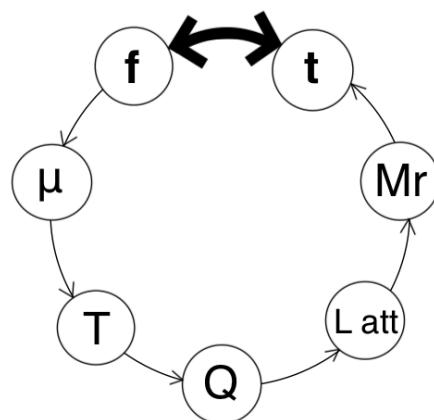


Figura 28 – Coefficiente d'attrito in funzione del tempo

$$M_m = M_{r_1} + M_{r_2} + M_{r_3}$$

Il momento motore ( $M_m$ ) è rilevabile dai dati sperimentali.  $M_{r_1}$  rappresenta il contributo della coppia resistente prodotta sull'albero dall'attrito esercitato dai cuscinetti radiali a sfere. Il valore è determinabile sperimentalmente attraverso una prova “a vuoto”, cioè facendo ruotare il sistema senza che il mozzo venga a contatto col fluido e con il labbro della guarnizione.

$M_{r_2}$ , invece, indica il contributo dato dalla somma delle coppie resistenti  $M_{r_2 \text{ lat}}$  e  $M_{r_2 \text{ base}}$ , dovute rispettivamente all'azione frenante del fluido sulla superficie laterale del mozzo e a quella sulla faccia piana del rotore interna alla camera di olio.

$$M_{r_2} = M_{r_2 \text{ lat}} + M_{r_2 \text{ base}}$$

$$M_{r_2 \text{ lat}} = \tau_1 2\pi R^2 H$$

$$\tau_1 = \mu \frac{\omega R}{s_1}$$

Il tipo di olio utilizzato ha una viscosità di 0,125 Pa·s.

$$M_{r_2 \text{ lat}} = \frac{2\pi\mu\omega R^3 H}{s_1}$$

$$M_{r_2 \text{ base}} = \int_0^R \tau_2 2\pi r^2 dr$$

$$\tau_2 = \mu \frac{\omega r}{s_2}$$

$$M_{r_2 \text{ base}} = 2\pi \int_0^R \mu \frac{\omega r}{s_2} r^2 dr = \frac{2\pi\mu\omega}{s_2} \int_0^R r^3 dr$$

$$M_{r_2 \text{ base}} = \frac{\pi\mu\omega R^4}{2s_2}$$

$$M_{r_2} = \frac{2\pi\mu\omega R^3 H}{s_1} + \frac{\pi\mu\omega R^4}{2s_2}$$

Misurando i valori  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $H$  e  $R$  (vedi Figura 29) è possibile calcolare il valore

$$M_{r_2} = 0,0003 \text{ N} \cdot \text{m.}$$

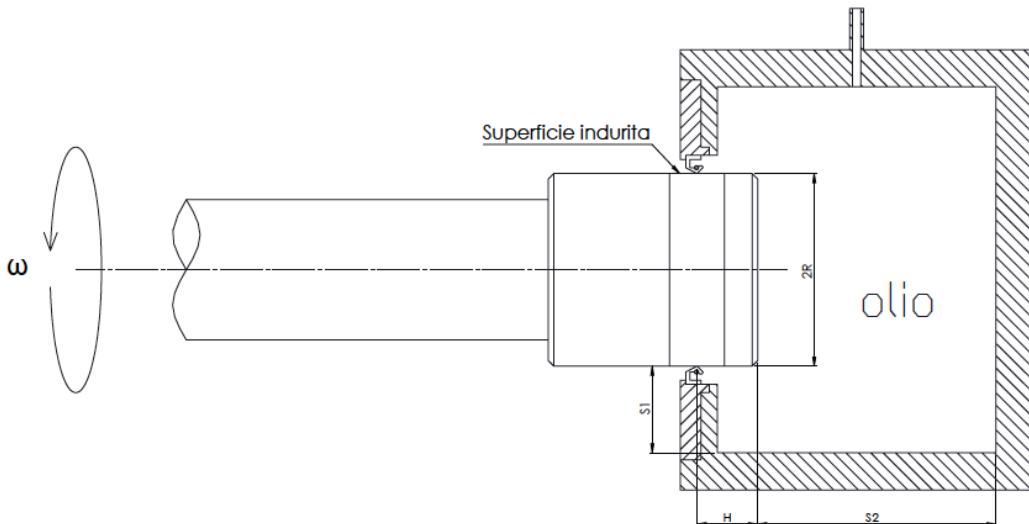


Figura 29 – Camera di olio

Si prova ora a determinare il terzo contributo del momento resistente complessivo.  $M_{r_3}$  si genera dalle forze di attrito che il labbro della guarnizione trasmette tangenzialmente all'albero.

$$dM_{r_3} = fp 2\pi R db R$$

$$M_{r_3} = \int_{-l_1}^{l_2} fp 2\pi R^2 db$$

$$M_{r_3} = \int_{-l_1}^{l_2} f \frac{N}{2\pi R b} 2\pi R^2 db$$

$$M_{r_3} = f NR \int_{-l_1}^{l_2} \frac{db}{b}$$

$$M_{r_3} = f NR [\log|b|]_{-l_1}^{l_2}$$

$$M_{r_3} = fNR [\log |l_2| - \log |l_1|]$$

$$M_{r_3} = fNR \log \frac{l_2}{l_1}$$

$$M_{r_3} = fNR \log \frac{y \tan \theta}{y \tan \gamma}$$

$$f = \frac{M_{r_3}}{NR \log \frac{\tan \theta}{\tan \gamma}}$$

$$C_2 = \frac{1}{NR \log \frac{\tan \theta}{\tan \gamma}}$$

$$f = C_2 M_{r_3}$$

$$ft = C_1 y \left( y + \frac{dy}{2} \right)$$

Considerando dy trascurabile, è possibile scrivere:

$$ft = C_1 y^2$$

$$C_2 M_{r_3} t = C_1 y^2$$

$$t \frac{M_{r_3}}{NR \log \frac{\tan \theta}{\tan \gamma}} = C_0 \frac{2\pi K}{N\omega} y^2$$

$$t = \frac{C_0 2\pi K R \log \frac{\tan \theta}{\tan \gamma}}{M_{r_3} \omega} y^2$$

$$C_3 = \frac{C_0 2\pi K R \log \frac{\tan \theta}{\tan \gamma}}{M_{r_3} \omega}$$

$$t = C_3 y^2$$

$$y = \sqrt{\frac{t}{C_3}}$$

$$C_4 = \frac{1}{\sqrt{C_3}}$$

$$y = C_4 \sqrt{t}$$

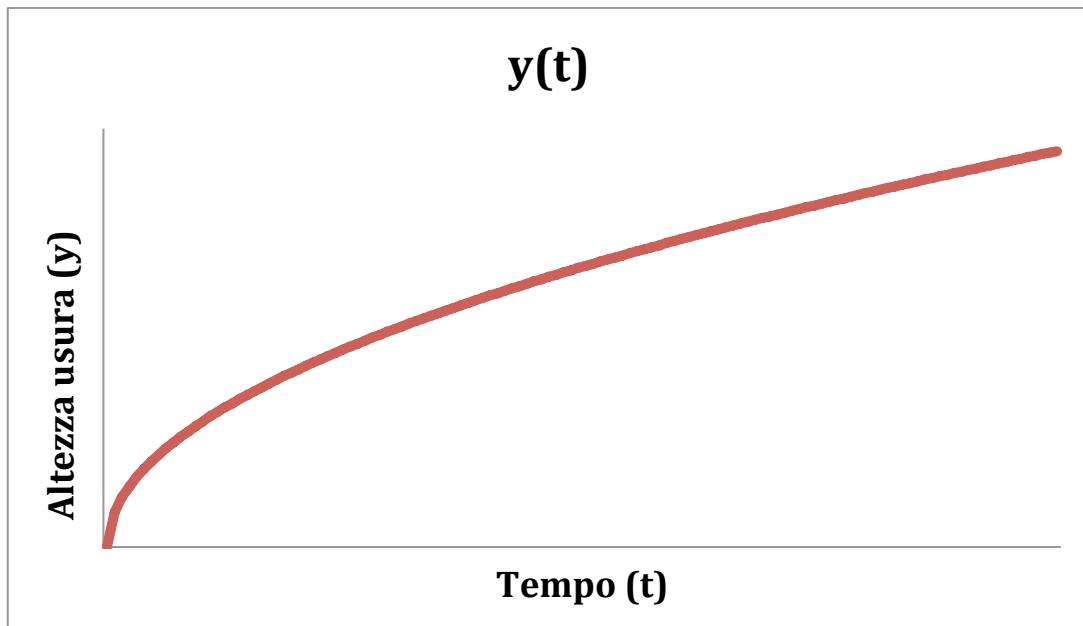


Figura 30 – Andamento dell'usura in funzione del tempo

Il problema è riuscire a determinare  $C_0$ . Tuttavia, si può ricavarlo per via sperimentale.

$$C_0 = \frac{M_{r_3} \omega t_{TOT}}{2\pi K R \log \frac{\tan \theta}{\tan \gamma} y_{finale}^2}$$

Tutti i termini di questa equazione sono noti. Occorre calcolare la larghezza dello strato usurato (b) e ricavare facilmente  $y_{finale}$ .

Quindi è possibile individuare una coppia di coordinate cartesiane ( $t_{TOT}; y_{finale}$ ), appartenenti al piano t-y, in cui passa la funzione  $y = C_4 \sqrt{t}$ . Noto  $C_0$ , è possibile determinare l'altezza  $y$  per ogni valore  $t$  rilevato durante le prove.

$C_0$  è un coefficiente legato alla durezza dei due membri che entrano in contatto. Siccome in questo studio viene utilizzato il medesimo materiale elastomerico per le guarnizioni utilizzate, è possibile affermare che il coefficiente  $C_0$  dipenda solo dalla durezza superficiale dell'albero. In questo modo, si può trovare la relazione che lega la durezza dell'albero con la quantità di materiale asportato.

## Capitolo 6

# PROVE SPERIMENTALI

### 6.1 INTRODUZIONE

Nonostante le tenute a labbro siano usate da circa settant'anni, la loro progettazione fino a oggi ha avuto principalmente basi empiriche. I meccanismi fisici che governano il comportamento delle guarnizioni non sono ancora stati compresi pienamente per la loro complessità; è per questa ragione che non esistono ancora strumentazioni di progettazione analitica. Solo negli ultimi anni le osservazioni sperimentali sono state organizzate per costruire un modello concettuale, per spiegare il comportamento fisico delle tenute a labbro. E' stato chiaro fin da subito che, per assicurare una buona lubrificazione, fosse necessaria la presenza di un film d'olio posto tra i due membri. In questo modo possono essere limitati danni meccanici, termici e di usura.

Questo studio tratta il sistema sotto il profilo elasto-idrodinamico, poiché comprende sia un'analisi delle deformazioni che avvengono sul labbro, sia l'analisi idrodinamica del meato lubrificante. L'analisi idrodinamica consiste nella soluzione numerica dell'equazione di Reynolds, dalla quale si possono ricavare la pressione e la distribuzione degli sforzi di taglio. In tal modo si possono conoscere le deformazioni da cui si ricava la distribuzione dello spessore del film lubrificante. Queste considerazioni sono state molto importanti per spiegare la fisica alla base delle tenute a labbro, però non sono facilmente adattabili a strumenti di progettazione, in quanto le applicazioni

quantitative di questi concetti necessitano di tempi di calcolo molto lunghi. La capacità di carico generata nel film lubrificante è stata collegata alla microgeometria della superficie del labbro stesso.

Molti dei modelli matematici esistenti sviluppati considerano l'albero perfettamente liscio, perché la rugosità delle asperità sulla superficie dell'albero è solo una piccola percentuale di quella delle asperità sulla superficie del labbro. Tuttavia, sia le osservazioni sperimentali che l'esperienza pratica indicano che la finitura superficiale dell'albero ha un effetto rilevante sull'efficienza della guarnizione. È risaputo che se la superficie dell'albero è troppo rugosa o troppo liscia non si genera un meccanismo di tenuta adeguato [2].

## 6.2 MODALITA' SPERIMENTALE

Le prove sperimentali svolte in laboratorio hanno lo scopo di valutare il comportamento delle tenute al variare della durezza superficiale dell'albero. È possibile studiare il comportamento delle guarnizioni mediante il valore della coppia resistente esercitata dal labbro della tenuta sul mozzo posto in rotazione.

La metodologia con la quale le prove sono state eseguite è la stessa per ogni particolare esaminato. Sono stati svolti 15 test, 3 per ogni pezzo con un differente tipo di indurimento superficiale. Ciascuna prova è durata 8 ore.

Inizialmente è stato posizionato il labbro della guarnizione sulla zona superficiale indurita e rettificata. L'esatta posizione della tenuta è determinabile grazie alla presenza della scala graduata sul carrello.

Dopo aver impostato il valore della velocità su TwinCAT PLC Control a 2000 rpm, valore mantenuto costante per tutte le prove, si è avviato il sistema,

visualizzando sull'interfaccia di TwinCAT Scope View l'andamento della coppia rilevata.

Per la prima delle tre prove eseguita su ogni pezzo, sono stati rilevati i valori della temperatura del labbro, della superficie dell'albero nella zona di contatto e della camera dell'olio. Per le misurazioni della temperatura è stato utilizzato un termometro digitale fornito di termocoppia. Queste misure sono necessarie per valutare se i valori rientrano nei parametri ammissibili dei vari componenti utilizzati: per esempio, il lubrificante deve lavorare in un range di temperatura prestabilito e la guarnizione non può raggiungere temperature eccessivamente elevate per non comprometterne l'integrità.

I valori della coppia sono stati rivelati ogni 3 s dal sistema computerizzato. A intervalli prestabiliti, è stata calcolata la media aritmetica dei valori della coppia e riportata in tabella. Gli intervalli sono minori nella prima parte della prova per determinare con maggiore precisione il transitorio.

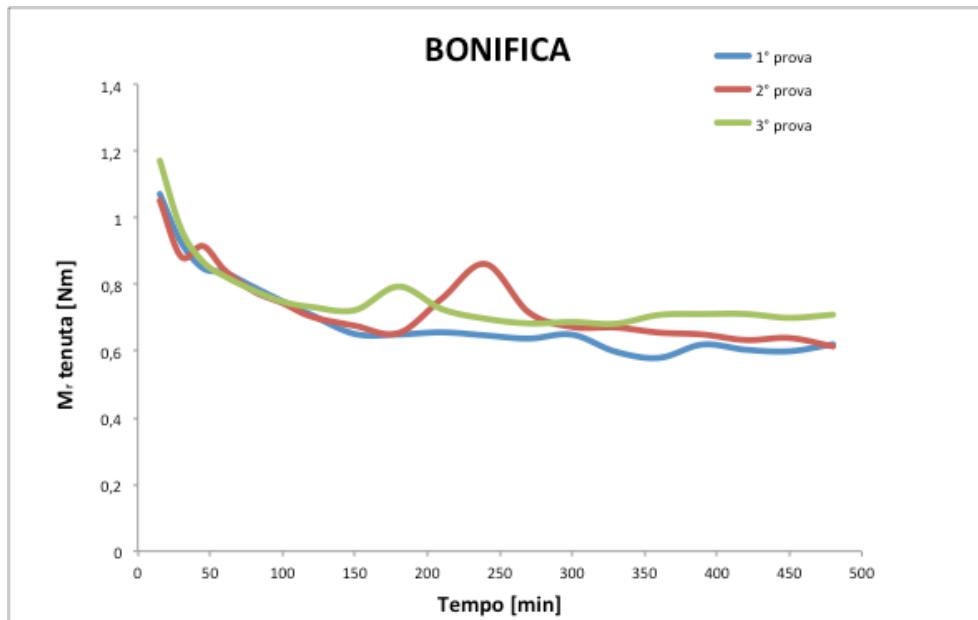
Le superfici sono state rettificate e non presentano scanalature elicoidali dovute alla tornitura, perciò non è importante stabilire a priori il senso della rotazione dell'albero: l'importante è mantenere lo stesso verso per tutte e tre le prove. Cambiando il senso di rotazione, infatti, non si avrebbe più il corretto meccanismo di tenuta, a causa dell'orientamento dei micro-pattini che si generano sul labbro dopo i primi istanti di rotazione.

Terminate le tre prove sul mozzo, la guarnizione usata è stata sostituita con una nuova. Il procedimento è stato eseguito per tutti e cinque i mozzi.

### 6.3 DATI RILEVATI

*Tabella I - Dati dei valori del cilindro bonificato*

TEMPO [min]	BONIFICA								
	1° prova		2° prova		3° prova		TEMPERATURA [°C]		
	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	Albero	Tenuta	Camera d'olio
0							24	24	24
15	1,6171	1,0736	1,5964	1,0529	1,7164	1,1729	49	42	36
30	1,4699	0,9264	1,4269	0,8834	1,5094	0,9659	57	52	43
45	1,3923	0,8488	1,4590	0,9155	1,4116	0,8681	60	55	49
60	1,3791	0,8356	1,3867	0,8432	1,3682	0,8247	63	57	55
80	1,3357	0,7922	1,3232	0,7797	1,3257	0,7822	66	60	56
100	1,2928	0,7493	1,2877	0,7442	1,2917	0,7482	69	62	60
120	1,2521	0,7086	1,2469	0,7034	1,2761	0,7326	70	62	61
150	1,1949	0,6514	1,2196	0,6761	1,2665	0,723	71	63	62
180	1,1935	0,65	1,1977	0,6542	1,3372	0,7937	73	65	65
210	1,2001	0,6566	Blocco motore	0,7579	1,2696	0,7261	75	68	68
240	1,1908	0,6473	1,4050	0,8615	1,2408	0,6973	76	68	68
270	1,1813	0,6378	1,2596	0,7161	1,2267	0,6832	77	68	68
300	1,1930	0,6495	1,2161	0,6726	1,2308	0,6873	74	67	67
330	1,1417	0,5982	1,2146	0,6711	1,2258	0,6823	76	67	67
360	1,1234	0,5799	1,1992	0,6557	1,2522	0,7087	77	68	67
390	1,1634	0,6199	1,1935	0,6500	1,2550	0,7115	77	68	68
420	1,1477	0,6042	1,1769	0,6334	1,2549	0,7114	78	68	68
450	1,1432	0,5997	1,1830	0,6395	1,2434	0,6999	78	68	67
480	1,1642	0,6207	1,1578	0,6143	1,2527	0,7092	78	68	68



*Figura 31 – Andamento M<sub>r</sub> delle 3 prove del cilindro bonificato*

Tabella II - Dati dei valori del cilindro cementato

CEMENTAZIONE												
TEMPO [min]	1° prova		2° prova		3° prova					Albero	Tenuta	Camera d'olio
	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]						
0										23	23	23
15	1,3865	0,8430	1,4225	0,8790	1,4290	0,8855	45	35	34			
30	1,2466	0,7031	1,2497	0,7062	1,2718	0,7283	54	44	44			
45	1,1858	0,6423	1,2342	0,6907	1,2195	0,6760	60	49	49			
60	1,1284	0,5849	1,1789	0,6354	1,1812	0,6377	64	54	54			
80	1,0940	0,5505	1,1885	0,6450	1,1539	0,6104	66	56	56			
100	1,0746	0,5311	1,1385	0,5950	1,1362	0,5927	67	57	56			
120	1,0674	0,5239	1,0983	0,5548	1,1088	0,5653	69	58	58			
150	1,0231	0,4796	1,0751	0,5316	1,0824	0,5389	70	59	59			
180	0,9872	0,4437	1,0650	0,5215	1,0711	0,5276	71	60	60			
210	0,9669	0,4234	1,0591	0,5156	1,0521	0,5086	74	63	62			
240	0,9729	0,4294	1,0622	0,5187	1,0406	0,4971	74	63	63			
270	0,9675	0,4240	1,0405	0,4970	1,0487	0,5052	74	64	64			
300	0,9571	0,4136	1,0477	0,5042	1,0557	0,5122	74	64	64			
330	0,9726	0,4291	1,0465	0,5030	1,0474	0,5039	74	64	64			
360	0,9703	0,4268	1,0456	0,5021	1,0509	0,5074	75	64	64			
390	0,9756	0,4321	1,0446	0,5011	1,0553	0,5118	75	65	64			
420	0,9886	0,4451	1,0467	0,5032	1,0527	0,5092	75	65	65			
450	0,9879	0,4444	1,0548	0,5113	1,0627	0,5192	75	65	65			
480	0,9936	0,4501	1,0572	0,5137	1,0601	0,5166	75	65	65			

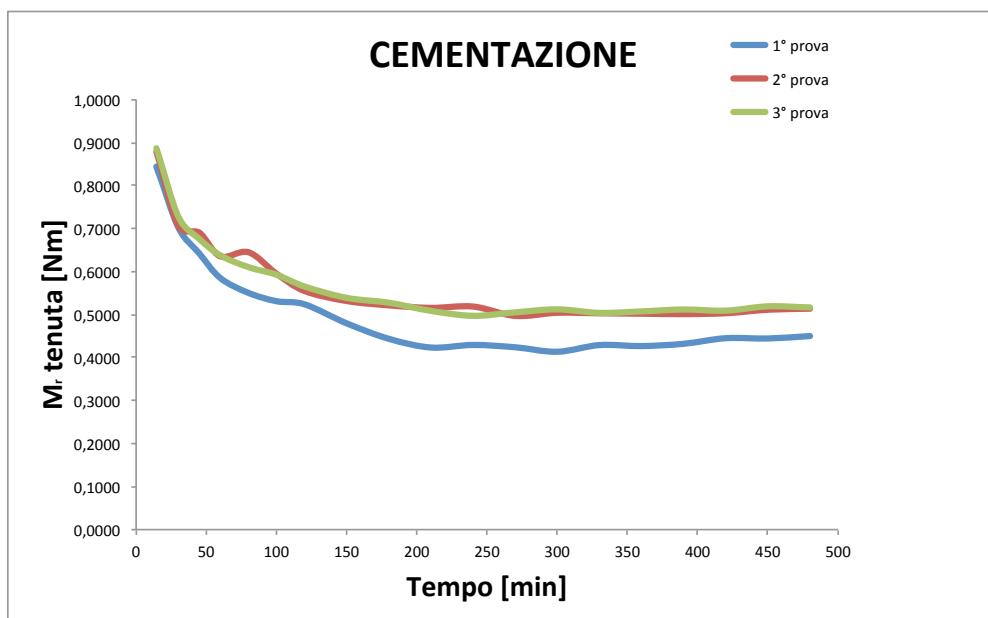
Figura 32 - Andamento  $M_r$  delle 3 prove del cilindro cementato

Tabella III- Dati dei valori del cilindro nitrurato

NITRURAZIONE									
TEMPO [min]	1° prova		2° prova		3° prova				
	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	Albero	Tenuta	Camera d'olio
0							25	25	25
15	1,3690	0,8255	1,4238	0,8803	1,3905	0,8470	40	35	34
30	1,2328	0,6893	1,2268	0,6833	1,2362	0,6927	53	43	43
45	1,1325	0,5890	1,1813	0,6378	1,1958	0,6523	59	50	49
60	1,1259	0,5824	1,1672	0,6237	1,1797	0,6362	62	51	51
80	1,0857	0,5422	1,1376	0,5941	1,1572	0,6137	65	56	55
100	1,0584	0,5149	1,1109	0,5674	1,1182	0,5747	69	59	59
120	1,0401	0,4966	1,0980	0,5545	1,1169	0,5734	71	62	62
150	1,0210	0,4775	1,0658	0,5223	1,0900	0,5465	72	63	62
180	1,0033	0,4598	1,0399	0,4964	1,0522	0,5087	72	63	63
210	0,9789	0,4354	1,0169	0,4734	1,0193	0,4758	73	63	63
240	0,9730	0,4295	1,0101	0,4666	1,0077	0,4642	73	64	63
270	0,9658	0,4223	1,0043	0,4608	1,0101	0,4666	74	64	63
300	0,9574	0,4139	1,0057	0,4622	1,0080	0,4645	75	64	64
330	0,9711	0,4276	1,0043	0,4608	1,0165	0,4730	75	65	64
360	0,9739	0,4304	1,0088	0,4653	1,0255	0,4820	75	65	64
390	0,9766	0,4331	1,0060	0,4625	1,0239	0,4804	76	65	65
420	0,9659	0,4224	1,0241	0,4806	1,0402	0,4967	76	67	67
450	0,9617	0,4182	1,0190	0,4755	1,0398	0,4963	77	68	67
480	0,9644	0,4209	1,0215	0,4780	1,0479	0,5044	77	68	68

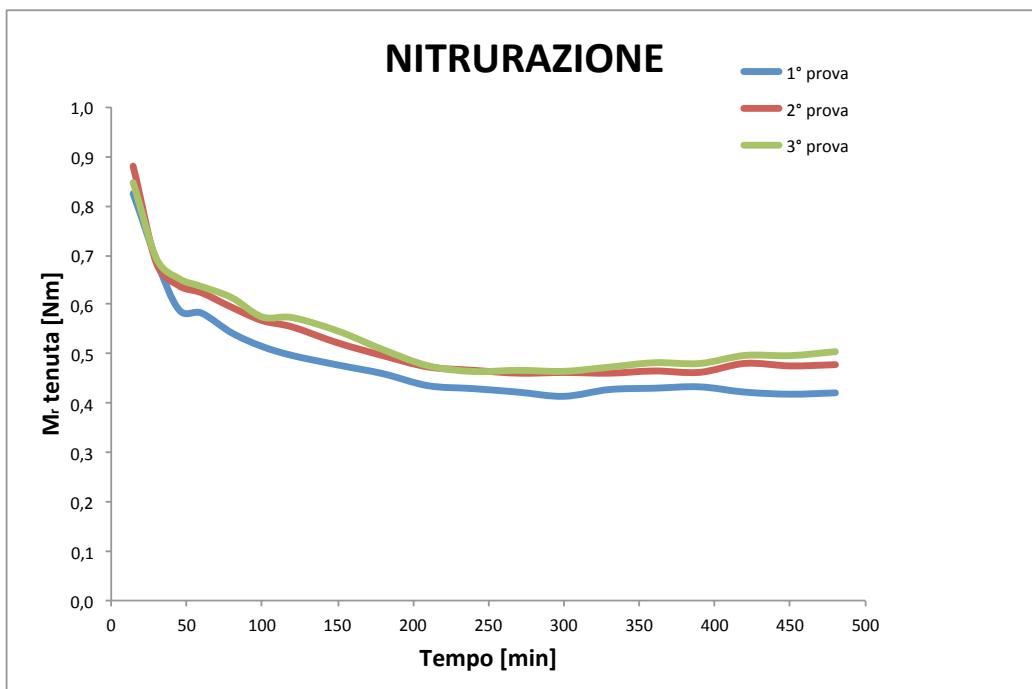
Figura 33 - Andamento M<sub>r</sub> delle 3 prove del cilindro nitrurato

Tabella IV - Dati dei valori del cilindro cromato

CROMATURA									
TEMPO [min]	1° prova		2° prova		3° prova		TEMPERATURA [°C]		
	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	Albero	Tenuta	Camera d'olio
0							22	22	22
15	1,5835	1,0400	1,4854	0,9419	1,4707	0,9272	38	28	27
30	1,4239	0,8804	1,3234	0,7799	1,3235	0,7800	49	38	38
45	1,3545	0,8110	1,2762	0,7327	1,2799	0,7364	56	46	45
60	1,3006	0,7571	1,2536	0,7101	1,2527	0,7092	61	51	51
80	1,2471	0,7036	1,2165	0,6730	1,2322	0,6887	63	52	52
100	1,1963	0,6528	1,1773	0,6338	1,2173	0,6738	66	56	55
120	1,1654	0,6219	1,1767	0,6332	1,1860	0,6425	67	57	56
150	1,1516	0,6081	1,1534	0,6099	1,1639	0,6204	68	58	57
180	1,1494	0,6059	1,1372	0,5937	1,1444	0,6009	69	59	58
210	1,1455	0,6020	1,1225	0,5790	1,1191	0,5756	70	60	60
240	1,1198	0,5763	1,1007	0,5572	1,0754	0,5319	71	61	61
270	1,0899	0,5464	1,0873	0,5438	1,0483	0,5048	72	62	61
300	1,0712	0,5277	1,0716	0,5281	1,0382	0,4947	72	62	62
330	1,0583	0,5148	1,0394	0,4959	1,0439	0,5004	73	62	62
360	1,0304	0,4869	1,0285	0,4850	1,0353	0,4918	73	63	62
390	1,0356	0,4921	1,0184	0,4749	1,0344	0,4909	73	63	63
420	1,0389	0,4954	1,0297	0,4862	1,0588	0,5153	74	64	63
450	1,0402	0,4967	1,0344	0,4909	1,0588	0,5153	74	64	63
480	1,0378	0,4943	1,0394	0,4959	1,0422	0,4987	74	64	64

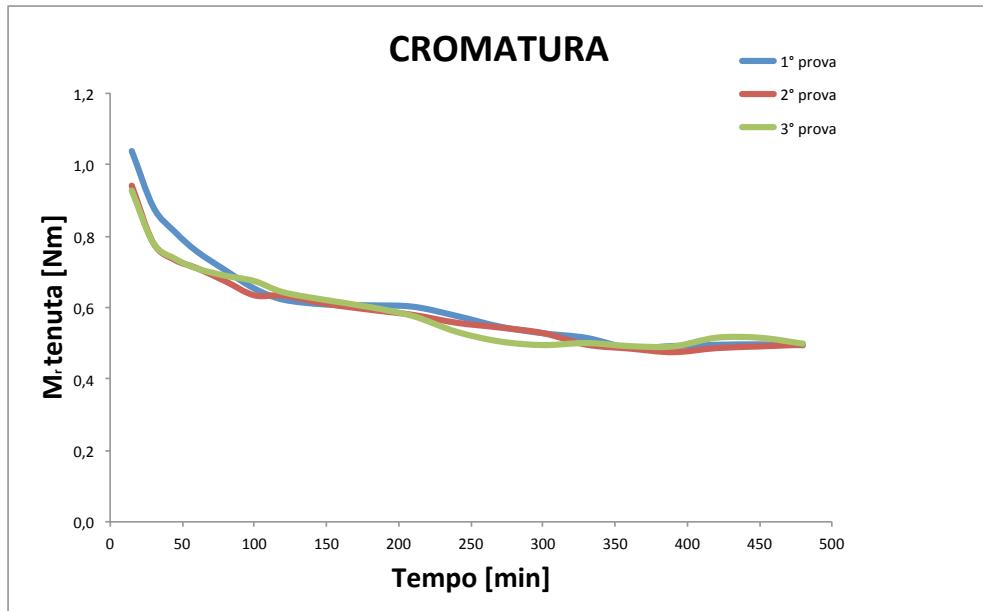
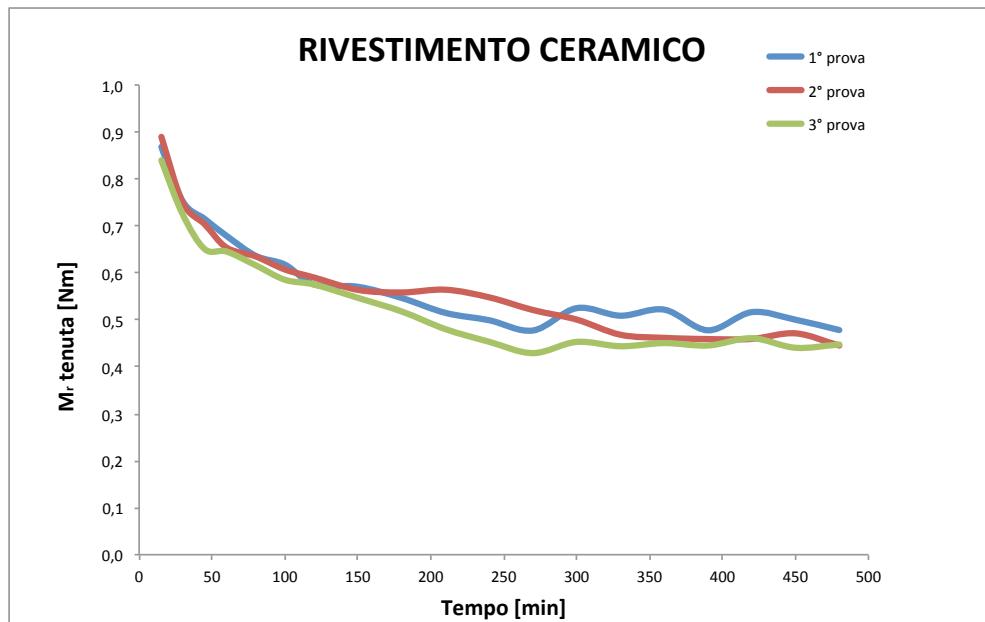
Figura 34 - Andamento  $M_r$  delle 3 prove del cilindro cromato

Tabella V - Dati dei valori del cilindro con il rivestimento ceramico

RIVESTIMENTO CERAMICO									
TEMPO [min]	1° prova		2° prova		3° prova				
	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	M <sub>r</sub> RILEVATO [Nm]	M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]	Albero	Tenuta	Camera d'olio
0							24	24	24
15	1,4109	0,8674	1,4347	0,8912	1,3833	0,8398	41	35	34
30	1,2957	0,7522	1,2928	0,7493	1,2677	0,7242	52	45	42
45	1,2586	0,7151	1,2473	0,7038	1,1944	0,6509	58	48	48
60	1,2225	0,6790	1,1975	0,6540	1,1892	0,6457	60	51	50
80	1,1800	0,6365	1,1788	0,6353	1,1599	0,6164	63	55	54
100	1,1613	0,6178	1,1510	0,6075	1,1291	0,5856	66	56	56
120	1,1192	0,5757	1,1339	0,5904	1,1190	0,5755	66	56	56
150	1,1142	0,5707	1,1076	0,5641	1,0906	0,5471	67	57	56
180	1,0904	0,5469	1,1021	0,5586	1,0616	0,5181	67	57	57
210	1,0586	0,5151	1,1080	0,5645	1,0240	0,4805	68	58	57
240	1,0429	0,4994	1,0917	0,5482	0,9970	0,4535	69	59	59
270	1,0211	0,4776	1,0647	0,5212	0,9729	0,4294	70	62	60
300	1,0688	0,5253	1,0443	0,5008	0,9968	0,4533	71	62	61
330	1,0526	0,5091	1,0120	0,4685	0,9875	0,4440	71	62	61
360	1,0655	0,5220	1,0054	0,4619	0,9943	0,4508	73	63	61
390	1,0215	0,4780	1,0028	0,4593	0,9891	0,4456	73	64	63
420	1,0602	0,5167	1,0031	0,4596	1,0046	0,4611	74	64	64
450	1,0440	0,5005	1,0150	0,4715	0,9843	0,4408	75	64	64
480	1,0220	0,4785	0,9890	0,4455	0,9913	0,4478	75	66	65

Figura 35 - Andamento  $M_r$  delle 3 prove del cilindro con il rivestimento ceramico

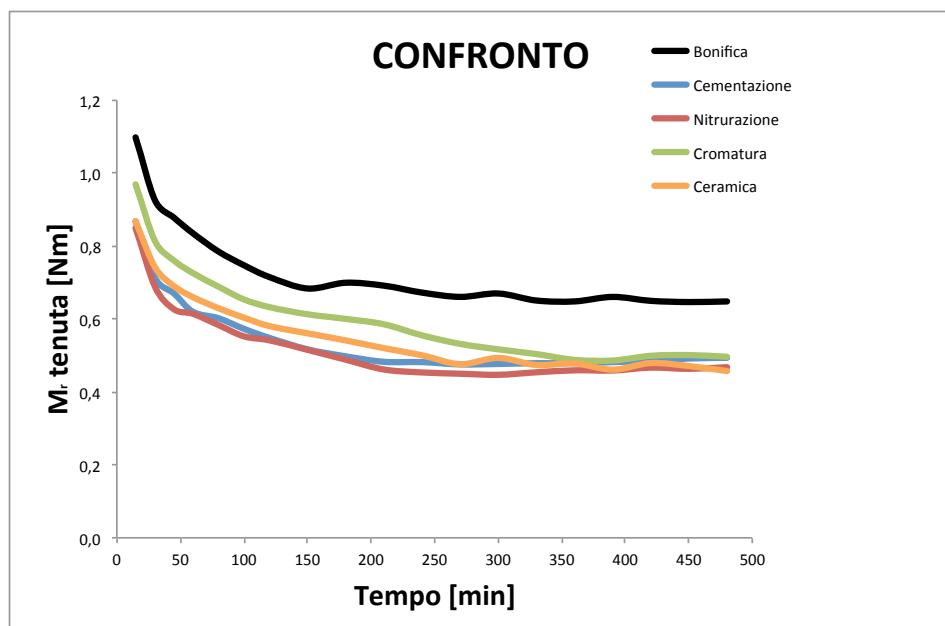
#### 6.4 ELABORAZIONE DATI RACCOLTI

Dopo aver raccolto i dati della coppia resistente, è stato necessario epurarli dal contributo dovuto agli attriti sviluppati nei cuscinetti radiali rigidi a sfere. Per ottenere questo valore è stata fatta un'altra prova senza che il cilindro fosse in contatto con il labbro della guarnizione. Il test è stato eseguito alla stessa velocità di rotazione delle prove svolte in precedenza. La durata di questo test è stato di 10 minuti, infatti, questo lasso di tempo è più che sufficiente per permettere al momento resistente prodotto dai supporti di raggiungere un valore costante di regime. Per una maggiore precisione dei risultati, è stato anche sottratto l'apporto dato dalle forze d'attrito viscoso, generate sulla parte del cilindro contenuto nella camera dell'olio. Questa resistenza, calcolata teoricamente, può essere trascurata perché il suo valore medio è irrilevante rispetto al momento rilevato ( $0,3 \cdot 10^{-3}$  Nm). In questo modo è stato possibile valutare il solo contributo resistente dovuto allo strisciamento del labbro della tenuta sulla superficie indurita dell'albero.

## 6.5 CONFRONTO

*Tabella VI - Dati di confronto fra i vari momenti resistenti*

CONFRONTO M <sub>r</sub> TENUTA [Nm]					
TEMPO [min]	Bonifica	Cementazione	Nitrurazione	Cromatura	Ceramica
15	1,0998	0,8692	0,8509	0,9697	0,8661
30	0,9252	0,7125	0,6884	0,8134	0,7419
45	0,8775	0,6697	0,6264	0,7600	0,6899
60	0,8345	0,6193	0,6141	0,7255	0,6596
80	0,7847	0,6020	0,5833	0,6884	0,6294
100	0,7472	0,5729	0,5523	0,6535	0,6036
120	0,7149	0,5480	0,5415	0,6325	0,5805
150	0,6835	0,5167	0,5154	0,6128	0,5606
180	0,6993	0,4976	0,4883	0,6002	0,5412
210	0,6914	0,4825	0,4615	0,5855	0,5200
240	0,6723	0,4817	0,4534	0,5551	0,5004
270	0,6605	0,4754	0,4499	0,5317	0,4761
300	0,6698	0,4767	0,4469	0,5168	0,4931
330	0,6505	0,4787	0,4538	0,5037	0,4739
360	0,6481	0,4788	0,4592	0,4879	0,4782
390	0,6605	0,4817	0,4587	0,4860	0,4610
420	0,6497	0,4858	0,4666	0,4990	0,4791
450	0,6464	0,4916	0,4633	0,5010	0,4709
480	0,6481	0,4935	0,4678	0,4963	0,4573



*Figura 36 – Confronto degli andamenti medi*

In figura 42 sono riportati gli andamenti medi delle tre prove eseguite sui diversi pezzi lavorati.

## Capitolo 7

# OSSERVAZIONI E CONCLUSIONI

Si è cercato, infine, di dare un'interpretazione ai dati ottenuti empiricamente, tenendo presente le considerazioni teoriche fino ad ora acquisite sull'argomento. Nonostante questo studio possa essere considerato solo come preliminare, data la vastità e complessità del fenomeno, osservando i risultati ottenuti dalle prove sperimentali condotte in laboratorio, si può notare come la superficie maggiormente indurita sia quella in corrispondenza della quale la tenuta oppone un momento resistente minore.

Dall'indagine sperimentale è quindi emerso un riscontro con la teoria che descrive il funzionamento delle tenute a labbro.

In tutte le prove effettuate, si è riscontrato come l'andamento del momento resistente abbia una tendenza a diminuire nel tempo e ad assumere un valore di regime costante dopo un transitorio di circa 4 ore. La diminuzione del momento resistente medio è legata all'aumento di temperatura dell'olio lubrificante. La variazione di temperatura, infatti, provoca una diminuzione della viscosità, legata direttamente al valore del momento resistente. Questa conclusione è anche confermata dai dati raccolti nella seconda prova eseguita sul particolare bonificato: tra gli intermedi di 180 e 210 minuti il motore si è arrestato improvvisamente, rimanendo fermo per circa 20 minuti. Questo lasso di tempo è stato sufficiente per avere un parziale raffreddamento dell'olio lubrificante, rendendo elevati i valori del momento resistente della successiva ora, rispetto alla tendenza avuta nelle altre due prove. In figura 24, si può

osservare che l'andamento della seconda prova (linea colorata di rosso) ha un picco anomalo successivamente ai 210 minuti.

Un altro parimento che determina questo andamento decrescente è il cambiamento del regime di attrito: si parte, infatti, da una condizione di attrito statico, per poi passare a una condizione di attrito misto, fino all'instaurarsi della lubrificazione idrodinamica completa, che richiede un momento resistente minore per mantenere la coppia rotoidale a velocità angolare costante.

## BIBLIOGRAFIA & SITOGRADIA

- [1] Jagger E. T., Study of the Lubrication of Synthetic Rubber Rotary Shaft Seals, Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear, I.Mech.E., pp. 409-415, 1957.
- [2] E. Funaioli, A. Maggiore, U. Meneghetti, Lezioni di meccanica applicata alle macchine, Patron editore, 2005.
- [3] W.F. Smith, J.Hashemi, Scienza e Tecnologia dei Materiali, Ed. McGraw-Hill, 2012.
- [4] [www.plasmatronindia.com](http://www.plasmatronindia.com)
- [5] Catalogo tecnico degli anelli di tenuta, [www.angst-pfister.com](http://www.angst-pfister.com).
- [6] Jagger, E. T., Rotary Shaft Seals: The sealing Mechanism of Synthetic Rubber Seals Running at Atmospheric Pressure, in Proc. Inst. Mech. Engrs., vol. 171, (1957).
- [7] Kanakasabai, Vetrivel, Detailed surface analysis of lip seal elastomers ran against shafts manufactured with triangular cavities. University of Kentucky Master's Theses. Paper 610, (2009).
- [8] [www.rlhusdon.com](http://www.rlhusdon.com)
- [9] Catalogo tecnico oli lubrificanti, [www.vanguard-oil-and-gas.com](http://www.vanguard-oil-and-gas.com).
- [10] Servo Azionamento Beckhoff®, Guida tecnica.

## **RINGRAZIAMENTI**

Desidero ringraziare il Chiar.mo Prof. Ing. Edzeario Prati, relatore della tesi, e il Prof. Ing. Alessandro Tasora, correlatore, per avermi seguito costantemente in tutto il periodo di svolgimento di questa tesi e per la grande disponibilità dimostrata.

Un altro sincero ringraziamento va a Pietro, Pier Mario e Andrea, i tecnici del laboratorio che mi hanno aiutato durante l'esecuzione delle prove sperimentali.

Vorrei inoltre ringraziare i miei genitori, Fabio e Cristina, per il supporto dimostrato in tutti questi anni di studio. Infine ringrazio la mia fidanzata Francesca.