

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi dei sistemi di misurazione e
sviluppo di procedure automatiche
per incrementare la ripetibilità e
ridurre il tempo di processo**

Testing: MSA, six sigma, industria 4.0



Relatore:

prof. Terenziano Raparelli

Candidato:

Marisa MUNAFÒ
matricola: 224817

**Supervisore aziendale
SKF Global Testing Italy**

dott. ing. Filippo Lorenzini, Claudio Savarese

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

Sommario

Il lavoro di tesi é stato svolto presso il *Global Testing Italy* di SKF Airasca, un reparto che si occupa di verificare che i cuscinetti rispettino le specifiche di progetto, di analizzare e giustificare la presenza di eventuali difetti e di collaudare nuovi prodotti o soluzioni innovative.

L'oggetto dell'elaborato riguarda l'analisi della qualità di processo e lo sviluppo di nuove procedure finalizzate alla riduzione della varianza e all'obiettivo zero difetti. Infatti, poiché la vendita e il successivo montaggio di un cuscinetto imperfetto possono causare danni rilevanti, risulta di fondamentale importanza garantire l'affidabilità e l'efficienza di ogni processo.

Il lavoro di tesi si articola in due parti. La prima riporta la *Measurement System Analysis* (MSA) eseguita su diversi sistemi: *Friction Torque*, *Preload Clearance Analyzer*, *Karl Fisher* e *Linear Height*.

L'analisi dei sistemi di misura, in accordo alla normativa Europea, può essere eseguita su fogli di calcolo Excel o, in modo più accurato, sul software Minitab. In questo lavoro si è scelto di utilizzare Minitab e di condurre studi di *capability*, *linearity*, analisi del bias e dell'indice R&R.

Il sistema di misura del precarico/gioco ha mostrato, in seguito all'MSA, una bassa ripetibilità e riproducibilità. Si é ritenuto necessario analizzare le cause di incertezza e sviluppare nuove soluzioni per ottimizzare il processo. Sono state individuate due principali fonti di errore: di misura e di elaborazione dei dati. Per ragioni economiche (costo zero) e per la necessità di evolvere verso l'industria 4.0, si è scelto di agire sulla seconda tipologia di errore implementando una procedura automatica innovativa.

La seconda parte descrive lo sviluppo di tale procedura e i vantaggi a cui ha portato. L'elaborazione dei dati é stata implementata in ambiente Matlab e, al fine di rendere il programma *user-friendly*, é stata realizzata un'interfaccia grafica. L'automatizzazione del processo, eliminando le operazioni gestite manualmente dall'operatore, ha permesso una riduzione dell'incertezza del 50%, un incremento di ripetibilità e un'elevata riduzione del tempo di misura.

Summary

This thesis has been elaborated during a stage in the division Global Testing Italy (GTI) of SKF Airasca.

The GTI deals with the analysis of the quality of bearings (components to reduce friction) and the evaluation of defects. Data from thousands of tests conducted annually provide a broad empirical knowledge base for failure analyses and a consistent flow of new products and innovative solutions. The range of testing includes durability, fatigue tests, contaminant exclusion, corrosion, friction torque, dry wear, and material compatibility tests¹.

GTI and SKF in general is aiming to apply continuous improvement throughout the organization, with the objective of zero defect and to operate capable, reliable and efficient business processes.

This work is divided into two parts. The first concerns the Measurement System Analysis on some processes (friction torque measurement, Karl Fisher method, preload/clearance machine) to guarantee the reliability according to the QT5-SKF normative. The objective of this analysis is to obtain information relative to the amount and types of measurement variation produced by the system. The procedure consists of two steps: determination of instrument capability and determination of r&R (evaluation of the effects of repeatability and reproducibility). The study has been performed on Minitab, a data analysis software.

The MSA of the preload/clearance measurement system showed a low reproducibility and repeatability and so the system has been improved through the development of a new automated procedure to elaborate the data.

The second part concerns this procedure, its creation on Matlab, its advantages. The new procedure increased the reliability and reduced the time process.

To make the procedure user friendly a graphic interface has been developed, and the work instructions to use it are at the end of this work.

¹www.skf.com/group/products/seals/engineering-services/test-and-analysis/index.html

Ringraziamenti

Un grazie al reparto del Global Testing Italy di SKF Airasca per i mezzi messi a disposizione, per le informazioni fornite e per l'opportunità di un percorso di crescita in un contesto mutevole, innovativo, stimolante.

Grazie al professore Terenziano Raparelli, relatore di questa tesi, per la disponibilità.

Grazie alla mia famiglia per la fiducia e la presenza costante.

Grazie a Francesca per avermi sostenuto, sopportato ed incoraggiato in tutto il mio percorso.

Grazie a Matteo per avermi guidato ed aiutato.

Un grazie ai miei amici Teresa, Sharon, Viviana, Antonio T., Davide, Damiano, Roberto, Antonio P., Antonio L., Pasquale, Rino che ci sono sempre stati.

Indice

Sommario	III
Ringraziamenti	V
I Introduzione generale	1
1 SKF	3
1.1 SKF in breve	3
1.2 Lo stabilimento di Airasca	4
1.3 Politica per la qualità	6
1.3.1 Metodologie di miglioramento continuo: DMAIC	6
II L'Analisi dei Sistemi di Misura (MSA)	9
2 Cos'è l'MSA	11
2.1 Principi base	11
2.2 Capacità di processo	13
2.3 Bias	17
2.4 Linearità	18
2.5 Gage R&R	20
3 MSA: Friction torque high speed	25
3.1 Preparazione dello studio	25
3.2 Procedura di montaggio ed ottenimento delle misure	26
3.3 Gage R&R study	29
3.4 Analisi dei risultati e conclusioni	31

4	MSA: Friction torque con cordino	33
4.1	Preparazione dello studio	33
4.2	Procedura di montaggio ed ottenimento delle misure	34
4.3	Gage R&R study	35
4.4	Analisi dei risultati e conclusioni	37
4.4.1	Analisi dell'influenza della temperatura sulle misure	38
5	MSA: Altimetro	41
5.1	Preparazione dello studio	41
5.2	Gage R&R study	42
5.3	Analisi dei risultati e conclusioni	45
5.3.1	Capability	47
5.3.2	Bias and linearity	48
6	MSA: Metodo di Karl Fisher	49
6.1	Preparazione dello studio	49
6.2	Esecuzione della prova	49
6.3	Gage R&R study	50
6.4	Analisi dei risultati e conclusioni	52
7	MSA: Macchina di misura di precarico/gioco (PCA)	53
7.1	Preparazione dello studio	53
7.2	Valutazione del precarico	54
7.2.1	Creazione del Masterfile	54
7.3	Procedura di montaggio, esecuzione della misura	55
7.4	Gage R&R study	57
7.5	Analisi dei risultati e conclusioni	59
III	Automatizzazione della misura di precarico	63
8	Verso l'industria 4.0	65
9	Il precarico/gioco nei cuscinetti	67
9.1	Concetti base	69
9.2	Esecuzione della prova ed elaborazione dati	73
9.3	Automatizzazione del processo: implementazione del programma	76
9.3.1	Analisi dei risultati	78
9.3.2	Conclusioni	83
9.4	Interfaccia grafica	84
9.5	Script	85
9.5.1	La funzione fminsearch	86

10 Work Instruction PCA Automatic Procedure	87
Bibliografia	89

Elenco delle tabelle

2.1	Criteri di accettazione per MSA	22
3.1	Misure friction torque high speed	28
3.2	Gage R%R Crossed friction torque high speed	29
4.1	Gage R%R Crossed friction torque con cordino	35
5.1	Specifiche per lo studio MSA sull'altimetro	41
5.2	Gage R%R Crossed Altimetro	42
6.1	Gage R%R Nested Karl Fisher	50
7.1	Gage R&R Crossed precarico/gioco	57
9.1	Gage R&R Crossed precarico/gioco	80
9.2	Tabella riassuntiva: confronto tra elaborazione manuale e procedura automatica	83

Elenco delle figure

1.1	Cuscinetto mozzo-ruota	4
1.2	Stabilimento SKF di Airasca	5
1.3	6 sigma	7
1.4	DMAIC	8
2.1	Varianza di processo	12
2.2	Capability studies	14
2.3	Capacità di processo	15
2.4	Bias	17
2.5	Linearità	18
2.6	Linee guida per accettare un sistema	20
2.7	Ripetibilità	21
2.8	Riproducibilità	21
2.9	Criteri di accettazione	23
3.1	Posizionamento del cuscinetto e centraggio della flangia	26
3.2	Allineamento con il giunto e chiusura dei grani	26
3.3	Grafici Gage R&R friction torque high speed	30
4.1	Montaggio del cuscinetto sulla macchina friction torque con cordino	34
4.2	Grafici Gage R&R friction torque con cordino	36
4.3	Scatter plot dei dati per analizzare la dipendenza della coppia d'attrito dalla temperatura	39
5.1	Grafici Gage R&R Altimetro	43
5.2	Gage R&R Variation Report Altimetro	44
5.3	Gage R&R Summary Report Altimetro	45
5.4	Process Capability Report Altimetro	47
5.5	Gage Linearity and Bias	48
6.1	Grafici Gage R&R Karl Fisher	51
7.1	Montaggio del cuscinetto sulla PCA	55
7.2	Posizionamento del mandrino ed applicazione del carico sulla PCA	56
7.3	Macchina PCA	56
7.4	Grafici Gage R&R Precarico/gioco	58
7.5	Gage R&R Variation Report Precarico/gioco Manuale	59

7.6	Gage R&R Summary Report Precarico/gioco Manuale	60
9.1	Vita del cuscinetto in funzione del precarico e dell'attrito	68
9.2	Influenza di un carico esterno su gruppi di cuscinetti precaricati . .	69
9.3	Gioco	70
9.4	Precarico	70
9.5	Cuscinetto precaricato	70
9.6	modello molla-corpo rigido)	71
9.7	Deformazione sfera-pista secondo il modello hertziano	71
9.8	Comportamento di un cuscinetto a due corone, non in gioco/preca- rico e caricato assialmente	72
9.9	Comportamento di un cuscinetto a due corone, in gioco e caricato assialmente	72
9.10	Comportamento di un cuscinetto a due corone, precaricato e caricato assialmente	72
9.11	Schema della macchina PCA	73
9.12	Come ricavare il valore di precarico	74
9.13	Come ricavare il valore di gioco	74
9.14	Creazione automatica di un master	77
9.15	Calcolo automatico del valore di gioco e precarico	78
9.16	Grafici Gage R&R crossed PCA con elaborazione automatica . . .	80
9.17	Gage R&R Variation Report Precarico/gioco con elaborazione au- tomatica	81
9.18	Gage R&R Summary Report Precarico/gioco con elaborazione au- tomatica	81
9.19	Analisi statistica della procedura manuale	82
9.20	Analisi statistica della procedura automatica	83
9.21	Interfaccia grafica	84
9.22	Algoritmo fminsearch (MATLAB)	86

Parte I

Introduzione generale

Capitolo 1

SKF

1.1 SKF in breve

Il Gruppo SKF è leader nell'ambito di cuscinetti volventi, tenute, mecatronica, servizi e sistemi di lubrificazione. La compagnia é fornitore globale di prodotti, soluzioni e servizi nel proprio settore. I servizi comprendono il supporto tecnico, i programmi di manutenzione, il condition monitoring, l'ottimizzazione dell'efficienza degli asset, la consulenza tecnica e la formazione. SKF possiede siti in 140 paesi e 46535 dipendenti.¹

L'azienda nasce nel 1907 a Göteborg, in Svezia (con il nome "Svenska Kullager Fabriken", ossia Fabbrica Svedese di Cuscinetti) ad opera di Sven Wingquist, inventore e brevettatore del cuscinetto orientabile a due corone di sfere.

SKF si espande rapidamente ed apre nuove filiali e concessionari in tutta Europa e negli Stati Uniti. Viene quotata nelle borse di Stoccolma, Parigi, Ginevra, Londra e Chicago. Nel 1935 la consociata AB Volvo si trasforma nella famosa casa automobilistica, distaccandosi dal gruppo. Dopo la guerra l'espansione di SKF non si arresta, vengono infatti fondate nuove sedi in America Latina, Giappone e India. Nel 1965 SKF arriva in Italia acquistando "RIV-Officine di Villar Perosa", maggiore produttrice italiana di cuscinetti volventi. Nel 2007, parallelamente ai festeggiamenti per il primo centenario dell'azienda, vengono inaugurati nuovi stabilimenti in Asia (Cina e Sud Korea).²

¹ Chi siamo - SKF.com

²Storia della SKF - SKF.com

1.2 Lo stabilimento di Airasca

La sede SKF di Airasca (fig.1.2), all'interno della quale sono state svolte le attività descritte in questa tesi, é operativa dal 1962 e comprende lo stabilimento Automotive, l'unitá Drive by Wire che sviluppa e produce soluzioni meccatroniche, il magazzino centrale prodotti finiti e gli uffici direttivi.

Nello stabilimento vengono realizzate tutte le fasi di lavorazione, dal componente al prodotto finito.

La produzione é organizzata per linee integrate e sono presenti 13 canali di produzione suddivisi per tipologia di cuscinetto. Lo stabilimento produce principalmente cuscinetti per applicazione automobilistica, in particolare cuscinetti mozzo ruota di tre diverse generazioni:

- I generazione, composti da anello interno, anello esterno, sfere, gabbia e schermi. É il costruttivamente piú semplice;
- II generazione (flangiati);
- III generazione (biflangiati). Sono i piú complessi dal punto di vista costruttivo, ma garantiscono una maggiore facilitá di montaggio (fig.1.1).



Figura 1.1. Cuscinetto mozzo-ruota

In tutte e tre le generazioni possono essere integrati i sensori per il controllo della frenata (ABS).

Le maggiori case automobilistiche sono clienti di questo stabilimento.

La produzione, negli ultimi anni, é stata estesa a cuscinetti per camion e per applicazioni agricole.

Lo stabilimento ha conseguito le certificazioni di qualità ISO/TS 16949:2009, ISO 14001:2004, OHSAS 18001:2007 e ISO 50001:2011. ³



Figura 1.2. Stabilimento SKF di Airasca.

³ I nostri siti produttivi - SKF.com

1.3 Politica per la qualità

L'SKF ha come obiettivo principale quello di assicurare la soddisfazione dei clienti attraverso due azioni correttive:

- assicurarsi che tutti i processi siano affidabili ed efficienti;
- adottare procedure di miglioramento continuo finalizzate all'obiettivo zero difetti.

Per raggiungere l'eccellenza l'SKF utilizza gli approcci Six Sigma e Business Excellence.

Il Gruppo SKF é quindi costantemente impegnato nel processo di ottimizzazione della qualità di tutti i suoi processi ed attività.

Le certificazioni del Gruppo SKF comprendono⁴:

- ISO 9001 (Qualità)
- ISO/TS 16949 (Qualità nel settore automotive)
- ISO 14001 (Ambiente)
- OHSAS 18001 (Salute e sicurezza)
- AS/EN 9100 (Settore aerospaziale)

1.3.1 Metodologie di miglioramento continuo: DMAIC

L'obiettivo dell'azienda è quello di controllare e ridurre la variabilità all'interno di tutti i processi attraverso il Six Sigma (fig.1.3):. La SKF ha iniziato ad applicare la metodologia del Six Sigma nel 1998, in Italia nel 2003.

Il Six Sigma si occupa del miglioramento della qualità dei prodotti e dei processi attraverso l'analisi dei difetti e la riduzione della varianza. Il Six Sigma porta ad un minor numero di errori, a prodotti e servizi migliori, ad un miglioramento e semplificazione dei processi ed a una riduzione dei lead time.

Il Six Sigma può anche portare a chiari benefici per i fornitori ed i clienti della SKF. La SKF non é particolarmente interessata ad operare come un'organizzazione di consulenza. Ridurre gli scarti ed i costi, infatti, eleva la soddisfazione del cliente. Per questo SKF offre ai suoi dipendenti corsi di formazione e *training* per garantire la diffusione della conoscenza ("the power of the knowledge engineering" è il motto aziendale) e l'acquisizione di strumenti comuni.

⁴SKF group quality policy - SKF.com

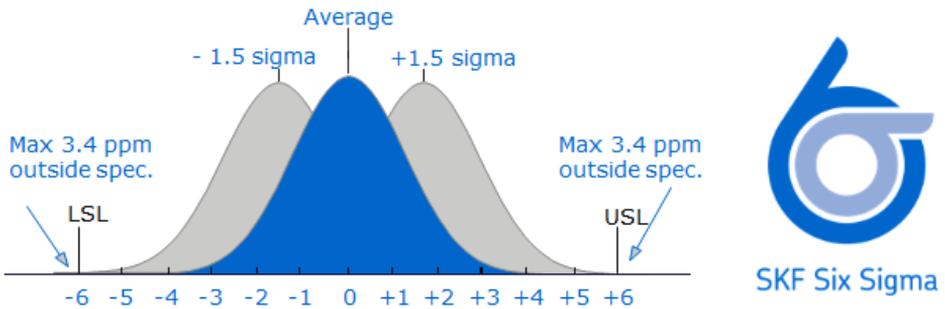


Figura 1.3. 6 sigma, da SKF Quality Techniques, QT 1

Il Six Sigma viene applicato attraverso due metodologie: DMAIC e Lean Six Sigma. La prima anche detta "Six Sigma tradizionale" viene adottata quando si vuole ridurre la variazione di processi ed eliminare i difetti. Il Lean Six Sigma si applica nei casi in cui l'obiettivo consiste nell'ottenere processi snelli e senza sprechi.

DMAIC é l'acronimo dei 5 passi da seguire (fig.1.4):

- Definire (*Define*) il problema, il background, gli obiettivi, i risultati attesi e il progetto di massima (*project chart*).
- Misurare (*Measure*) gli aspetti chiave del processo attuale e raccogliere i dati e le informazioni significative, per poter stabilire quali sono i parametri/aree su cui attuare interventi migliorativi. Gli strumenti maggiormente utilizzati sono i *flowchart* e le carte di controllo;
- Analizzare (*Analyse*) i dati per verificare le relazioni causa-effetto. Dai dati acquisiti é possibile individuare le problematiche, gli effetti, e risalire alle cause o allo stesso tempo é possibile determinare inizialmente le cause e stabilirne le relative conseguenze. Utili risultano le tecniche di *Brainstorming*.
- Implementare (*Improve*) il processo attuale o ricercare nuove soluzioni sulla base dei dati analizzati utilizzando tecniche come il poka yoke.
- Controllare (*Control*) il processo futuro per evitare eventuali derive e difetti o per assicurarsi che qualunque scostamento dall'obiettivo sia corretto e non comporti difetti. Si attuano piani di controllo e si implementano metodologie SPC (*Statistical Process Control*).

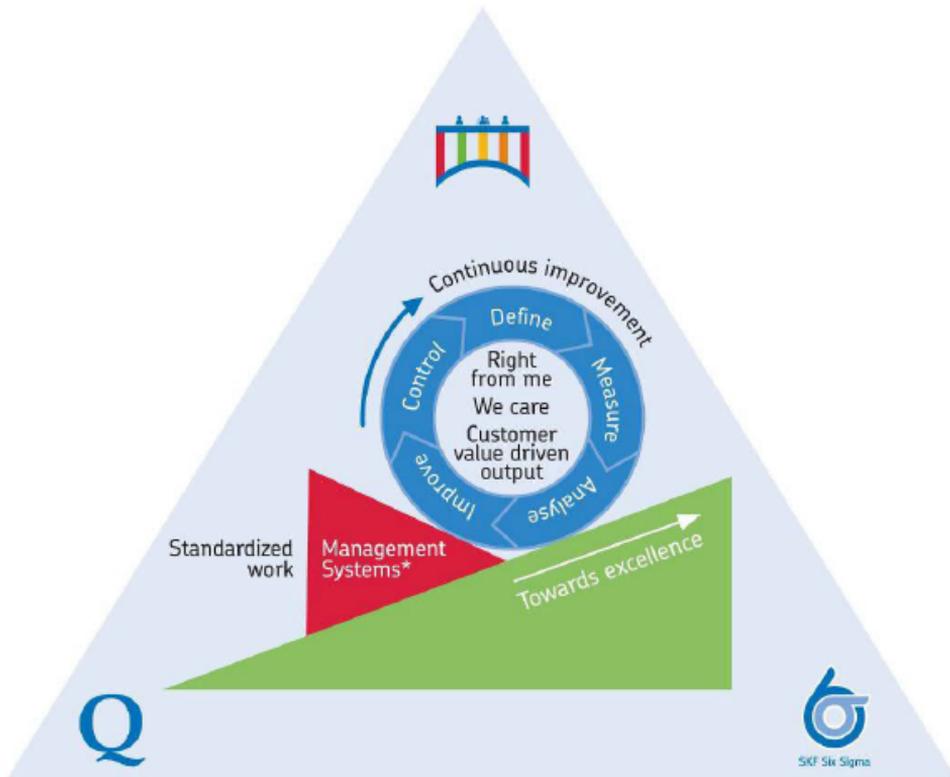


Figura 1.4. DMAIC, da www.irpublications.com/skf/annualreport/2012

Parte II

**L'Analisi dei Sistemi di
Misura (MSA)**

Capitolo 2

Cos'è l'MSA

La ISO/TS 16949, propone tra gli strumenti della qualità la Measurement Systems Analysis, un insieme di metodi per valutare la variabilità all'interno dei processi di misurazione.

Per l'esecuzione dell'MSA, il laboratorio SKF *Global Testing Italy* di Airasca, fa riferimento alle indicazioni del manuale MSA di AIAG *Automotive Industry Action Group*, in cui sono descritte le procedure e gli indici necessari per valutare la qualità di un processo di misura. Le metodologie AIAG sono integrate nel sistema qualità SKF e formalizzate nel manuale interno QT5 e QT1.

2.1 Principi base

Un sistema di misurazione non è costituito unicamente dallo strumento di misura, ma comprende l'operatore, i metodi operativi, l'eventuale software di rilevazione/elaborazione dati e l'ambiente. Il sistema di misura è l'intero processo di misura.

Ad ogni sistema di misura sono legati un errore ed un'incertezza ed è di fondamentale importanza conoscere il loro valore al fine di garantire misure affidabili.

L'MSA ha lo scopo di valutare quanto gli errori degli strumenti di controllo influenzano sulla varianza totale di processo/prodotto.

Quest'ultima si compone di (fig.2.1).:

- variabilità tra le parti, legata alla produzione e quindi alla realtà manifatturiera;
- variabilità di misurazione, legata all'affidabilità del sistema di misurazione impiegato.

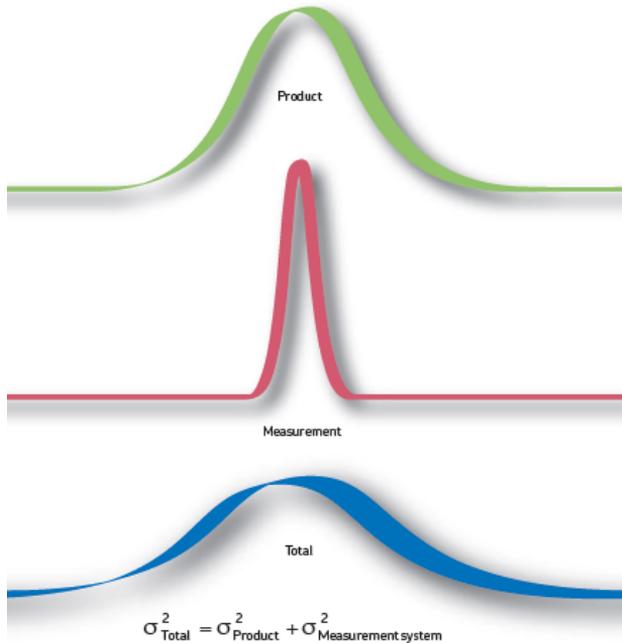


Figura 2.1. Varianza di processo, da SKF Quality Techniques, QT 5

L'Analisi dei sistemi di misurazione MSA é "un insieme di metodi di valutazione con lo scopo di determinare se la variabilità dei risultati ottenuti con un sistema di misurazione (strumento di misura, metodo di misurazione, addetti alla misurazione, ecc.) é accettabile in relazione al campo di tolleranza prescritto per la caratteristica di prodotto/parametro di processo oggetto di misurazione¹ ."

Obiettivo dell' MSA é quello di isolare e quantificare la variabilità di misurazione e stabilire se il sistema di misura é accettabile , migliorabile, o deve essere scartato.

L'errore e l'incertezza di misura rendono il sistema di misurazione poco affidabile, poco stabile e poco ripetibile e riproducibile. Inoltre, quando l'errore e l'incertezza associati a una misura sono elevati, c'è la possibilità che vengano considerati difettosi pezzi che in realtà rispettano le tolleranze. Il fine é quello di diminuire l'errore

¹ AIAG, *Measurement Systems Analysis-Reference Manual*, June 2010

all'interno del sistema di misura, ci  si traduce nella minimizzazione del rischio α di primo tipo, ossia nell'evitare di scartare parti che, in realt , sono buone.

Differenti fattori possono contribuire alla variabilit  nelle misurazioni:

- fattori strumentali: funzionamento imperfetto dello strumento a causa di malfunzionamento, taratura errata, etc;
- fattori umani: errori di lettura degli apparecchi (errore di parallasse), errore nell'utilizzo dello strumento e nel montaggio del pezzo, procedure scorrette di elaborazione dei dati, approssimazioni errate sui dati misurati, imprudenza e mancata attenzione del personale;
- fattori ambientali: temperatura, umidit , vibrazioni, interferenze elettromagnetiche, presenza di polveri.

Un sistema di misura pu  essere definito affidabile se possiede ²:

- Accuratezza: L'entit  di cui si discosta dal valore vero il valore medio di pi  misurazioni dello stesso operatore sullo stesso misurando;
- Precisione: Variazioni nel riprodurre lo stesso risultato misurando lo stesso campione pi  di una volta;
- Stabilit : Variazione nel tempo della misura di uno stesso campione.

2.2 Capacit  di processo

La capacit  di un processo pu  essere analizzata attraverso due approcci differenti:

- Performance di *Long Term*: identifica cosa fa il processo. L'analisi viene fatta considerando tutti i dati;
- Performance di *Short Term*: da indicazioni su cosa il processo potrebbe fare fornendo quindi consigli per il miglioramento delle prestazioni. L'analisi viene fatta sul gruppo di dati con le migliori prestazioni e quindi con la variazione minima.

Per indicare la capacit  di un processo si utilizzano gli indicatori tecnici Cp e Cpk e Pp e Ppk.

Pp e Ppk rappresentano una *capability "overall"*, cio  considerano la variabilit  globale del processo.

²*Isvor Knowledge System, Fiat Group, 2003*

Cp e Cpk indicano una *capability* potenziale "*within*" cioè analizzano un processo in controllo statistico (in cui agiscono unicamente cause comuni di variabilità). La *capability* potenziale si ottiene dividendo le misure in sottogruppi ed ipotizzando che le medie dei sottogruppi tendono a coincidere con la media del processo. Si riportano in fig. 2.2 i passaggi da seguire secondo la normativa QT 1 per effettuare uno studio completo di *capability* (su Minitab :*Stat>Quality Tools> Capability Analysis>Normal*).

Overview of capability studies		Initial capability study	Follow-up capability study
# Samples ¹⁾	Low volume	50 pieces ²⁾	100 pieces
	High volume	100 pieces	250 pieces
Time period		2 shifts	10-20 shifts
Subgroup size		5 pieces ³⁾	5 pieces
Control chart		Yes	Yes
Histogram		Yes	Yes
Probability plot		Yes	Yes
Index		P_p, P_{pk} and C_p, C_{pk}	P_p, P_{pk} and C_p, C_{pk}
Minimum requirement		$P_p \geq 1,33$ and $P_{pk} \geq 1,33$	
Control limits calculated		After data collection	Before data collection

¹⁾ The number of subgroups (minimal 25) is more important than the total number of pieces in order to maximise the chance of finding special causes.
²⁾ A smaller number of data points is sometimes unavoidable but they may not clearly show the statistical distribution of the characteristic under study.
 Small batch production requires special techniques which are not covered in this procedure as regards sampling and statistical evaluation. Consult a Master Black Belt.
³⁾ See page 28.

Figura 2.2. Capability studies

Lo studio di *capability* va condotto anche quando si esegue un'MSA, poiché consente di distinguere la variazione legata alla produzione da quella legata al sistema di misura. Consiste nell'effettuare più misure su uno stesso pezzo mantenendo lo stesso orientamento e nel confrontare il valore di variabilità dello strumento ($6\sigma_{\text{strumento}}$) con il 20% della variazione del processo ($6\sigma_{\text{processo}}$) o della tolleranza (fig. 2.3).

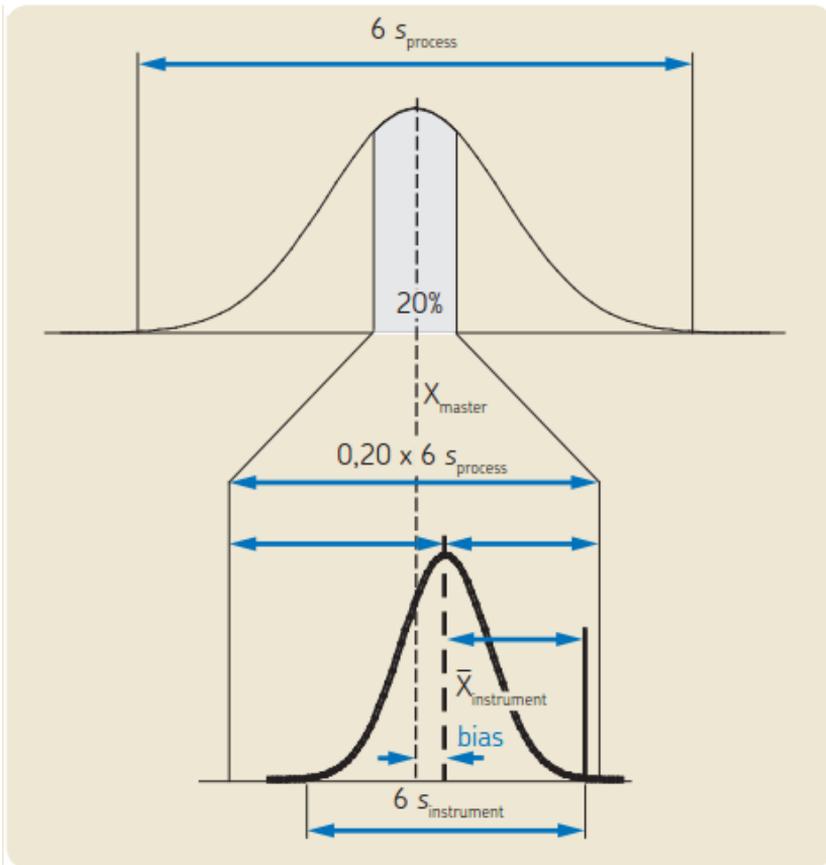


Figura 2.3. Capacità di processo, da SKF Quality Techniques, QT 5

Le direttive vengono fornite dalla normativa QT5-SKF :

1. Il campione deve essere *standard* e deve essere noto il suo valore di riferimento

- (x_{master}) ;
2. In ogni misura la parte deve essere smontata e montata nuovamente;
 3. L'orientamento della parte non deve variare in tutto lo studio;
 4. Occorre eseguire 50 misure utilizzando lo *stesso* campione (mai meno di 25 misure);
 5. Devono essere calcolate la media ($\bar{x}_{strumento}$) e la deviazione standard dello strumento ($\sigma_{strumento}$).
Queste grandezza statistiche possono essere ricavate su Minitab seguendo il percorso: *Stat>Quality Tools> Capability Analysis>Normal*;
 6. Devono essere calcolati i coefficienti Cg e Cgk attraverso le equazioni:

$$C_g = \frac{0.2 * \sigma_{processo}}{6\sigma_{strumento}} \quad (2.1)$$

$$C_{gk} = \frac{0.1 * 6\sigma_{processo} - |\bar{x}_{strumento} - x_{master}|}{3\sigma_{strumento}} \quad (2.2)$$

Se non si ha a disposizione la variabilità del processo, allora si utilizza il campo di tolleranza della caratteristica (Limite di Tolleranza Superiore - Limite di Tolleranza Inferiore).

$$C_g = \frac{0.2 * tolleranza}{6\sigma_{strumento}} \quad (2.3)$$

$$C_{gk} = \frac{0.1 * tolleranza - |\bar{x}_{strumento} - x_{master}|}{3\sigma_{strumento}} \quad (2.4)$$

7. Verificare che Cg e Cgk siano superiori a 1.33.

2.3 Bias

Tale studio ha l'obiettivo, a partire dai medesimi dati utilizzati per determinare la *Capability*, di determinare lo scostamento medio (bias) tra i valori misurati e il valore del *master* di misura.

Bias e *capability* attestano l'accuratezza del sistema di misura, ossia il grado di concordanza tra il risultato di una misurazione e un valore vero del misurando.

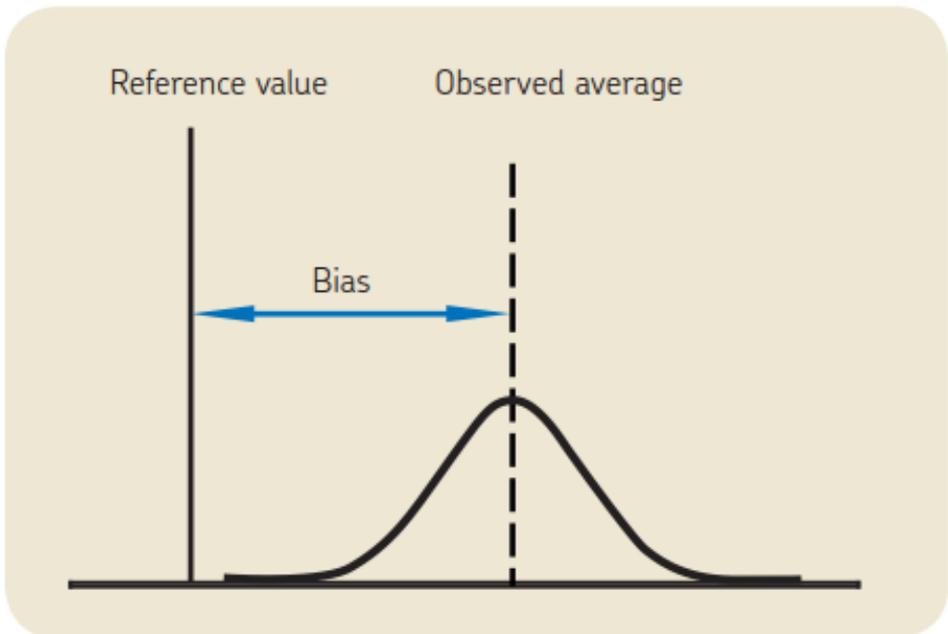


Figura 2.4. Bias, da SKF Quality Techniques, QT 5

2.4 Linearità

Lo studio di linearità permette di analizzare la stabilità di un sistema di misura. Consiste nel confrontare la pendenza della retta che meglio approssima i bias con la pendenza della retta orizzontale a bias zero (coefficiente angolare nullo) (5.5).

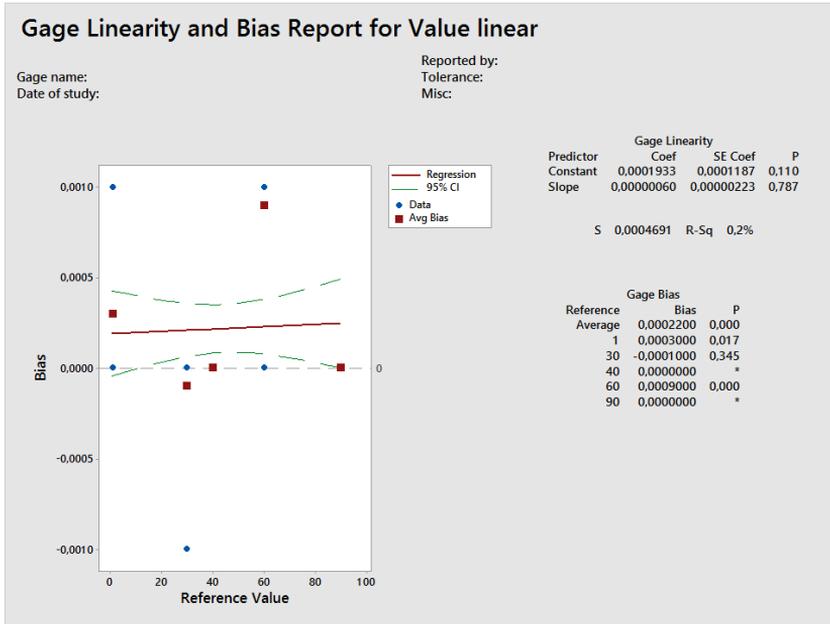


Figura 2.5. Linearità

Di seguito sono elencati i passaggi da seguire al fine di performare uno studio di linearità ³:

- Scegliere 5 pezzi;
- Misurare ogni pezzo in sala metrologica al fine di confermare il valore di riferimento;
- Misurare ogni pezzo 10 volte. Le misure devono essere effettuate da un unico operatore in modo casuale;

³SKF Quality Techniques, QT5

- Calcolare il bias di ogni misura (differenza tra la misura e quella di riferimento) e il bias delle medie (differenza tra la media delle misure su un pezzo e il valore di riferimento);
- Rappresentare graficamente il bias delle misure, il bias delle medie e la retta che meglio approssima il bias delle medie (su Minitab: *Stat>Quality Tools>Gage Study>Gage Linearity and Bias Study*);
- Assicurarsi che il coefficiente angolare della retta sia prossimo a zero.

2.5 Gage R&R

È lo studio che stabilisce l'idoneità di un sistema di misura. Permette, attraverso calcoli statistici, di calcolare il σ di misurazione, scomponendolo nelle componenti legate alla produzione e quelle legate alla ripetibilità e riproducibilità. Il gage R&R fornisce come risultato finale il valore %R&R, un coefficiente che tiene conto della ripetibilità e riproducibilità del sistema e che permette di stabilire, attraverso criteri di accettabilità, se il sistema di misura risulta idoneo ed affidabile (fig.2.6).

A general guideline¹⁾ for acceptance of equipment repeatability and Reproducibility (%R&R) of measurement systems whose purpose is to analyse a process is as follows:

%r&R ≤ 10%	measurement system is generally considered to be acceptable
10% < %r&R ≤ 30%	may be acceptable for some applications
%r&R > 30%	measurement system is considered to be unacceptable

¹⁾ AIAG, *Measurement Systems Analysis - Reference Manual* (June 2010, 4th Edition, p. 78).

Action on measurement system

%r&R ≤ 10%	Use equipment. Recommended, especially useful when trying to sort or classify parts or when tightened process control is required.
10% < %r&R ≤ 30%	Use equipment – Decrease sorting limits for critical parameters and improve equipment. Decision should be based upon, for example, importance of application measurement, cost of measurement device, and/or cost of rework or repair. Should be approved by the customer.
%r&R > 30%	Improve equipment – Process control: Measurements mask process variation, no realistic C_p/C_{pk} . – Inspection: Decrease sorting limits by 3 times $s_{r\&r}$ on each side. Every effort should be made to improve the measurement system. This condition may be addressed by the use of an appropriate measurement strategy; for example, using the average of several readings of the same part characteristic in order to reduce final measurement variation.

Figura 2.6. Linee guida per accettare un sistema di misura, da QT5-SKF

La ripetibilità é un indice della variabilità tra i pezzi misurati dallo stesso operatore nelle medesime condizioni (fig.2.7). Da un punto di vista dell'analisi statistica della varianza, la ripetibilità rappresenta la componente *within* in presenza di fissate condizioni di misurazione.

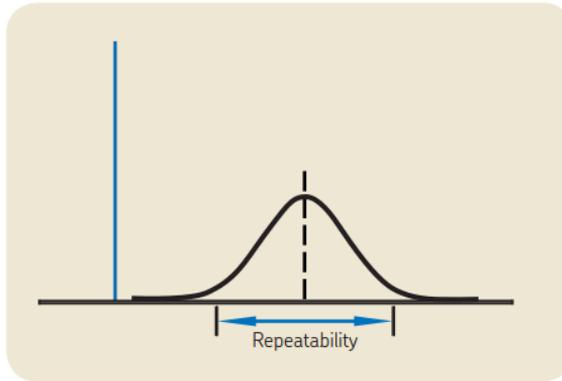


Figura 2.7. Ripetibilità, da SKF Quality Techniques, QT 5

La riproducibilità é la variazione nella media delle misurazioni causata dal cambiamento di una condizione nel processo di misurazione (fig.2.8). La riproducibilità di solito viene calcolata per rilevare differenze significative tra i valori misurati da operatori differenti. In generale rappresenta la componente *between* di variabilità di un sistema di misurazione, vale a dire tra condizioni di misurazione differenti.

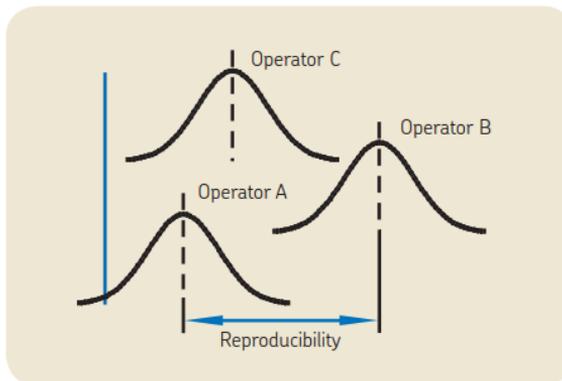


Figura 2.8. Riproducibilità, da SKF Quality Techniques, QT 5

Lo studio del Gage R%R deve essere eseguito seguendo la procedura imposta dalla normativa SKF ⁴:

- Scegliere 10 pezzi uguali, provenienti dallo stesso lotto di produzione;
- Numerare le parti;
- Scegliere 3 operatori;
- Eseguire le misure in modo random attraverso la creazione di un foglio di lavoro su Minitab ⁵: *select Stat>Quality tools> Gage R&R >Create Gage R%R Study Worksheet*, scegliere la modalità *Randomize runs within operators*.
- Effettuare le 90 misure nell'ordine descritto nel foglio di lavoro;
- Eseguire il Gage R%R study crossed su Minitab scegliendo il metodo ANOVA (analysis of variance): *Select> Quality Tools> Gage Study> Gage R&R study crossed* ⁶.
- Analizzare i risultati confrontandoli con i criteri di accettazione:

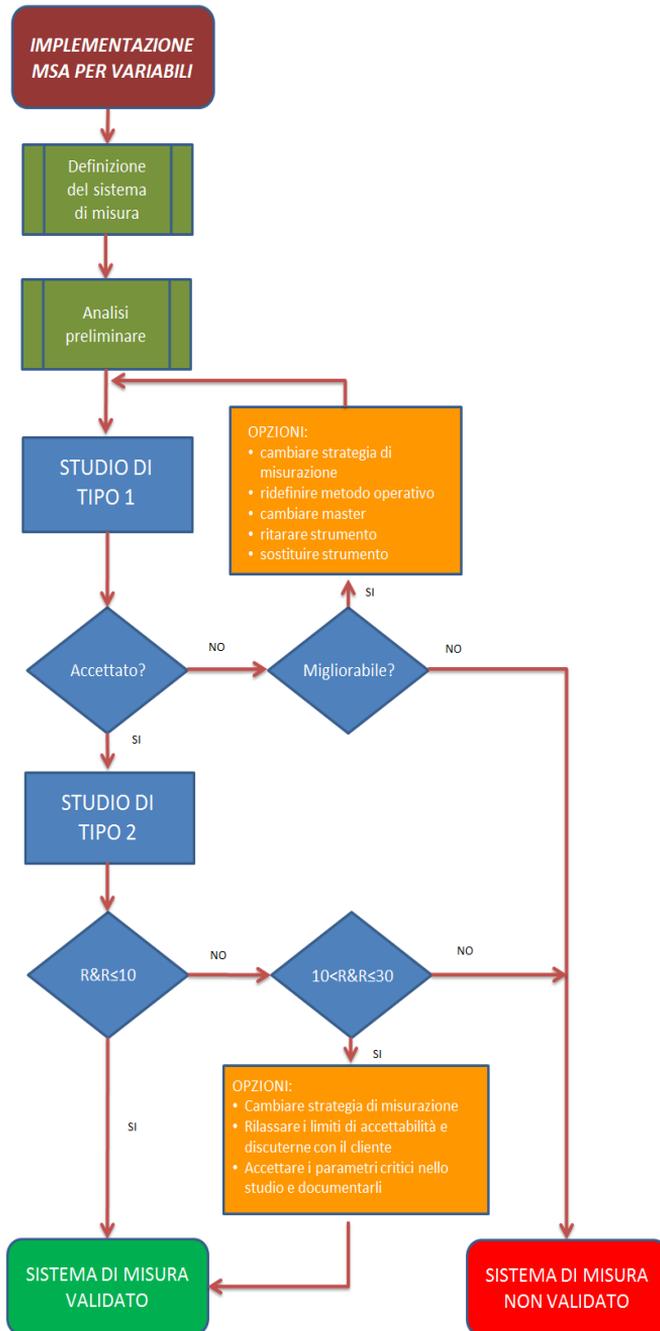
%R&R < 10%	accettabile
10% < % R&R < 30%	accettabile se giustificato
% R&R > 30%	non accettabile
ndc	deve essere superiore a 5

Tabella 2.1. Criteri di accettazione per MSA

⁴SKF Quality Techniques, QT5

⁵Minitab's menu per eseguire il comando

⁶Minitab's menu per eseguire il comando



23
Figura 2.9. Criteri di accettazione

Capitolo 3

MSA: Friction torque high speed

3.1 Preparazione dello studio

Lo studio MSA è stato eseguito in accordo con la procedura SKF QT 5, tenendo conto che la prova è di tipo *non*-distruttivo. Per l'esecuzione dell'analisi sono state seguite le linee guida :

1. Predisposizione di 10 pezzi (cuscinetti BAR-0183 E) rappresentativi dell'intero processo;
2. Numerazione dei pezzi;
3. Scelta di 3 operatori;
4. Montaggio dei cuscinetti sulla macchina friction torque high speed per rilevare la coppia d'attrito.
5. Creazione del *Gage R&R Worksheet* su Minitab in modo che l'ordine delle misure eseguite dagli operatori sia casuale;
6. Avvio della macchina a 20 rpm per la durata di 5 minuti, acquisizione delle misure negli ultimi 20 secondi e calcolo della media;
7. Lettura delle misure dal software;
8. Esecuzione del *Gage R&R study Crossed su Minitab*;
9. Ottenimento dei risultati statistici: ripetibilità, riproducibilità, %R&R, ndc;
10. Analisi dei risultati e confronto con i criteri di accettazione.

3.2 Procedura di montaggio ed ottenimento delle misure

Per l'esecuzione di ogni singola misura, il cuscinetto in esame, BAR-0183 E, è stato montato sulla macchina che rileva la coppia d'attrito.

Il pezzo è stato fissato su una flangia fissa a sua volta bloccata sulla macchina (fig.3.1 e fig.4.1).

Sono stati impostati i parametri sul software ed è stata avviata la prova.



Figura 3.1. Posizionamento del cuscinetto e centraggio della flangia

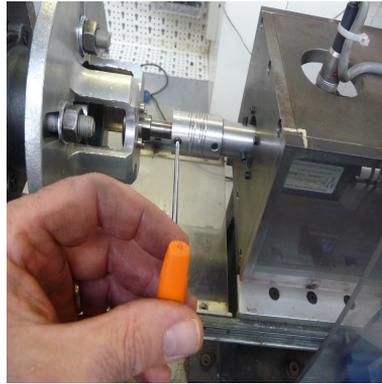


Figura 3.2. Allineamento con il giunto e chiusura dei grani

Di seguito sono riportate le 90 misure ottenute (tab.3.1).

RunOrder	Pezzo	Operatore	FT [Nm]
1	4	Operatore 1	0,386
2	8	Operatore 2	0,314
3	3	Operatore 2	0,361
4	1	Operatore 3	0,289
5	3	Operatore 3	0,365
6	9	Operatore 2	0,252
7	7	Operatore 2	0,324
8	1	Operatore 2	0,288
9	8	Operatore 2	0,311
10	2	Operatore 1	0,285
11	4	Operatore 3	0,388
12	8	Operatore 3	0,307

RunOrder	Pezzo	Operatore	FT [Nm]
13	10	Operatore 2	0,346
14	7	Operatore 3	0,325
15	10	Operatore 1	0,35
16	5	Operatore 3	0,444
17	8	Operatore 1	0,311
18	3	Operatore 1	0,36
19	4	Operatore 3	0,39
20	7	Operatore 2	0,317
21	4	Operatore 1	0,389
22	10	Operatore 1	0,344
23	2	Operatore 3	0,284
24	9	Operatore 2	0,253
25	2	Operatore 2	0,284
26	2	Operatore 3	0,278
27	7	Operatore 2	0,314
28	1	Operatore 2	0,285
29	9	Operatore 3	0,24
30	8	Operatore 2	0,313
31	4	Operatore 1	0,388
32	5	Operatore 1	0,44
33	9	Operatore 2	0,248
34	2	Operatore 1	0,288
35	5	Operatore 2	0,434
36	4	Operatore 2	0,383
37	1	Operatore 2	0,286
38	10	Operatore 3	0,337
39	9	Operatore 1	0,246
40	3	Operatore 3	0,351
41	1	Operatore 1	0,288
42	10	Operatore 3	0,337
43	4	Operatore 3	0,386
44	1	Operatore 3	0,284
45	6	Operatore 2	0,309
46	3	Operatore 1	0,355
47	2	Operatore 2	0,286
48	9	Operatore 1	0,251
49	1	Operatore 1	0,284
50	5	Operatore 1	0,433
51	5	Operatore 2	0,435

RunOrder	Pezzo	Operatore	FT [Nm]
52	8	Operatore 1	0,304
53	10	Operatore 3	0,336
54	3	Operatore 1	0,358
55	2	Operatore 1	0,286
56	6	Operatore 1	0,317
57	9	Operatore 3	0,241
58	7	Operatore 1	0,315
59	3	Operatore 2	0,353
60	5	Operatore 2	0,432
61	2	Operatore 2	0,28
62	6	Operatore 3	0,313
63	6	Operatore 3	0,318
64	1	Operatore 3	0,285
65	6	Operatore 3	0,321
66	7	Operatore 3	0,316
67	10	Operatore 2	0,337
68	4	Operatore 2	0,386
69	3	Operatore 3	0,354
70	7	Operatore 1	0,317
71	9	Operatore 1	0,242
72	8	Operatore 1	0,306
73	7	Operatore 3	0,315
74	6	Operatore 1	0,324
75	10	Operatore 2	0,341
76	6	Operatore 1	0,32
77	3	Operatore 2	0,357
78	4	Operatore 2	0,388
79	6	Operatore 2	0,32
80	2	Operatore 3	0,286
81	5	Operatore 3	0,431
82	8	Operatore 3	0,303
83	1	Operatore 1	0,281
84	5	Operatore 1	0,432
85	6	Operatore 2	0,316
86	9	Operatore 3	0,245
87	5	Operatore 3	0,43
88	10	Operatore 1	0,335
89	7	Operatore 1	0,315
90	8	Operatore 3	0,304

Tabella 3.1. Misure

3.3 Gage R&R study

In accordo con la normativa é stata eseguita l'analisi delle misure sul software statistico Minitab utilizzando il tipo di studio *Gage R&R Study Crossed* (su Minitab: *Stat>Quality Tools>Gage Study> Gage R&R Study Crossed*) poiché si tratta di una misura non distruttiva.

Si riportano i risultati ottenuti:

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for FT HS [Nm]

Gage name: MSA Friction Torque High Speed MAC10-FT

Date of study: 11/10/2017

Process tolerance = 2,7

Number of Distinct Categories = 18

Source	VarComp	Contribution (of VarComp)
Total Gage r&R	0,0000168	0,56
Repeatability	0,0000164	0,55
Reproducibility	0,0000003	0,01
Operators	0,0000003	0,01
Part-To-Part	0,0029804	99,44
Total Variation	0,0029972	100,00

Source	StdDev (SD)	%Study Var (6 SD)	%Study Var (%SV)	Tolerance (SV/Toler)
Total Gage r&R	0,0040945	0,024567	7,48	0,91
Repeatability	0,0040545	0,024327	7,41	0,90
Reproducibility	0,0005707	0,003424	1,04	0,13
Operators	0,0005707	0,003424	1,04	0,13
Part-To-Part	0,0545934	0,327560	99,72	12,13
Total Variation	0,0547467	0,328480	100,00	12,17

Tabella 3.2. Gage R%R Study

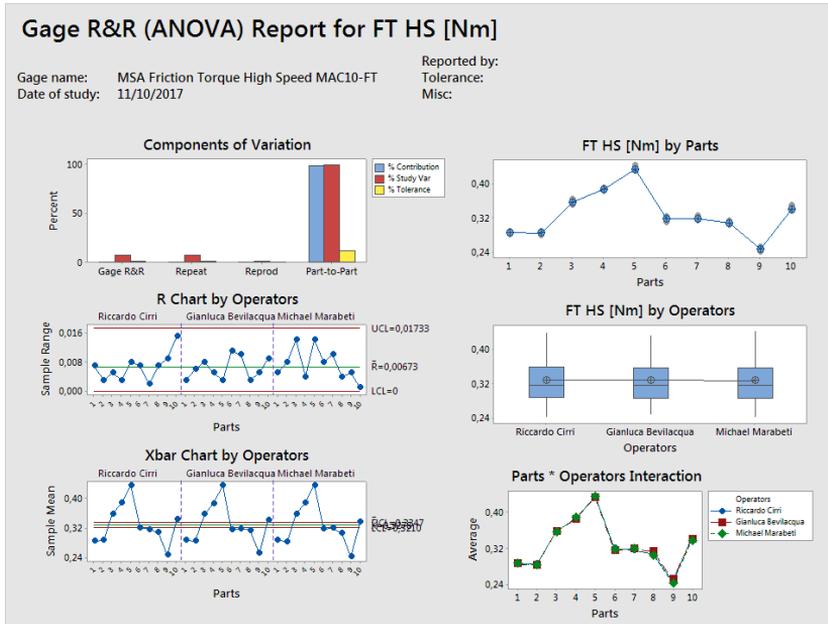


Figura 3.3. Gage R&R Report

Analisi dei grafici:

Component of variation: La variazione del processo (ultime tre barre) è molto maggiore della variazione del Sistema di Misura.

FT HS [Nm]by parts: Rappresenta le misure per ogni particolare eseguite da ogni operatore e le medie delle misure.

Si osserva come la variabilità tra le misure eseguite da diversi operatori sullo stesso pezzo sia molto minore della variabilità tra le misure dei diversi particolari.

FT HS [Nm] by Operators: Differenza tra le medie delle misure (su dieci pezzi) di ogni operatore.

Si osserva una buona riproducibilità.

*Parts*Operators Interaction:* Se le linee che rappresentano i tre operatori sono, come in questo caso, all'incirca parallele e non si intersecano, non c'è significativa interazione tra operatore e pezzi (buona riproducibilità).

R Chart by Operators: Range tra le misure eseguite dai singoli operatori sui singoli particolari.

Si può notare una buona ripetibilità perché il valore medio è molto basso.

Xbar Chart by operators: Medie tra le misure fatte dai singoli operatori sui singoli pezzi. Le linee orizzontali rappresentano le linee di controllo calcolate dal

grafico R Chart by Operators. L'area tra le linee è una stima delle variazioni legate al sistema di misura.

Si osserva ancora una volta come la variabilità del processo sia superiore a quella del sistema di misura. Inoltre il sistema gode di una buona riproducibilità perchè l'andamento delle medie dei singoli operatori è uguale.

3.4 Analisi dei risultati e conclusioni

Guida per l'accettazione dei risultati in accordo alla procedura SKF QT 5:

- Il valore di %R&R (%SV of total gage R&R) deve essere valutato tenendo conto della seguente tabella:

<p>%R&R < 10% 10% < % R&R < 30% % R&R > 30%</p>	<p>accettabile accettabile se giustificato non accettabile</p>
---	--

- SV/Toler of total gage R&R deve seguire gli stessi criteri di %R&R;
- Il valore di ndc, che indica il numero di categorie in cui il processo può essere diviso, deve essere maggiore o uguale a 5.

Il sistema di misura risulta accettabile poichè il valore di %R&R è di 7,48, quindi inferiore al 10%, SV/Toler è pari a 0,91 < 10% e ndc è pari a 18 > 5. Dai risultati del Gage R&R study si nota come il sistema abbia buona ripetibilità e buona riproducibilità. Tuttavia si osserva che la variazione legata alla riproducibilità (%SV) è inferiore a quello legata alla ripetibilità. Questo potrebbe essere legato al fatto che la procedura di montaggio è prestabilita e dunque l'errore legato al cambio di operatore è minimizzato.

Capitolo 4

MSA: Friction torque con cordino

4.1 Preparazione dello studio

Lo studio MSA è, eseguito in accordo alla procedura SKF QT 5, tiene conto che la prova è di tipo *non*-distruttivo. Per l'esecuzione dell'analisi sono state seguite le seguenti linee guida:

1. Predisposizione di 10 pezzi (cuscinetti BAR-0183 E) rappresentativi dell'intero processo;
2. Numerazione dei pezzi;
3. Scelta di 3 operatori;
4. Creazione del *Gage R&R Worksheet* su Minitab in modo che l'ordine delle misure eseguite dagli operatori sia casuale;
5. Rodaggio effettuato sul banco friction torque ad alta velocità per 4 ore a 200 rpm;
6. Montaggio dei cuscinetti sulla macchina per rilevare la coppia d'attrito.
7. Avvio della macchina a 20 rpm per la durata di 5 minuti, acquisizione delle misure negli ultimi 20 secondi e calcolo della media;
8. Lettura delle misure dal software;
9. Esecuzione del *Gage R&R study Crossed su Minitab*;

10. Ottenimento dei risultati statistici: ripetibilità, riproducibilità, %R&R, ndc;
11. Analisi dei risultati e confronto con i criteri di accettazione.

4.2 Procedura di montaggio ed ottenimento delle misure

Per l'esecuzione di ogni singola misura, il cuscinetto in esame, BAR-0183E, è stato montato sulla macchina che rileva la coppia d'attrito (fig.4.1). Si elencano i passaggi da seguire per il corretto montaggio:

- Serraggio del cuscinetto sul mandrino;
- Fissaggio del cordino sull'OR ;
- Posizionamento della termocoppia sull'OR;
- Impostazione dei parametri sulla macchina: diametro ϕ 76mm su cui è montato il cordino, velocità di rotazione di 20 rpm, durata della prova di 5 min, tempo di acquisizione delle misure di 20s;
- Avvio della prova e ottenimento risultati sul software.



Figura 4.1. Montaggio del cuscinetto sulla macchina

4.3 Gage R&R study

In accordo con la normativa é stata eseguita l'analisi delle misure sul software statistico Minitab utilizzando il tipo di studio *Gage R&R Study Crossed* (su Minitab: *Stat>Quality Tools>Gage Study> Gage R&R Study Crossed*) poiché si tratta di una misura non distruttiva. Si riportano i risultati ottenuti:

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for Friction torque with rape [Nm]

Gage name: MSA Friction torque with rape

Date of study: 15/10/2017

Process tolerance = 2,7

Number of Distinct Categories = 8

Source	VarComp	Contribution (of VarComp)
Total Gage r&R	0,0000616	2,47
Repeatability	0,0000596	2,39
Reproducibility	0,0000021	0,08
Operators	0,0000021	0,08
Part-To-Part	0,0024338	97,53
Total Variation	0,0024955	100,00

Source	StdDev (SD)	%Study Var (6 SD)	%Study Var (%SV)	Tolerance (SV/Toler)
Total Gage r&R	0,0078501	0,047101	15,71	1,74
Repeatability	0,0077183	0,046310	15,45	1,72
Reproducibility	0,0014322	0,008593	2,87	0,32
Operators	0,0014322	0,008593	2,87	0,32
Part-To-Part	0,04933339	0,296003	98,76	10,96
Total Variation	0,0499546	0,299727	100,00	11,10

Tabella 4.1. Gage R%R Study

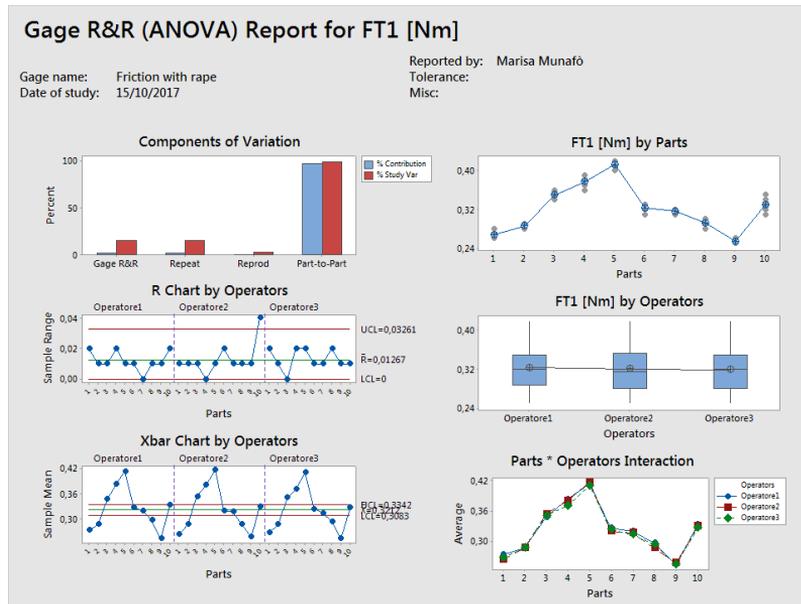


Figura 4.2. Gage R&R Report

Analisi dei grafici:

Component of variation: La variazione del processo (ultime due) é preponderante rispetto alla variazione del sistema di misura. Rappresenta graficamente le colonne %Contribution (of VarComp), %Study Var relative al Gage R&R Study - ANOVA Method.

FT1 [Nm]by parts: Rappresenta le medie delle misure per ogni particolare eseguite da ogni operatore e le medie per ogni particolare tra tutti gli operatori. Si osserva come la variabilità tra le misure eseguite da diversi operatori sullo stesso pezzo non sia così ridotta (soprattutto per i pezzi 4 e 10), ma sia comunque minore della variabilità tra i diversi particolari.

FT1 [Nm] by Operators: Differenza tra le medie delle misure (su dieci pezzi) di ogni operatore.

*Parts*Operators Interaction:* Se le linee che rappresentano i tre operatori sono, come in questo caso, all'incirca parallele e non si intersecano, non c'è significativa interazione tra operatore e pezzi (buona riproducibilità).

R Chart by Operators: Range tra le misure eseguite dai singoli operatori sui singoli particolari.

Si osserva un valore fuori controllo relativo al range delle misure eseguite dall'operatore operatore3 sul pezzo 10. Tuttavia il valore medio dei range é abbastanza ridotto, quindi la ripetibilit  é accettabile.

Xbar Chart by operators: Medie tra le misure fatte dai singoli operatori sui singoli pezzi. Le linee orizzontali rappresentano le linee di controllo calcolate dal grafico R Chart by Operators. L'area tra le linee é una stima delle variazioni legate al sistema di misura.

Si osserva ancora una volta come la variabilit  del processo sia superiore a quella del sistema di misura. Inoltre il sistema gode di una buona riproducibilit  perch  l'andamento delle medie dei singoli operatori é uguale.

4.4 Analisi dei risultati e conclusioni

Guida per l'accettazione dei risultati in accordo alla procedura SKF QT 5:

- Il valore di %R&R (%SV of total gage R&R) deve essere valutato tenendo conto della seguente tabella:

%R&R < 10% 10% < % R&R < 30% % R&R > 30%	accettabile accettabile se giustificato non accettabile
--	---

- SV/Toler of total gage R&R deve seguire gli stessi criteri di %R&R;
- Il valore di ndc, che indica il numero di categorie in cui il processo pu  essere diviso, deve essere maggiore o uguale a 5.

In questo caso il numero di categorie soddisfa i criteri di accettazione poich  maggiore di 5, tuttavia il sistema di misura presenta un valore di %R&R compreso tra il 10% e il 30% che non pu  ritenersi accettabile a priori.

Ci sono diversi aspetti da considerare per analizzare le cause di un valore di %R&R superiore al 10%:

- Possibile influenza della temperatura sulle misure;
- Nel grafico R Chart by operators il range di variazione delle misure del pezzo 10 relativo all'operatore 2 é fuori dai limiti di controllo. Questo pu  significare che il suo metodo di misura é meno preciso di quello degli altri.
- Ripetibilit  non ottimale (%SV=15,45) legata al fatto che durante la procedura di montaggio dei cuscinetti non si é fatto uso di procedure prestabilite.

4.4.1 Analisi dell'influenza della temperatura sulle misure

Per l'analisi della dipendenza della coppia d'attrito dalla temperatura é stato analizzato lo scatter plot dei dati realizzato su Minitab. Quest'ultimo permette di avere visivamente e subito una buona conoscenza del tipo di relazione tra x e y e quindi, in questo caso, tra coppia d'attrito e temperatura.

Lo scatter plot é abbinato ad un'analisi di regressione ed un test di ipotesi.

L'utilizzo di una tecnica di regressione permette di ricercare potenziali relazioni tra X e Y ($y=mx+b$) e di dedurre che se x non influenza y , graficamente la retta di regressione é orizzontale.

L'utilizzo del test di ipotesi ha l'obiettivo di evidenziare l'eventuale significativitá del modello di regressione.

Il test di ipotesi prevede i seguenti passaggi:

1. Fare un'ipotesi di partenza (ipotesi nulla H_0) secondo cui tra diversi valori non c'è significativa differenza;
2. Valutare un' ipotesi (ipotesi alternativa H_a) che prevede una non uguaglianza/omogeneitá tra i valori;
3. Quantificare la differenza con l'indicatore statistico P-value e confrontarla con un valore discriminante definito a priori (rischio α) caso per caso, a seconda di specifiche esigenze.
4. Accettare o rifiutare l'ipotesi nulla. Si assume un valore di $\alpha=5\%$ come soglia critica per accettare H_0 o H_a .

Se $P\text{-value} > 0,05$ può essere accettata H_0 .

Se $P\text{-Value} < 0,05$ rifiuto di accettare l' ipotesi nulla.

Cioé Se il P-value tende a 1 l'ipotesi nulla circa la regressione é avvalorata e si può confermare che y non dipende da x .

Nello studio in esame, eseguendo una *Regression Analysis* su Minitab il *P-value* é risultato pari a **0,713**.

Si riporta in fig4.3 la retta di regressione ottenuta.

Si osserva come l'andamento quasi orizzontale della retta di regressione (coefficiente angolare quasi nullo) ed il valore del P-value molto alto, indichino una **indipendenza** delle misure dalla temperatura.

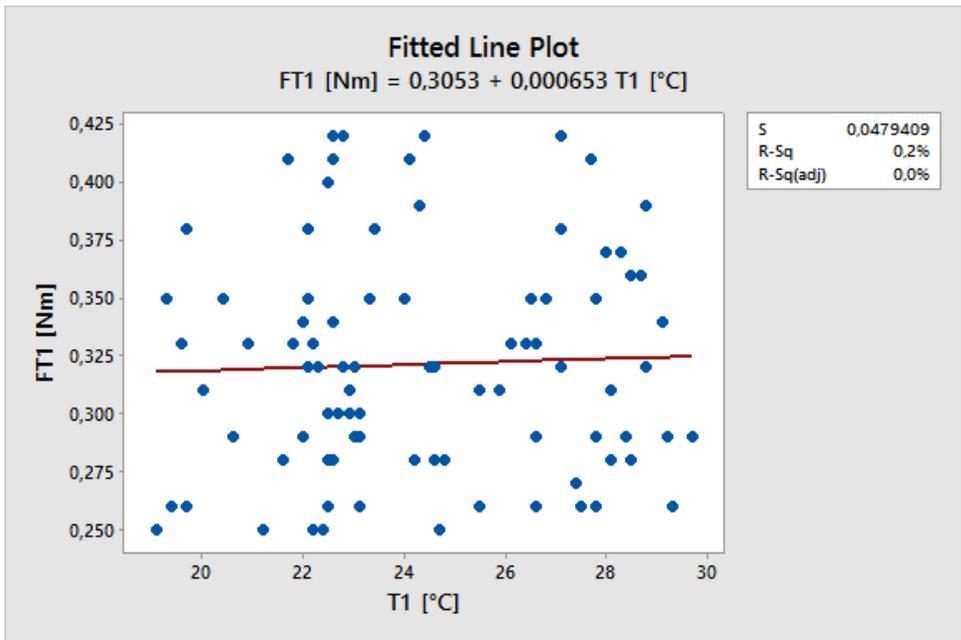


Figura 4.3. Scatter plot dei dati

Capitolo 5

MSA: Altimetro

5.1 Preparazione dello studio

Lo studio MSA è stato eseguito in accordo alla procedura SKF QT 5, tenendo conto che la prova è di tipo *non*-distruttivo. A causa dell'estrema delicatezza delle misure, è stata condotta un'analisi statistica più approfondita.

Il sistema di misura è stato sottoposto alle seguenti analisi: *Gage R%R*, *Capability*, *Bias*, *Linearity*.

Nella tabella 5.1 sono riportati tutti i parametri necessari per lo studio MSA.

<i>Gage Name</i>	Altimetro LH-600DG
Risoluzione	0,001mm
Nome pezzo	OR-BAH-0015
Tipo di misura	spessore OR
Max	33,000mm
Min	32,940mm
Mastterer Capability	40,000mm
Master 1 Linearity	1,000mm
Master 2 Linearity	30mm
Master 2 Linearity	40mm
Master 4 Linearity	60mm
Master 5 Linearity	90mm

Tabella 5.1. Specifiche per lo studio MSA

5.2 Gage R&R study

Per lo studio di ripetibilità e riproducibilità è stato condotto il *Gage R&R Study Crossed* (su Minitab: *Stat>Quality Tools>Gage Study> Gage R&R Study Crossed*) poiché la misura non è distruttiva.

Si riportano nella tabella 5.2 i risultati ottenuti.

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage name: MSA Altimetro LH-600DG

Date of study: 20/02/2018

Process tolerance = 0,06

Number of Distinct Categories = 12

Source	StdDev (SD)	%Study Var (6 SD)	%Study Var (%SV)	Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,0005522	0,0033133	11,38	5,52
Repeatability	0,0002108	0,0012649	4,34	2,11
Reproducibility	0,0005104	0,0030623	10,52	5,10
Op R&R	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00
Op *Part	0,0005104	0,0030623	10,52	5,10
Part-To-Part	0,0048212	0,0289275	99,35	48,21
Total Variation	0,0048528	0,0291166	100,00	48,53

Tabella 5.2. Gage R%R Study

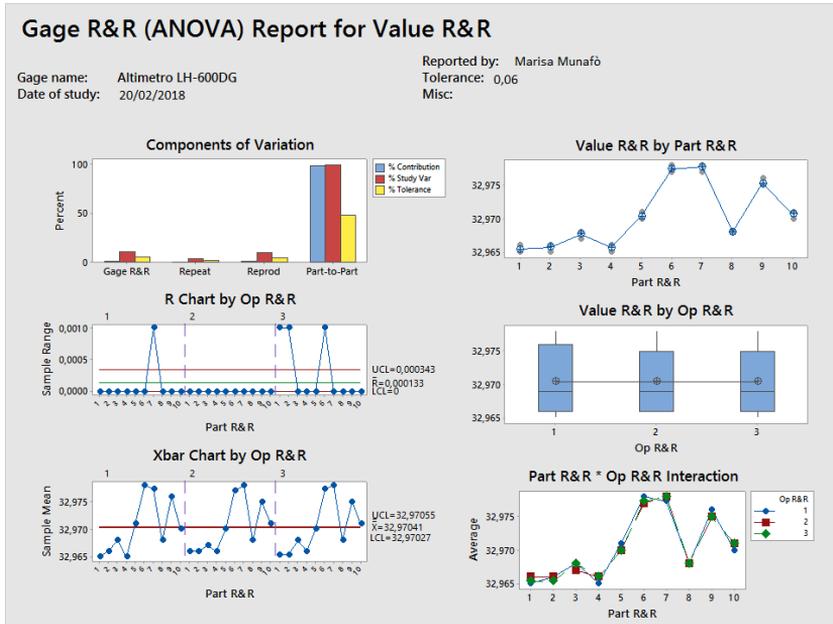


Figura 5.1. Gage R&R Report

Analisi dei grafici:

Component of variation: La variazione del processo (ultime tre barre) è preponderante rispetto alla variazione del sistema di misura.

Value R&R by part R&R: Rappresenta le medie delle misure per ogni particolare eseguite da ogni operatore e le medie delle medie. Si osserva come la variabilità tra le misure eseguite da diversi operatori sullo stesso pezzo sia molto minore della variabilità tra le misure dei diversi particolari.

Value R&R by Op R&R: Differenza tra le medie delle misure (su dieci pezzi) di ogni operatore. Si osserva come la differenza sia praticamente nulla: la retta è orizzontale.

*Part R&R*Op R&R Interaction:* Le linee che rappresentano i tre operatori seguono lo stesso andamento (buona riproducibilità), tuttavia non sono sempre parallele tra di loro (c'è interazione tra operatore e pezzo).

R Chart by Op R&R: Range tra le misure eseguite dai singoli operatori sui singoli particolari. Si può notare una buona ripetibilità perché il valore medio è molto basso. Tuttavia nel caso del terzo operatore si possono osservare tre valori fuori controllo.

Xbar Chart by Op R&R: Medie tra le misure fatte dai singoli operatori sui singoli pezzi. Le linee orizzontali rappresentano le linee di controllo calcolate dal

grafico R Chart by Op R&R. L'area tra le linee è una stima delle variazioni legate al sistema di misura. Si osserva ancora una volta come la variabilità del processo sia superiore a quella del sistema di misura. Inoltre il sistema gode di una buona riproducibilità perchè l'andamento delle medie dei singoli operatori è quasi identico.

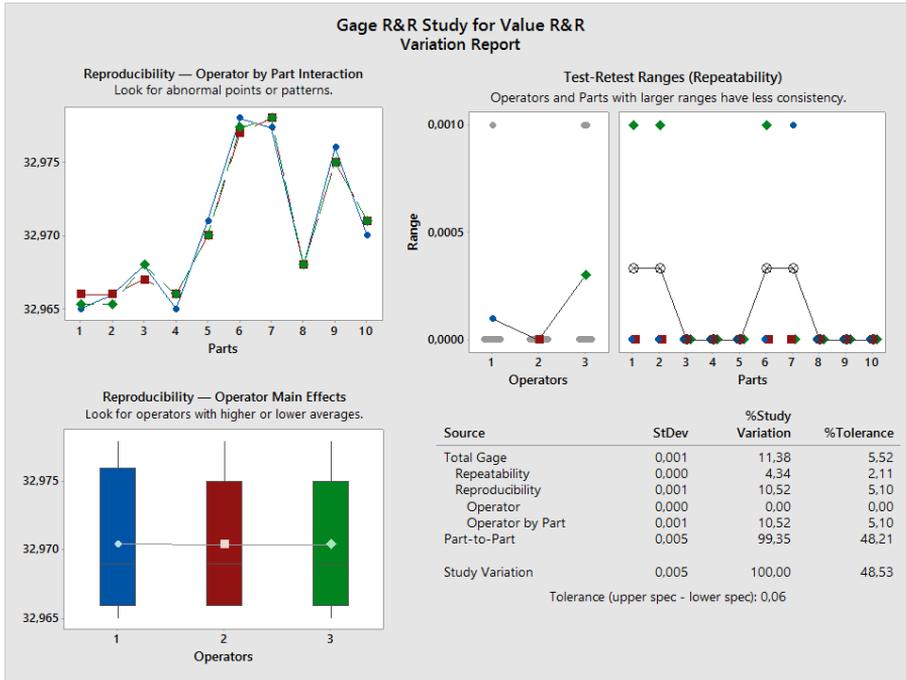


Figura 5.2. Gage R&R Variation Report

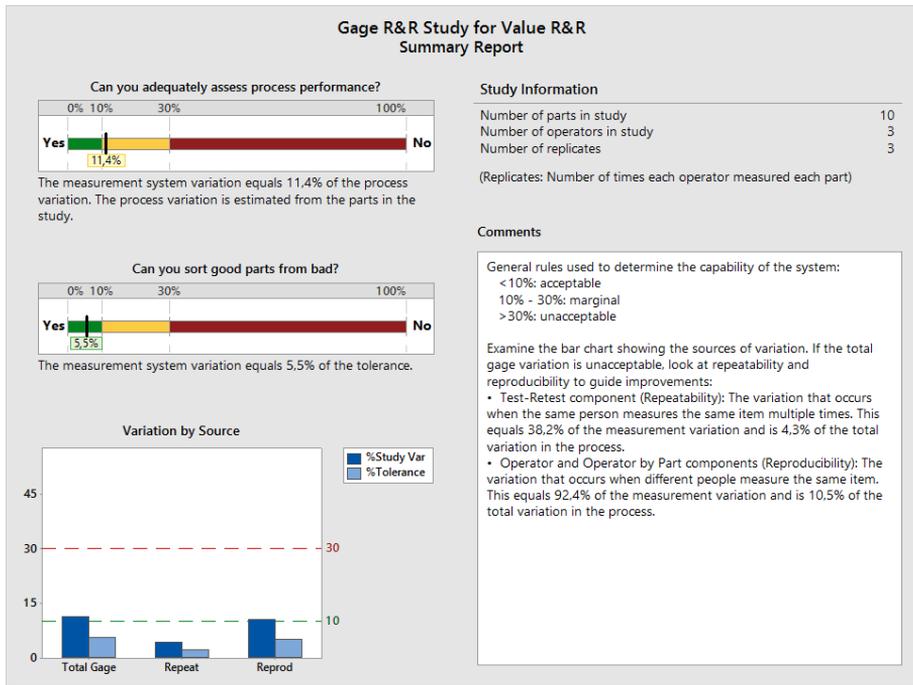


Figura 5.3. Gage R&R Summary Report

5.3 Analisi dei risultati e conclusioni

Guida per l'accettazione dei risultati in accordo alla procedura SKF QT 5:

- Il valore di %R&R (%SV of total gage R&R) deve essere valutato tenendo conto della seguente tabella:

$\%R\&R < 10\%$ $10\% < \% R\&R < 30\%$ $\% R\&R > 30\%$	accettabile accettabile se giustificato non accettabile
--	---

- SV/Toler of total gage R&R deve seguire gli stessi criteri di %R&R;
- Il valore di ndc, che indica il numero di categorie in cui il processo può essere diviso, deve essere maggiore o uguale a 5.

Come si osserva dalle figure 5.2 e 5.3 (ottenute su Minitab: *Assistant>Measurement System Analysis (MSA)>Gage R&R Study (crossed)*), che riassumono i risultati del Gage R&R, il sistema di misura risulta accettabile. Analizzando i singoli parametri statistici si può osservare che:

- $SV/Toler$ è pari a $5,52 < 10\%$;
- ndc è pari a $12 > 5$;
- $\%R\&R$ ($\%Study\ Var$) è di 11,38. Questo valore deriva dalla radice quadrata della somma tra 4,34%, che rappresenta la $\%SV$ dovuta alla ripetibilità, e 10,52%, che rappresenta la $\%SV$ dovuta alla riproducibilità).

Il parametro $\%R\&R$ è inferiore al 30%, ma maggiore del 10%. Il sistema necessita quindi di miglioramenti. Poiché la variabilità del sistema di misura dipende principalmente dalla riproducibilità ($10,52 > 4,34$), si potrebbe pensare di sviluppare nuove procedure di montaggio o di esecuzione della misura in modo da rendere il pezzo indipendente dall'operatore.

5.3.1 Capability

L'analisi di capacità di un sistema permette di distinguere la variabilità di produzione da quella del sistema di misura.

Effettuando più misure su uno stesso pezzo nella stessa posizione, si riesce ad isolare il valore di variabilità dello strumento ($6\sigma_{strumento}$) per compararlo con il 20% della variazione del processo ($6\sigma_{processo}$) o della tolleranza (fig. 2.3).

Nella figura 5.4 si osservano i risultati ottenuti eseguendo un'analisi di *Capability* (su Minitab: *Stat>Quality Tools>Capability Analysis>Normal*) su Minitab, a partire da 50 misure effettuate su un campione con valore di riferimento pari a 40 μm . Si osserva come il processo sia capace (le misure rispettano le tolleranze, cioè si trovano tutte all'interno di LSL e USL) e centrato (la media delle misure si trova al centro).

Sono stati infine calcolati i valori di C_g e C_{gk} ed è stato verificato che entrambi risultano maggiori di 1,33 come imposto dalla normativa SKF-QT5.

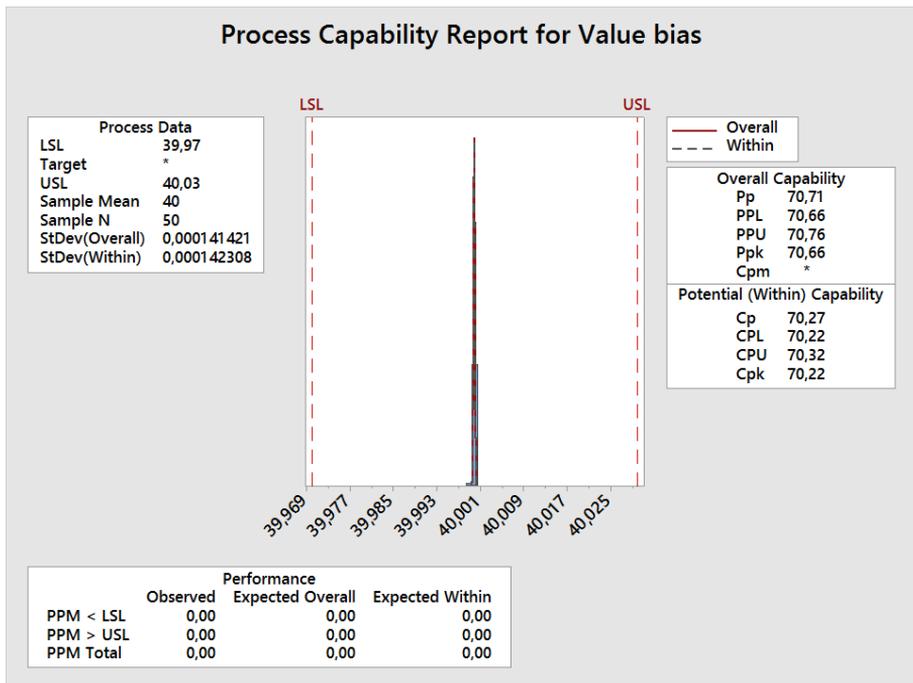


Figura 5.4. Process Capability Report

Si riportano i calcoli effettuati:

$$C_g = \frac{0.2 * tolleranza}{6\sigma_{strumento}} = 15,50 \quad (5.1)$$

$$C_{gk} = \frac{0.1 * tolleranza - |\bar{x}_{instrument} - x_{master}|}{3\sigma_{strumento}} = 10,07 \quad (5.2)$$

5.3.2 Bias and linearity

Lo studio del bias e della linearità permettono di analizzare la stabilità dello strumento. L'analisi è stata condotta a partire da 50 valori ottenuti misurando dieci volte 5 pezzi di diverso valore di riferimento e confrontando i risultati con i valori di riferimento (1, 30, 40, 60, 90).

Come si osserva in fig. 5.5, la retta di regressione, cioè la retta che meglio approssima i bias delle medie, è quasi orizzontale e con bias quasi nullo. Questo significa che lo strumento è stabile (il bias delle medie è costante su ogni pezzo) ed accurato (i valori misurati sono quasi coincidenti con quelli di riferimento).

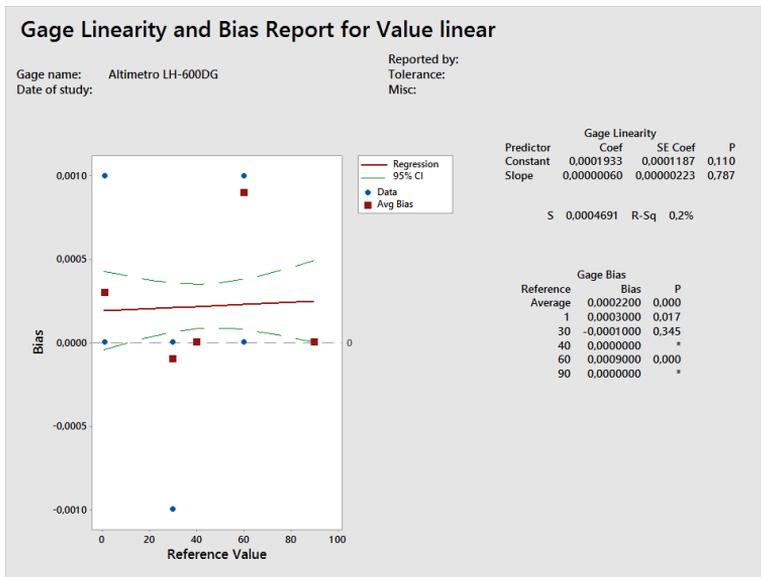


Figura 5.5. Gage Linearity and Bias

Capitolo 6

MSA: Metodo di Karl Fisher

6.1 Preparazione dello studio

Lo studio MSA è stato eseguito in accordo alla procedura SKF QT 5, tenendo conto che la prova è di tipo distruttivo, pertanto non può essere eseguito il *Gage R&R Crossed* poiché non è possibile misurare ogni campione tre volte. In presenza di prove distruttive occorre eseguire il *Gage R&R Nested*. Tuttavia tale studio può essere performato solo nel caso in cui si riescano a trovare dieci campioni omogenei ed abbastanza grandi da essere divisi in tre pezzi. I tre pezzi, poiché provengono da un unico campione omogeneo, possono prendere il posto di un unico pezzo misurato tre volte. In questo caso sono quindi stati scelti dieci campioni di grasso, ciascuno di essi è stato suddiviso in tre parti e poi misurato da un operatore.

6.2 Esecuzione della prova

La misura consiste nel rilevare la percentuale di acqua nel grasso secondo il metodo di Karl Fisher, una tecnica messa a punto dal chimico tedesco Karl Fischer, che consiste in una titolazione il cui punto finale è generalmente rilevato automaticamente per via amperometrica. Il metodo è molto sensibile in quanto permette di rilevare tracce di acqua in un campione fino a poche parti per milione.

6.3 Gage R&R study

In accordo con la normativa é stata eseguita l'analisi delle misure sul software statistico Minitab utilizzando il tipo di studio *Gage R&R Study Nested* (su Minitab: *Stat>Quality Tools>Gage Study> Gage R&R Study Nested*). Si riportano i risultati ottenuti:

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for Karl Fisher

Gage name: MSA Karl Fisher

Date of study: 12/10/2017

Number of Distinct Categories = 15

Source	VarComp	Contribution (of VarComp)
Total Gage r&R	436,4	0,77
Repeatability	436,4	0,77
Reproducibility	0,0	0,00
Part-To-Part	56067,7	99,23
Total Variation	56504,0	100,00

Source	StdDev (SD)	%Study Var (6 SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage r&R	20,890	125,34	8,79
Repeatability	20,890	125,34	8,79
Reproducibility	0,000	0,00	0,00
Part-To-Part	236,786	1420,72	99,61
Total Variation	237,706	1426,23	100,00

Tabella 6.1. Gage R%R Study

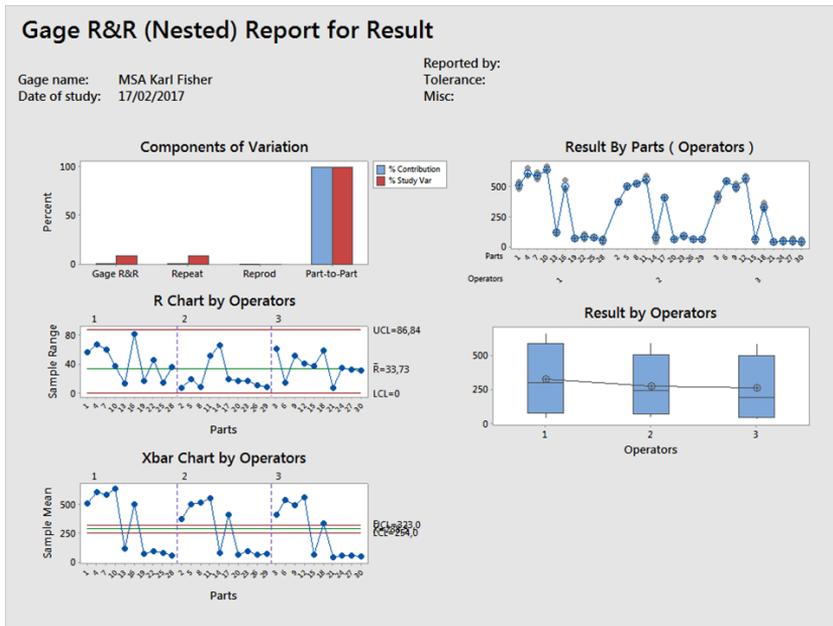


Figura 6.1. Grafici R&R Report

Analisi dei grafici:

Component of variation: La variazione del processo (ultime due barre) è preponderante rispetto alla variazione del sistema di misura.

Result by parts: Rappresenta le misure per ogni particolare eseguite da ogni operatore e le medie delle misure. Si osserva come la variabilità tra le misure eseguite da diversi operatori sullo stesso pezzo sia molto minore della variabilità tra le misure dei diversi particolari.

Result by Operators: Differenza tra le medie delle misure (su dieci pezzi) di ogni operatore.

Si osserva che le medie sono molto simili nel caso degli operatori 2 e 3, mentre l'operatore 1 presenta una media leggermente superiore.

R Chart by Operators: Range tra le misure eseguite dai singoli operatori sui singoli particolari.

Si osserva come nessuna misura sia fuori controllo in quanto tutti i range rientrano nei limiti LCL e UCL.

Xbar Chart by operators: Medie tra le misure fatte dai singoli operatori sui singoli pezzi. Le linee orizzontali rappresentano le linee di controllo calcolate dal grafico R Chart by Operators. L'area tra le linee è una stima delle variazioni legate al sistema di misura.

Si osserva ancora una volta come la variabilità del processo sia superiore a quella del sistema di misura. Nonostante la riproducibilità sembri dare buoni risultati, non ha senso commentare tale indice poiché ogni operatore misura pezzi provenienti da campioni differenti.

6.4 Analisi dei risultati e conclusioni

Guida per l'accettazione dei risultati in accordo alla procedura SKF QT 5:

- Il valore di %R&R (%SV of total gage R&R) deve essere valutato tenendo conto della seguente tabella:

%R&R < 10% 10% < % R&R < 30% % R&R > 30%	accettabile accettabile se giustificato non accettabile
--	---

- Il valore di ndc, che indica il numero di categorie in cui il processo può essere diviso, deve essere maggiore o uguale a 5.

Il sistema di misura risulta accettabile poiché il valore di R&R è pari a 8,79, quindi è inferiore al 10% e $ndc=15 > 5$. Si osserva dal Gage R&R in tabella 6.1 una riproducibilità nulla legata al fatto che i tre operatori misurano pezzi provenienti da campioni diversi (prova non distruttiva).

Il sistema di misure non necessita di miglioramenti in quanto risulta idoneo.

Capitolo 7

MSA: Macchina di misura di precarico/gioco (PCA)

7.1 Preparazione dello studio

Lo studio MSA è stato eseguito in accordo alla procedura SKF QT 5, tenendo conto che la prova è di tipo *non*-distruttivo. Per l'esecuzione dell'analisi sono state seguite le seguenti linee guida:

1. Predisposizione di 10 pezzi (cuscinetti BAR-5013) rappresentativi dell'intero processo;
2. Numerazione dei pezzi;
3. Scelta di 3 operatori;
4. Creazione del *Gage R&R Worksheet* su Minitab in modo che l'ordine delle misure eseguite dagli operatori sia casuale;
5. Montaggio dei cuscinetti sulla macchina per la rilevazione del precarico/gioco;
6. Elaborazione e lettura delle misure ;
7. Esecuzione del *Gage R&R study Crossed su Minitab*;
8. Ottenimento dei risultati statistici: ripetibilità, riproducibilità, %R&R, ndc;
9. Analisi dei risultati e confronto con i criteri di accettazione.

7.2 Valutazione del precarico

La valutazione del precarico si basa sul confronto tra la rigidezza del cuscinetto in esame con quella di un'unità di riferimento dello stesso tipo. Prima di valutare il precarico, su una tipologia di cuscinetti, occorre creare un *file Master excel* che verrà usato per l'elaborazione di tutte le misure relative a quella tipologia di cuscinetti. Le caratteristiche dei singoli *file Master* dipendono dal *design* del cuscinetto, dal *design* dell'attrezzatura, così come dalla rigidità complessiva del banco. Al fine di poter creare il *file master* per ciascuna tipologia di cuscinetto da misurare, deve essere fornito dai progettisti un calcolo di rigidezza di riferimento (curva *reference*), ottenuto utilizzando un apposito *software*.

7.2.1 Creazione del Masterfile

Di seguito si riportano i passaggi da seguire per una esecuzione corretta del *file Master*:

1. Aprire il *file Master* predefinito su Excel e importare la *reference*;
2. Settaggio degli attuatori: la forza (assiale) fornita dall'attuatore pneumatico deve essere pari a -5000 N, la rampa di carico (assiale) fornita dall'attuatore oleodinamico deve andare da 0 a 50000 N o 60000 N.
3. Montaggio del cuscinetto *master* sul banco prova e misura del precarico (in condizioni *as received* cioè senza alterazioni e senza aver subito altre misure). Importazione dei dati su excel.
4. Valutare *Stiffness Correction Factor Structure* (SCFs): montare sul banco di prova la parte inferiore dell'OR (montare solo una corona di sfere). Eseguire una misura statica di precarico ed importare i dati ottenuti nel *file Master*. Porre i due valori dell'SCF bearing a zero e far variare i valori di SCF structure fino a quando la misura ottenuta non ha lo stesso andamento della curva di riferimento. Quando si modifica il valore superiore di SCF é opportuno avere curve coincidenti da 5000 N in su, quando si fa variare quello inferiore le curve devono essere uguali intono a + o -3000 N. Una volta stabiliti i valori dell'SCF questi non dovranno essere più modificati.
5. Posizionare dei distanziali o rimuovere materiale dall'IR per introdurre gioco assiale. Il gioco introdotto artificialmente deve essere minore di 100 μm .
6. Valutare *Stiffness Correction Factor Structure*(SCFb): montare il cuscinetto con i distanziali sulla macchina, condurre la prova di precarico ed esportare i risultati su excel. Far variare i valori di SCF bearing fino a quando la curva ottenuta non risulta simile alla curva di riferimento. Per il valore superiore di

SCF é opportuno che le curve siano simili a circa 3000 N, per quello inferiore a circa -2000 N. I valori di SCF bearing, una volta scelti, non dovranno essere piú modificati.

7. Misurare il precarico sui cuscinetti della stessa tipologia confrontando le curve ottenute con quella del Master. Se le curve dei cuscinetti non corrispondono all'estremitá superiore (oltre il punto di distacco) occorre prestare particolare attenzione nell'ulteriore valutazione. Controllare se esistono ragioni geometriche per la deviazione.

7.3 Procedura di montaggio, esecuzione della misura

Per l'esecuzione di ogni singola misura, il cuscinetto in esame é stato montato sulla macchina (fig.7.3). Il pezzo é stato ancorato su una piastra, sono stati posizionati opportuni tamponi e sfere ed é stata avviata la prova(fig.7.1). Durante la misura il cuscinetto é sottoposto a una forza assiale dal basso di -5000 N, a una rampa di carico assiale dall'alto che va da 0 N a 50000 N o 60000 N e l'anello esterno é posto in rotazione per mezzo di un mandrino(fig.7.2). Durante la prova vengono rilevati i valori di forza (per mezzo di due celle di carico) in funzione dello spostamento (grazie ad un tastatore). Infine le misure vengono riportate su un file Excel ed elaborate confrontandole con il file Master.



Figura 7.1. Montaggio del cuscinetto sulla PCA

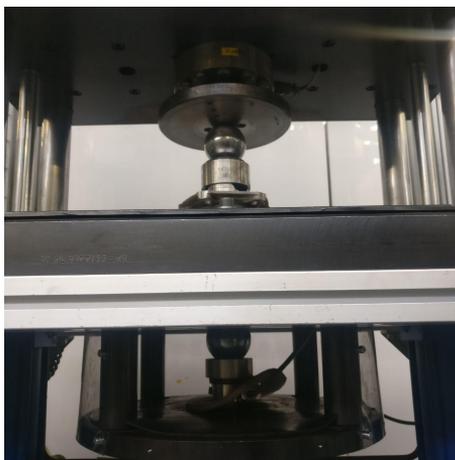


Figura 7.2. Posizionamento del mandrino ed applicazione dei carichi



Figura 7.3. Macchina PCA

7.4 Gage R&R study

In accordo con la normativa é stata eseguita l'analisi delle misure sul software statistico Minitab utilizzando il tipo di studio *Gage R&R Study Crossed* (su Minitab: *Stat>Quality Tools>Gage Study> Gage R&R Study Crossed*) poiché si tratta di una misura non distruttiva. Si riportano i risultati ottenuti:

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for PCA

Gage name: MSA PCA

Date of study: 15/10/2017

Number of Distinct Categories = 6

Process tolerance = 30

Source	VarComp	Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	1,7733	4,16
Repeatability	0,8333	1,95
Reproducibility	0,9399	2,20
Operators	0,0000	0,00
Operators*Parts	0,9399	2,20
Part-To-Part	40,8947	95,84
Total Variation	42,6679	100,00

Source	StdDev (SD)	%Study Var (6 SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (%SV/Toler)
Total Gage R&R	1,33163	7,9898	20,39	26,63
Repeatability	0,91287	5,4772	13,98	18,26
Reproducibility	0,96949	5,8170	14,84	19,39
Operators	0,00000	0,0000	0,00	0,00
Operators*Parts	0,96949	5,8170	14,84	19,39
Part-To-Part	6,39489	38,3694	97,90	127,90
Total Variation	6,53207	39,1924	100,00	130,64

Tabella 7.1. Gage R&R Study

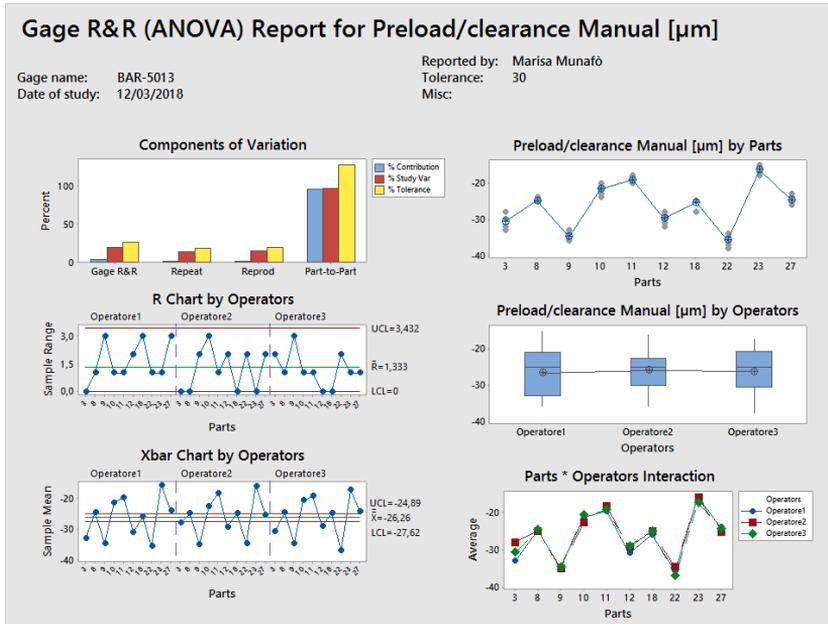


Figura 7.4. Gage R&R Report

Analisi dei grafici:

Component of variation: La variazione del processo (ultime tre barre) è preponderante rispetto alla variazione del sistema di misura.

Preload/clearance Manual [μm]by Parts: Rappresenta le misure per ogni particolare eseguite da ogni operatore e le medie delle misure.

Si osserva come la variabilità tra le misure eseguite da diversi operatori sullo stesso pezzo sia molto minore della variabilità tra le misure dei diversi particolari.

Preload/clearance Manual [μm] by Operators: Differenza tra le medie delle misure (su dieci pezzi) di ogni operatore.

*Parts*Operators Interaction:* Se le linee che rappresentano i tre operatori sono, come in questo caso, all'incirca parallele e non si intersecano, non c'è significativa interazione tra operatore e pezzi (buona riproducibilità).

R Chart by Operators: Range tra le misure eseguite dai singoli operatori sui singoli particolari.

Xbar Chart by operators: Medie tra le misure fatte dai singoli operatori sui singoli pezzi. Le linee orizzontali rappresentano le linee di controllo calcolate dal grafico R Chart by Operators. L'area tra le linee è una stima delle variazioni legate al sistema di misura.

Si osserva ancora una volta come la variabilità del processo sia superiore a quella del sistema di misura.

7.5 Analisi dei risultati e conclusioni

Guida per l'accettazione dei risultati in accordo alla procedura SKF QT 5:

- Il valore di %R&R (%Study Variation of total gage R&R) deve essere valutato tenendo conto della seguente tabella:

$\%R\&R < 10\%$ $10\% < \% R\&R < 30\%$ $\% R\&R > 30\%$	accettabile accettabile se giustificato non accettabile
--	---

- %Tolerance of total gage R&R deve seguire gli stessi criteri di %R&R;
- Il valore di ndc, che indica il numero di categorie in cui il processo può essere diviso, deve essere maggiore o uguale a 5.

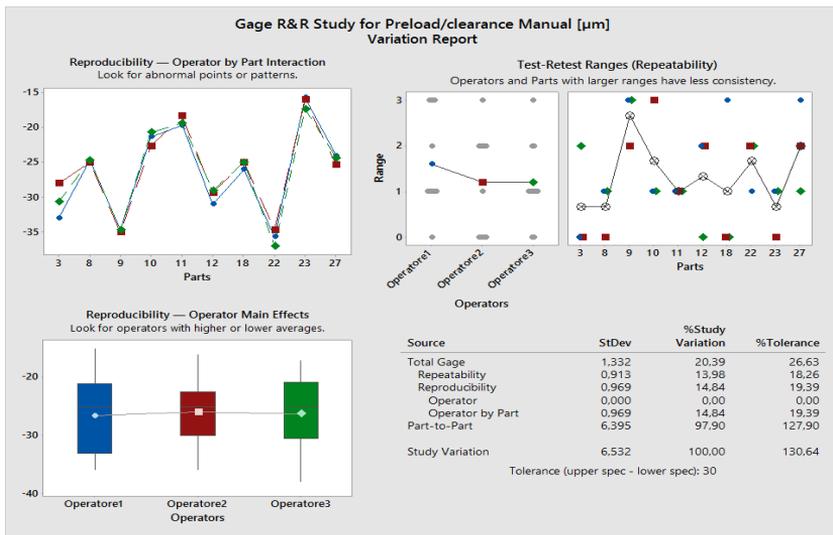


Figura 7.5. Variation Report Gage R&R

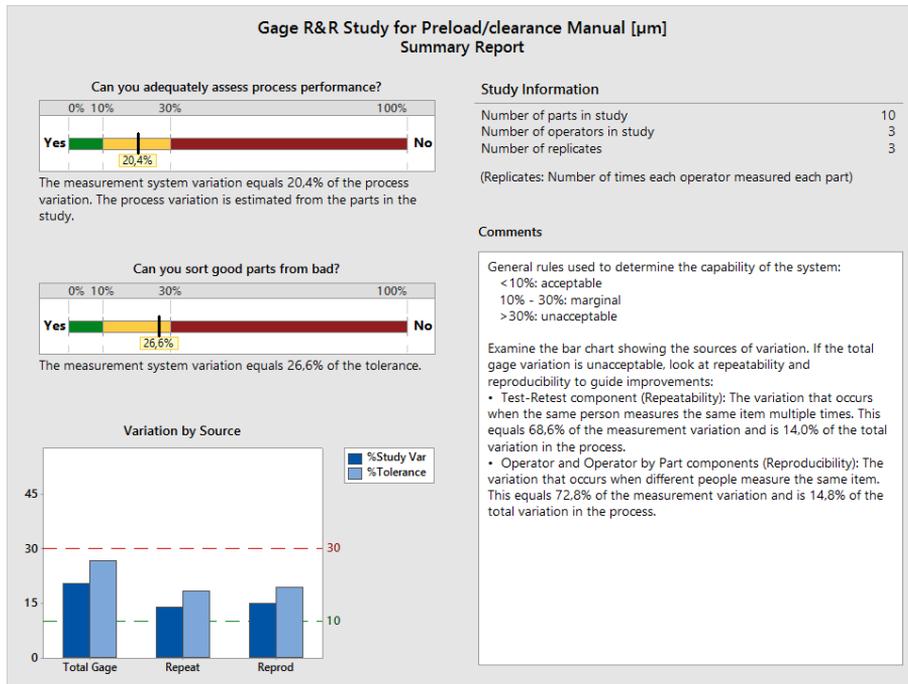


Figura 7.6. Gage R&R Summary Report

Le figure 7.5 e 7.6 riassumono i risultati del Gage R&R Crossed (su Minitab: *Assistant*>*Measurement System Analysis (MSA)*>*Gage R&R Study (crossed)*). Dall'MSA condotta si può concludere che il sistema di misura risulta accettabile, ma non perfettamente idoneo, infatti:

- il valore di %Study Var R&R è pari a 20.39, minore del 30%, ma superiore al 10%. È composto dai due contributi: ripetibilità=13.98) e riproducibilità=18.84.
- il valore di %SV/Toler R&R è pari a 26.63, minore del 30%, ma superiore al 10%. È composto dai due contributi: ripetibilità= 18.26 e riproducibilità=19.39.
- $ndc=6>5$.

Poiché i valori di %Study Vare %SV/Toler of total gage R&R sono piuttosto vicini al limite di accettabilità (30%), è opportuno analizzare il sistema al fine di individuare le principali cause di errore e proporre nuove strategie di misurazione.

I capitoli successivi si occupano della descrizione di una nuova procedura di elaborazione automatica delle misure che incrementa l'affidabilità, elimina la soggettività e riduce notevolmente i tempi di misura.

Parte III

Automatizzazione della misura di precarico

Capitolo 8

Verso l'industria 4.0

Il termine Industria 4.0 (o Industry 4.0) indica la tendenza dell'automazione industriale che integra alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro ed aumentare la produttività e la qualità produttiva degli impianti. L'industria 4.0 si basa sul concetto di *smart factory* che si compone di 3 parti:

- Smart production: l'insieme di tecnologie innovative produttive che garantiscono una forte collaborazione e interazione tra tutti gli elementi presenti nella produzione ovvero tra operatore, macchine e strumenti.
- Smart services: l'integrazione tra i sistemi e tra le aziende.
- Smart energy: l'attenzione verso i consumi energetici. L'obiettivo è creare sistemi con consumo energetico ridotto, con sprechi minori e utilizzando energia sostenibile.

L'impatto che queste nuove politiche avranno sul contesto sociale ed economico, hanno portato alla definizione di questo momento storico come "Quarta rivoluzione industriale" ¹.

Come già accennato, nei capitoli successivi è riportata la descrizione di una procedura automatizzata innovativa che rende la macchina PCA più affidabile, integrando la figura dell'operatore con lo strumento di misura, migliorando la riproducibilità e ripetibilità.

¹https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0

Capitolo 9

Il precarico/gioco nei cuscinetti

Spesso accade che, per ottimizzare il funzionamento dei cuscinetti, occorra che essi siano precaricati. Infatti, la vita di un cuscinetto aumenta all'aumentare del precarico fino ad un valore limite, al di sopra del quale la vita decresce gradualmente (fig. 9.1). Ci sono pertanto molti casi, ad es. i cuscinetti dei mandrini delle macchine utensili, quelli dei pignoni dei differenziali a bordo degli autoveicoli, in cui é necessario avere un gioco negativo (precarico), al fine di aumentare la rigidezza o la precisione di rotazione del sistema. Il precarico puó essere necessario anche quando i cuscinetti devono operare in assenza di carico o con carichi leggeri ed ad alte velocità. In questi casi, il precarico serve ad assicurare un carico minimo al cuscinetto, evitando i danni che potrebbero nascere a causa degli strisciamenti dei corpi volventi.¹

¹www.skf.com/it/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/application-of-bearings/bearing-preload/index.html

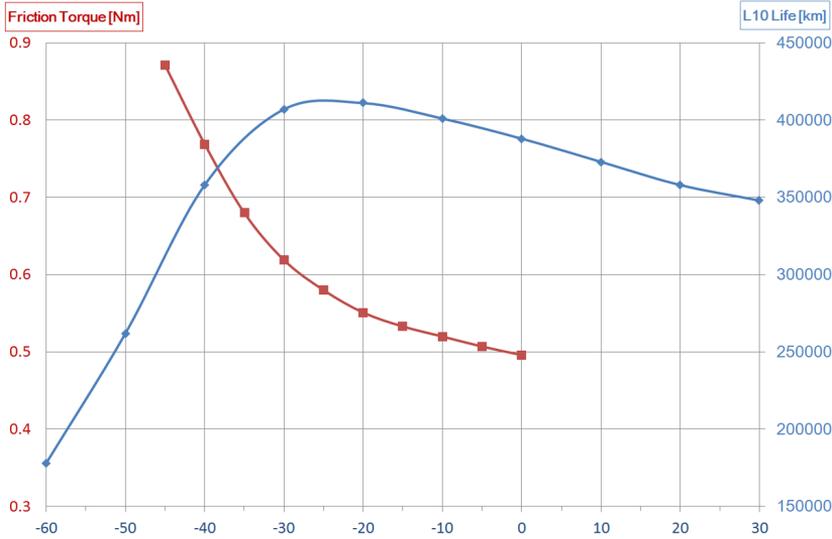


Figura 9.1. Vita del cuscinetto in funzione del precarico e dell'attrito

I principali motivi per l'applicazione del precarico sono i seguenti²:

- Elevata rigidezza. La rigidezza del cuscinetto é definita come il rapporto della forza che agisce sul cuscinetto rispetto alla deformazione elastica nello stesso.
- Funzionamento silenzioso. Minore é il gioco di un cuscinetto, migliore sarà la guida dei corpi volventi nella zona non soggetta a carico e piú silenzioso sarà il funzionamento del cuscinetto.
- Guida dell'albero precisa: I cuscinetti precaricati assicurano una guida dell'albero piú precisa, poiché il precarico limita la possibilità dell'albero di flettersi sotto carico. Per esempio, la guida piú precisa e la maggiore rigidezza, offerte dai cuscinetti precaricati nelle coppie pignone differenziale, fanno sí che l'ingranamento si mantenga preciso e costante nel tempo e che rimangano minime le forze di carattere dinamico. Il risultato é un funzionamento piú silenzioso ed una maggiore durata dell'ingranamento.

²www.skf.com/it/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/application-of-bearings/bearing-preload/index.html

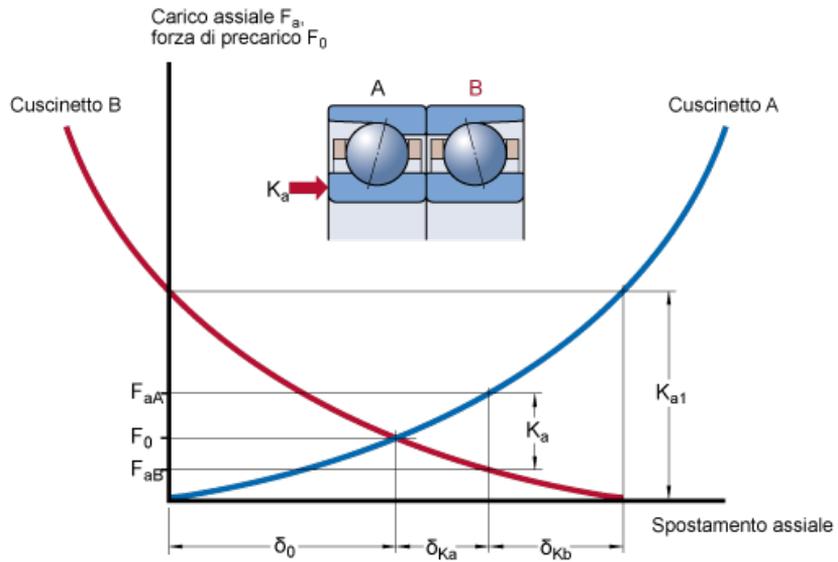


Figura 9.2. Influenza di un carico esterno, da SKF.com

- Compensazione di usura e cedimenti. I processi di usura e assestamento in una disposizione di cuscinetti durante il funzionamento aumentano il gioco, ma possono essere compensati dal precarico.
- Lunga durata operativa. In talune applicazioni, l'introduzione del precarico nella disposizione di cuscinetti può aumentare l'affidabilità di funzionamento e prolungare la durata. Un precarico opportunamente determinato può avere un'influenza positiva sulla distribuzione dei carichi nei cuscinetti e pertanto anche sulla durata di esercizio.

9.1 Concetti base

Si definiscono i concetti di gioco e precarico:

- Gioco: distanza tra la sfera e la spalla della pista dell'IR quando le facce degli anelli interni sono a contatto tra loro (fig.9.3).
- Precarico: in termini di spostamento è il gap tra gli anelli interni. In termini di forza è la forza necessaria per chiudere tale gap (fig.9.3). L'operazione di assemblaggio chiude la distanza tra gli anelli interni e precarica il cuscinetto (fig.9.5).

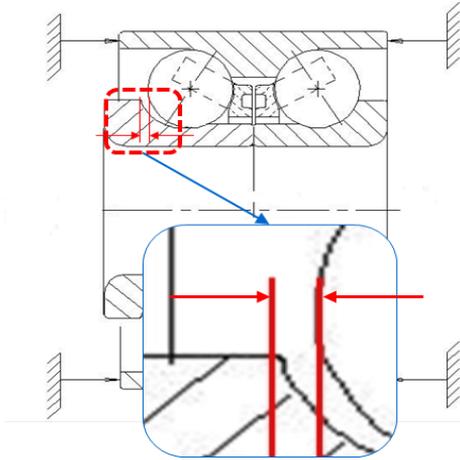


Figura 9.3. Gioco

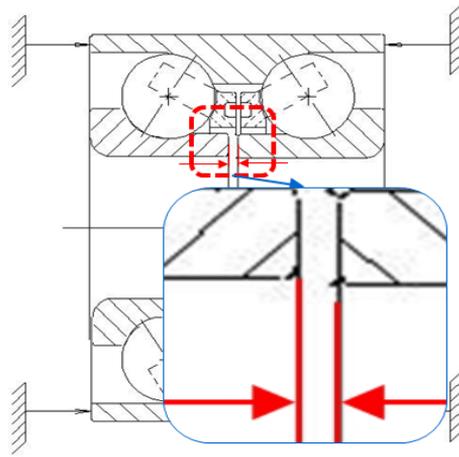


Figura 9.4. Precarico

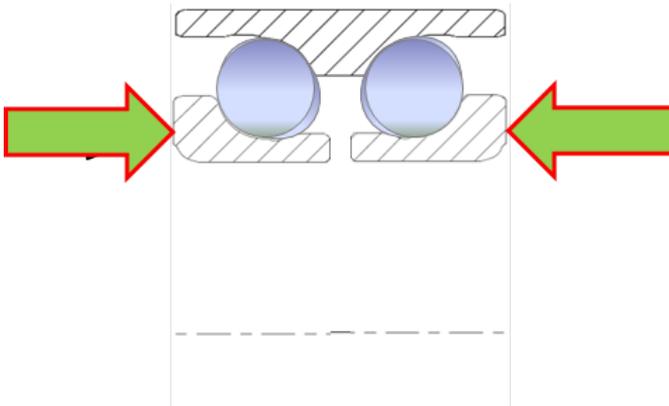


Figura 9.5. Cuscinetto precaricato

La teoria di misura di precarico/gioco richiede alcune assunzioni:

- Il contatto tra le piste e le sfere ha una deformazione totalmente elastica sotto i carichi a cui viene sottoposto il cuscinetto;
- La deformazione elastica non é lineare (contatto hertziano, contatto hertziano troncato);
- Si considerano solo spostamenti assiali.

Sotto queste condizioni il sistema pista-sfera, in termini di rigidità e deformazione si può studiare come un modello molla non lineare-corpo rigido (fig.9.6 e 9.7).

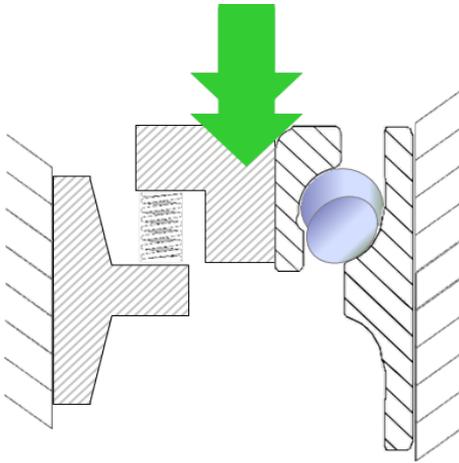


Figura 9.6. modello molla-corpo rigido

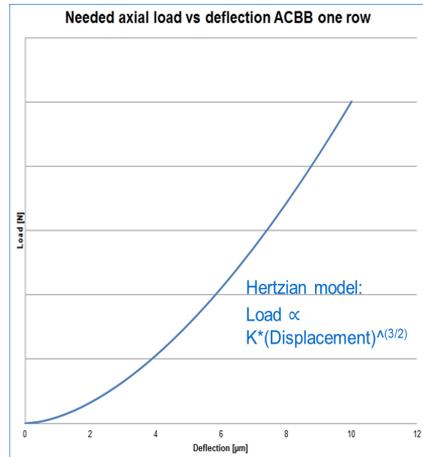


Figura 9.7. Deformazione secondo il modello hertziano

Considerando cuscinetti a due corone di sfere, si possono analizzare tre andamenti:

- Cuscinetto né in gioco, né in precarico. Il comportamento è descritto in figura 9.8, il tratto in blu indica il comportamento della corona inferiore quando il cuscinetto viene caricato assialmente, quello verde il comportamento delle sfere superiori.
- Cuscinetto in gioco. Le curve in blu e verde della figura 9.9 sono identiche alle precedenti, ma si distingue un tratto orizzontale al centro, necessario per vincere il gioco prima di agire su una o sull'altra corona.
- Cuscinetto in precarico. Come si osserva in figura 9.10 per valori bassi di forza assiale avvengono contemporaneamente due fenomeni: la corona su cui agisce il carico si deforma, la corona sul lato opposto si rilassa. La curva risultante tiene conto di entrambi i fenomeni.

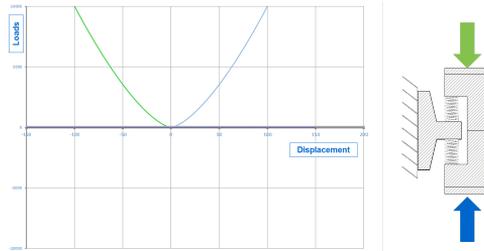


Figura 9.8. Comportamento di un cuscinetto né in gioco né in precarico



Figura 9.9. Comportamento di un cuscinetto in gioco

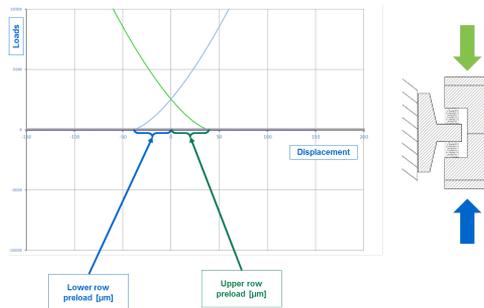


Figura 9.10. Comportamento di un cuscinetto in precarico

9.2 Esecuzione della prova ed elaborazione dati

La misura di precarico sulla macchina PCA, per una qualunque tipologia di cuscinetto, viene eseguita in due fasi. La prima riguarda la vera e propria esecuzione della prova sulla macchina e prevede (fig. 9.11):

- il posizionamento e il serraggio del cuscinetto;
- l'attivazione di un sistema di attuatori idraulico ed oleodinamico che provvedono a caricare assialmente il cuscinetto;
- La rotazione dell'anello esterno del cuscinetto mediante un mandrino ;
- L'ottenimento dei valori di forza e spostamento per mezzo di due celle di carico e un tastatore.

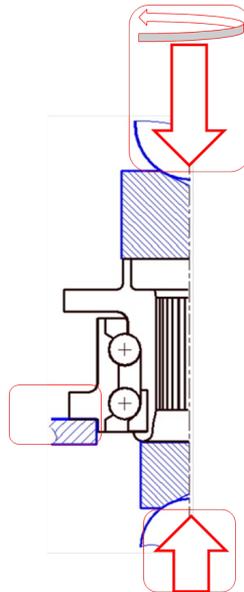


Figura 9.11. Schema della macchina PCA

Questa prima fase della misura comporta errori legati alla precisione, stabilità ed affidabilità dell'intero sistema di misura a cui si sommano gli errori legati al montaggio, al singolo operatore e al cambio di operatore. Una stima dell'errore prevederebbe quindi un'attenta analisi su ogni componente del sistema di misura ed un'eventuale riprogettazione della macchina.

La seconda fase riguarda l'elaborazione grafica dei dati. Consiste nel confrontare la curva in gioco o in precarico con quella *master* (cuscinetto né in gioco né in precarico) sovrapponendone i tratti superiori. Le figure 9.12 e 9.13 mostrano come ricavare i valori di gioco e precarico dopo aver eseguito la sovrapposizione. Per la procedura di creazione del master si rimanda al capitolo sull'MSA eseguita sulla macchina.

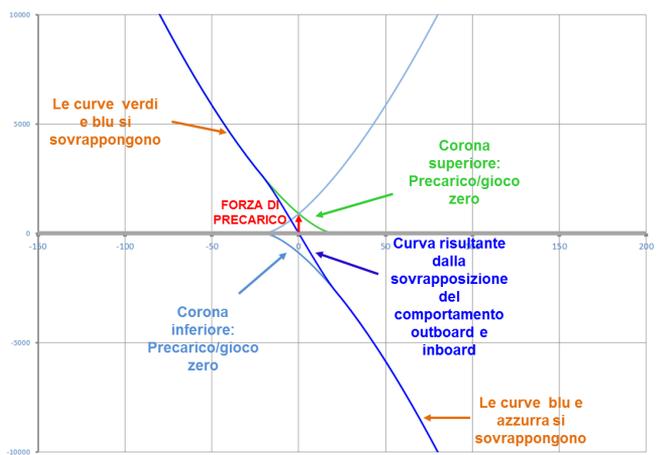


Figura 9.12. Confronto tra il master e la curva di precarico

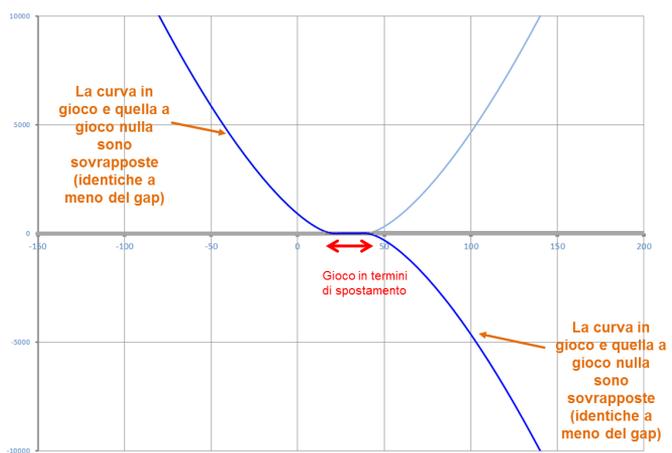


Figura 9.13. Confronto tra il master e la curva in gioco

L'elaborazione delle misure viene eseguita attualmente in modo manuale. Nonostante l'operatore sia supportato da un foglio di calcolo Excel, egli esegue il calcolo della misura per tentativi, imponendo cioè traslazioni manuali fino a raggiungere la sovrapposizione ottimale. Questa procedura deve essere eseguita con estrema attenzione, in quanto è alta la possibilità di errori di parallasse, errore di importazione dei dati, errori dovuti alla scarsa mancanza di istruzioni fornite all'operatore. L'estrema criticità di questa procedura si traduce in un tempo di elaborazione della misura elevato e in una imperfetta ripetibilità e affidabilità della misura.

9.3 Automatizzazione del processo: implementazione del programma

Le possibilità di incrementare l'efficienza della macchina PCA prevedevano due alternative:

1. Ridurre gli errori di *esecuzione* della misura, legati alla soggettività degli operatori, allo strumento di misura (risoluzione e precisione), alle procedure di montaggio
2. Ridurre gli errori di *elaborazione* dei dati.

Si è scelto di agire sulla seconda tipologia di errori in quanto la soluzione era a costo zero e permetteva, oltre a un incremento di affidabilità, una riduzione del tempo di misura (la creazione di un master poteva richiedere fino ad alcune *ore*, la misura del valore di precarico alcuni *minuti*). È stata programmata, con l'utilizzo del software Matlab, una procedura automatizzata per l'elaborazione dei dati. Quest'ultima non altera il tipo di elaborazione precedente, ha il solo obiettivo di affidare al software il calcolo dei valori di traslazione ottimali delle curve sperimentali rispetto a quelle di riferimento. Il software, attraverso la funzione *fminsearch*, fornisce in automatico e in pochi secondi i valori ricercati. La procedura automatizzata presenta ulteriori vantaggi:

- Il programma è *User-friendly* in quanto è stata realizzata un'interfaccia grafica personalizzata e un'icona che permette dal desktop di aprire la procedura. È stato quindi creato un programma personalizzato di elaborazione dati.
- L'importazione dei dati avviene in automatico;
- Non viene fornito dal software solo il risultato dei valori ottimali di traslazione, ma anche tutti i risultati della misura (forza e spostamento in corrispondenza dei valori di gioco/precarico);
- Il programma e la relativa interfaccia grafica possono essere personalizzate o implementate.
- L'operatore ha il solo compito di supervisionare le operazioni eseguite dal programma ed eventualmente modificare il range di fitting dei dati.
- I master e i valori di precarico vengono salvati automaticamente attraverso la creazione e l'esportazione in un apposita cartella di due file .png che includono il nome del cuscinetto, il numero e la data.

Le immagini salvate in automatico dal programma sono come quelle mostrate in fig. 9.14 e 9.15 .

La prima rappresenta i passaggi relativi alla creazione del *master*: calcolo del SCF della struttura, calcolo del SCF del cuscinetto mediante la traslazione automatica, creazione finale del *master*. Si possono osservare tutti i tentativi di traslazione nel grafico in basso a sinistra.

La seconda figura rappresenta il calcolo del valore di gioco/precarico eseguito attraverso una traslazione automatica che ottimizza la sovrapposizione tra la misura sperimentale e il *master*.

Le due figure forniscono tutti i valori necessari per la misura.

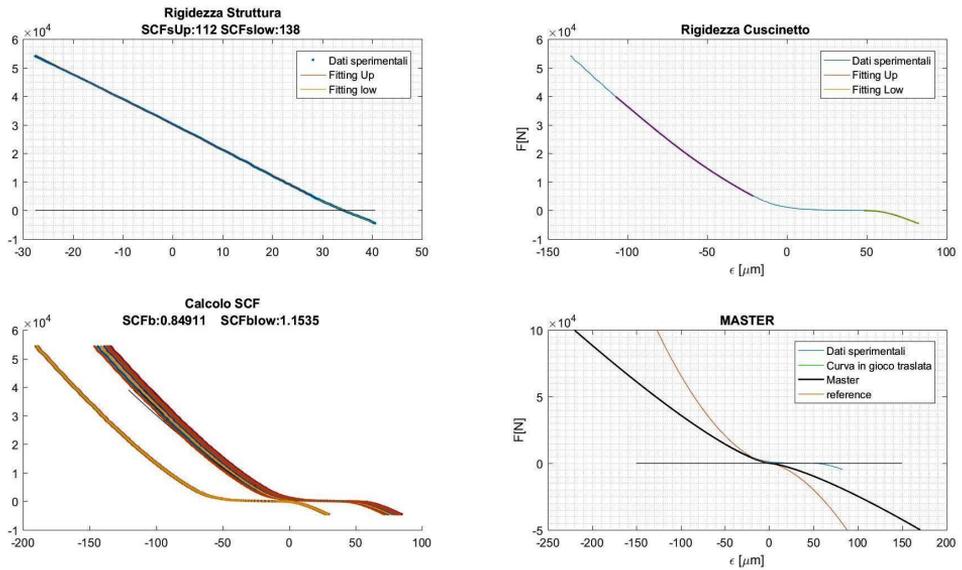


Figura 9.14. Creazione automatica di un master

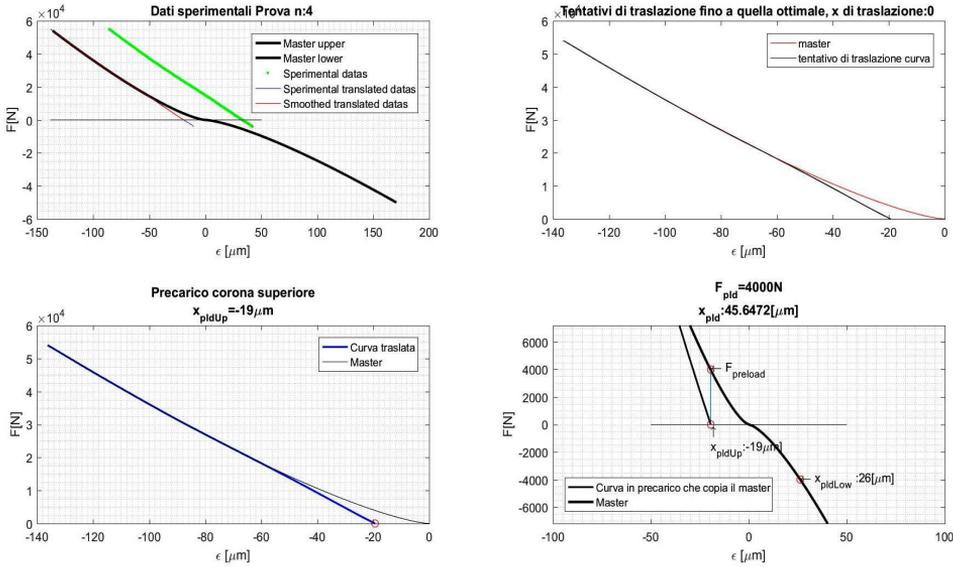


Figura 9.15. Calcolo automatico del valore di gioco e precarico

9.3.1 Analisi dei risultati

La procedura automatica é stata testata su diverse misure di svariate tipologie di cuscinetti. Si é osservata una forte corrispondenza tra i valori ottenuti automaticamente e quelli ricavati manualmente, insieme a un'elevata riduzione dei tempi di misura.

Al fine di verificare anche l'incremento di ripetibilitá e riproducibilitá é stata ripetuta l'MSA utilizzando le stesse curve sperimentali, ma elaborando le misure in modo automatico.

Il sistema é risultato piú affidabile e con una migliore ripetibilitá e riproducibilitá. Si riportano i risultati relativi alla nuova MSA:

Gage R&R Study - ANOVA Method
 Gage R&R for PCA
 Gage name: MSA PCA
 Date of study: 15/10/2017

Number of Distinct Categories = 7
 Process tolerance = 30

Source	VarComp	Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	1,2920	3,11
Repeatability	0,4904	1,18
Reproducibility	0,8016	1,93
Operators	0,0562	0,14
Operators*Parts	0,7454	1,80
Part-To-Part	40,2280	96,89
Total Variation	41,5201	100,00

Source	StdDev (SD)	%Study Var (6 SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (%SV/Toler)
Total Gage R&R	1,13668	6,8201	17,64	22,73
Repeatability	0,70032	4,2019	10,87	14,01
Reproducibility	0,89532	5,3719	13,89	17,91
Operators	0,23704	1,4223	3,68	4,74
Operators*Parts	0,86337	5,1802	13,40	17,27
Part-To-Part	6,34256	38,0553	98,43	126,85
Total Variation	6,44361	38,6616	100,00	128,8

Tabella 9.1. Gage R%R Study

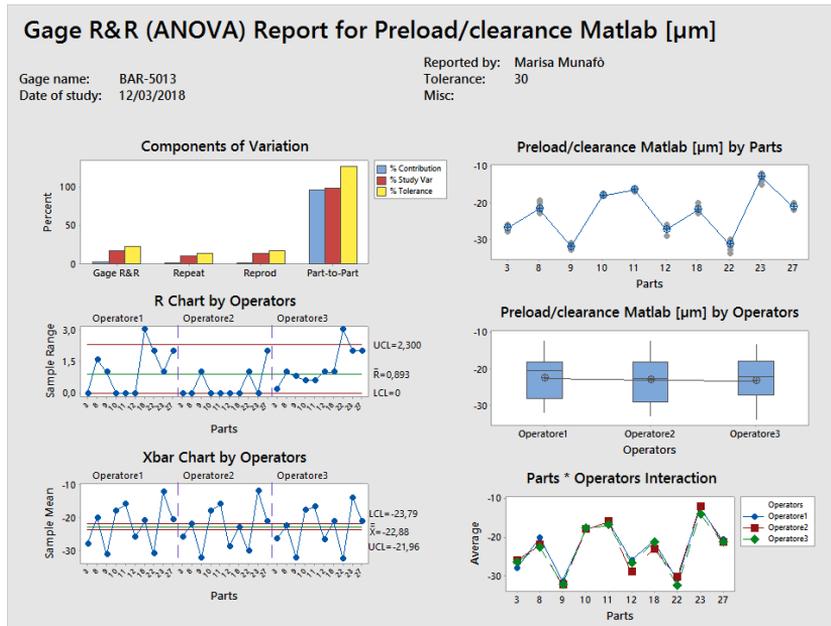


Figura 9.16. Gage R&R Report

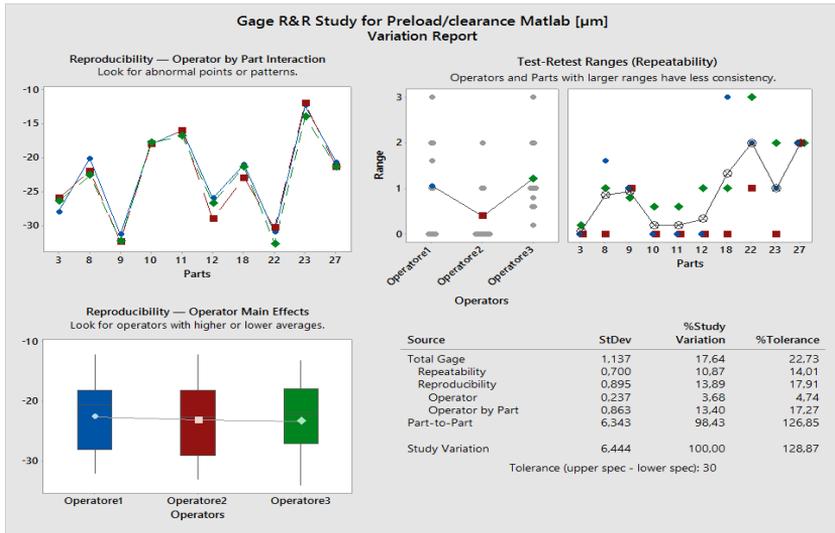


Figura 9.17. Gage R&R Variation Report

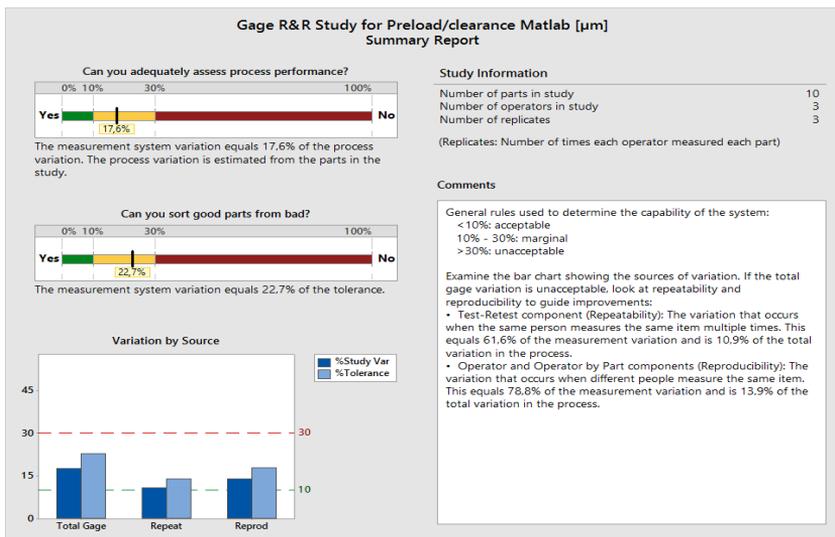


Figura 9.18. Gage R&R Summary Report

Dalle fig. 9.17 e 9.18 si osserva come la %R&R (%Study Variation of total gage R&R) si sia ridotta da 20,39 a 17,64 con un decremento sia della componente di ripetibilità che di riproducibilità. Allo stesso modo la %Tolerance of total gage R&R si é ridotta da 26,63 a 22,73.

La procedura automatica ha **ridotto l'incertezza** del sistema di misura incrementandone l'affidabilità: sistema di misura può essere considerato idoneo.

Al fine di quantificare la riduzione di variabilità apportata dalla nuova procedura sono state prese in esame 20 misure eseguite sul cuscinetto BAR-0248 ed elaborate sia su Excel che su Matlab. Si é osservata una riduzione dell'incertezza di misura del 50%, da 4 μm a 2 μm . Le immagini 9.19 e 9.20 rappresentano le gaussiane relative alle 20 misure. É facile osservare come la Gaussiana relativa alla procedura automatica presenti una deviazione standard minore e una riduzione dell'ampiezza della campana.

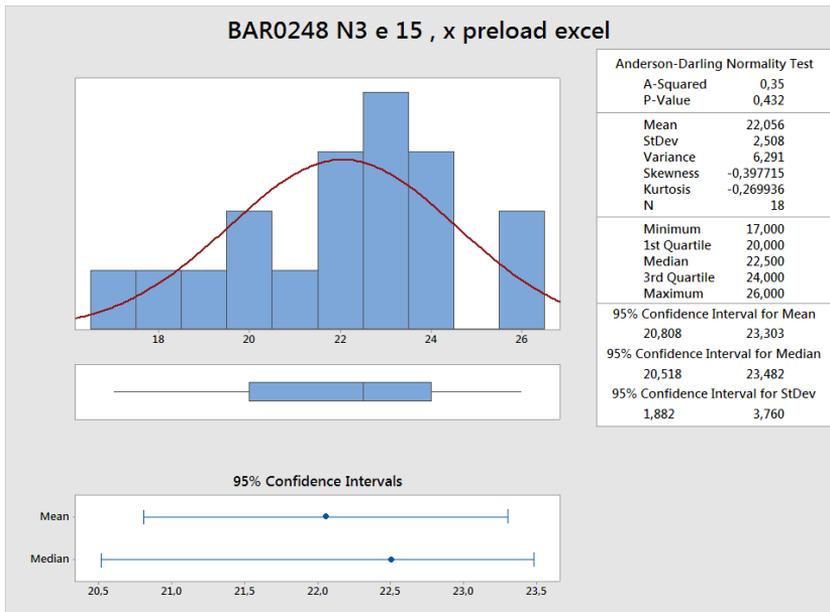


Figura 9.19. Analisi statistica della procedura manuale

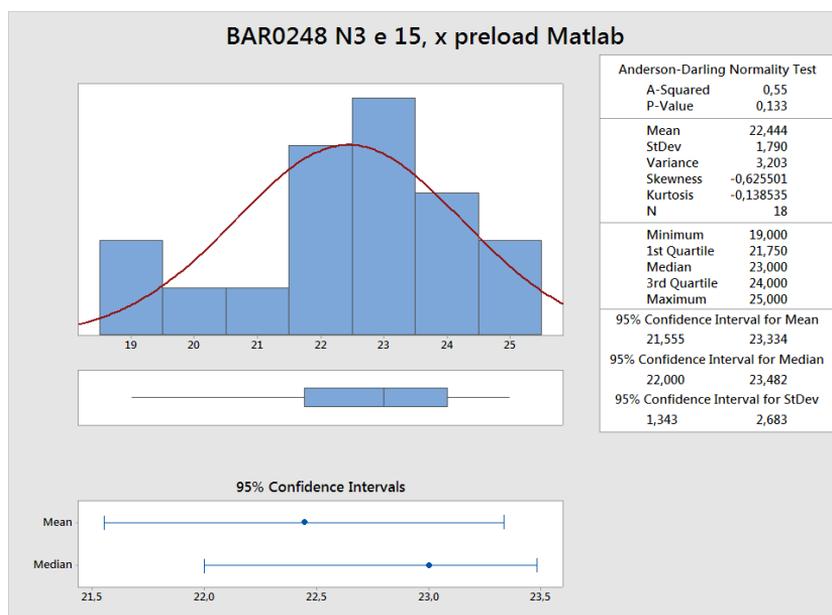


Figura 9.20. Analisi statistica della procedura automatica

9.3.2 Conclusioni

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva che evidenzia i risparmi in termini di tempo e incertezza apportati dal nuovo programma di elaborazione dati.

Tipo di misura	Tipo di elaborazione	Tempi di calcolo	Ripetibilità e Riproducibilità
Creazione master (PCA)	Manuale	Qualche ora (circa 2)	Bassa ripetibilità: -errore di misura (strumenti, montaggio) -errore di elaborazione (operatore, Approssimazioni)
Creazione master (PCA)	Automatica	Qualche secondo	Migliore ripetibilità -errore di misura
Calcolo prearico (PCA)	Manuale	Alcuni minuti(circa 5)	Bassa ripetibilità
Calcolo prearico (PCA)	Automatica	Alcuni secondi	Migliore ripetibilità riduzione incertezza del 50%

Tabella 9.2. Tabella riassuntiva

9.4 Interfaccia grafica

Al fine di favorire l'interazione tra l'operatore e il programma di elaborazione automatico e quindi per assicurarsi che il programma sia user-friendly, è stata costruita un'interfaccia grafica personalizzata.

L'interfaccia permette di caricare i dati, di riempire tutti i campi di input, di scegliere la procedura da eseguire: creazione del master o misura di gioco/precarico. L'interfaccia mostra in estemporaneo tutte le operazioni eseguite in modo che l'operatore possa sempre monitorare il processo (fig.9.21). L'interfaccia garantisce pertanto un'elevata interazione tra l'operatore e la macchina.

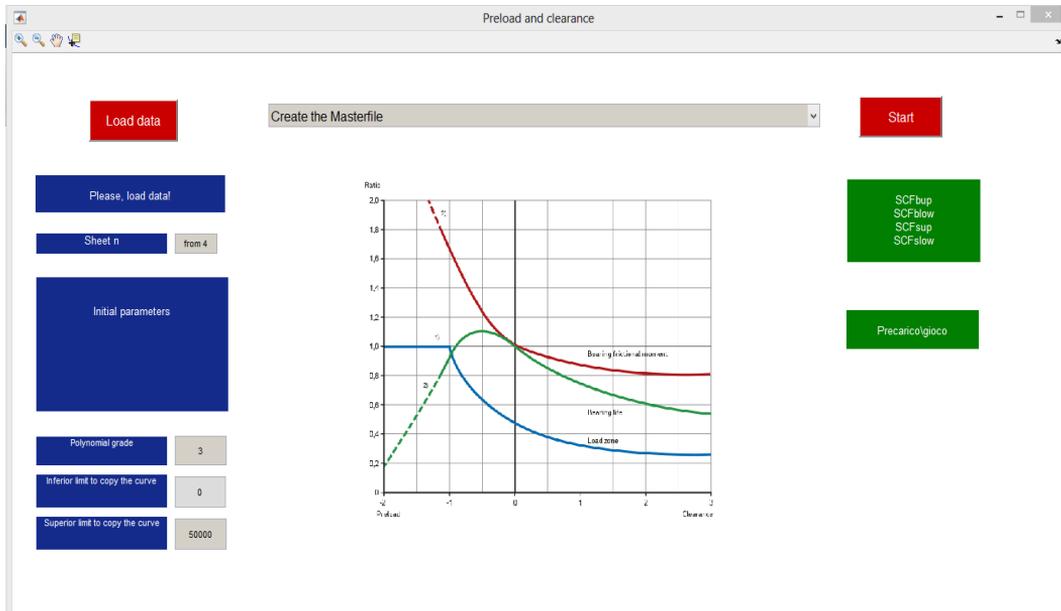


Figura 9.21. Interfaccia grafica

9.5 Script

Si riporta il *main* dello script realizzato per la creazione della procedura automatica su Matlab.

```

1 %begin
2     clear ; close ; clc ;
3 %% Find Master
4     %Input
5     nomeinput='.\dati\BTH1267';
6     ii=4;
7     num=3;
8     limfitCrvGUp = [5000 58000];
9     limfitCrvGlow = [-5000 0];
10    limitstfUp=5000;
11    limitstfLow=4000;
12    gradepolyclrUp=3;
13    gradepolyclrLow=21;
14    gradepolyUp=3;
15
16    %Calculation of functions-
17    datimaster;
18    [SCFs SCFslow]=SCFstructure;
19    [ Bspx Bspy Bfitx , Bfity , Bfitxlow , Bfitylow , Bfitpoly
20     ,...
21     Bfitpolylow , refxup , refyup , refxlow , refylo] =
22     fittinggioco
23     SCFb = fminsearch(@(c) trovaSCFb(c),1);
24     SCFblow = fminsearch(@(c) trovaSCFblow(c),1);
25     graficofinalemaster;
26 %% Find clearance\preload
27     %Input
28     %Calculation of functions
29     calcoloplldgioco;
30     xtrz = fminsearch(@(c) trovaxtrl(c),0);
31     graficipldclr;

```

9.5.1 La funzione fminsearch

La funzione Matlab utilizzata per eseguire automaticamente la traslazione di una curva fino a farla coincidere con una di riferimento prende il nome di `fminsearch`. `fminsearch` usa l'algoritmo di Nelder-Mead. Il metodo non fa uso delle derivate e si basa sul concetto di semplice, un particolare tipo di politopo con $n+1$ vertici in uno spazio ad n dimensioni. Il semplice sarà un segmento in una retta, un triangolo nel piano, un tetraedro nello spazio etc.

Il metodo genera una nuova posizione di test estrapolando il comportamento della funzione obiettivo valutata in ogni punto del dominio ai vertici di un semplice. L'algoritmo quindi sceglie uno di questi punti, da rimpiazzare con un nuovo punto. Il passo più semplice è rimpiazzare il punto più lontano dall'ottimo con il centroide dei restanti n punti: se la valutazione nel nuovo punto è migliore rispetto al punto corrente, si continua la ricerca con andamento esponenziale nella direzione individuata dal punto, altrimenti si cerca in direzione di un punto che fornisca una valutazione migliore.

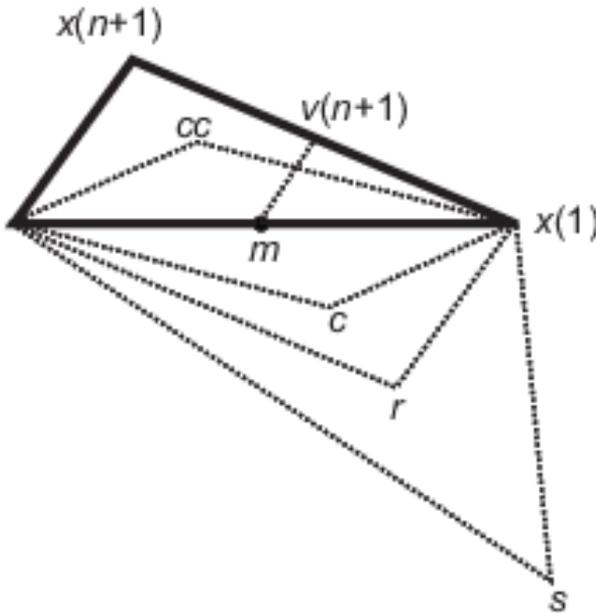


Figura 9.22. Algoritmo dell' `fminsearch`, da mathworks.com

Capitolo 10

Work Instruction PCA Automatic Procedure

Bibliografia

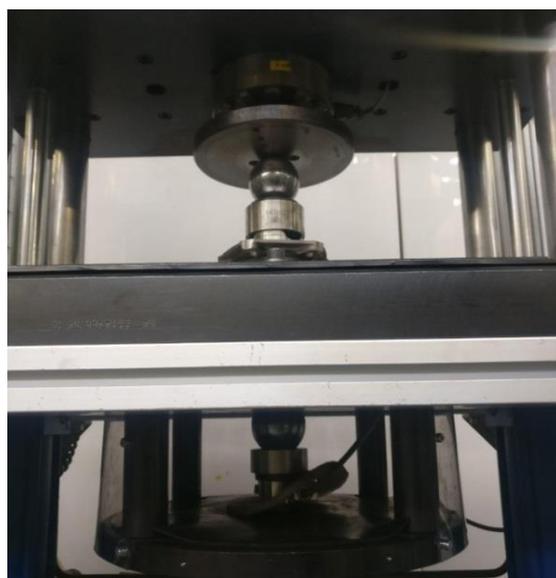
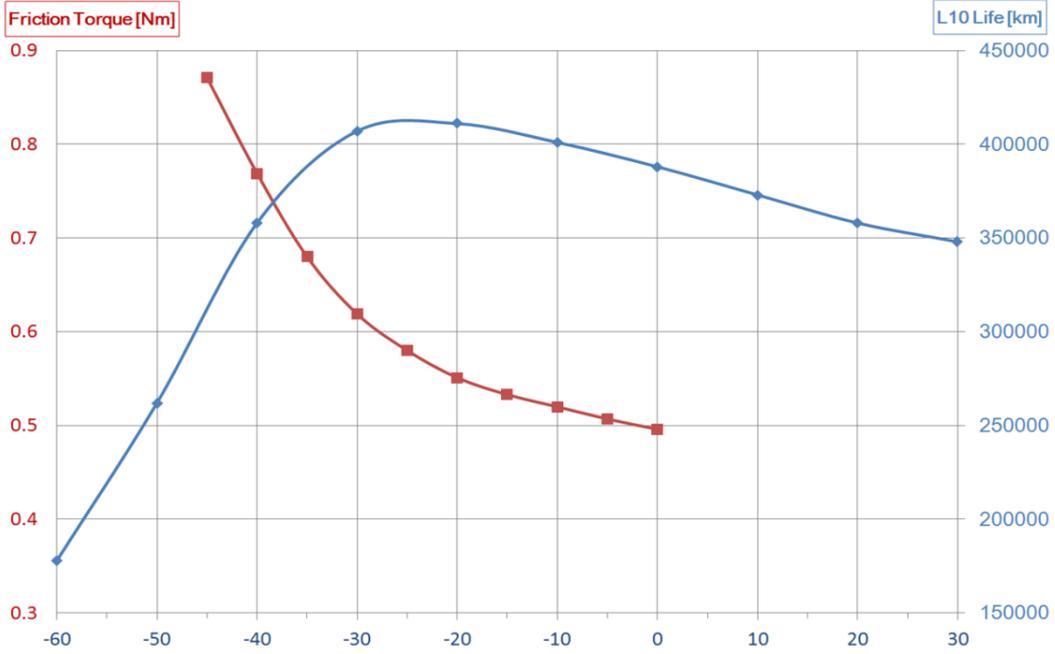
- [1] Green Belt Training Six Sigma *SKF*, April, 2008.
- [2] QT 1 MSA *SKF*, Dec, 2009.
- [3] QT 5 MSA *SKF*, April, 2012.
- [4] Costruzioni di macchine *R. Giovannozzi*, Pàtron Editore, terza edizione.
- [5] it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0
- [6] www.skf.com/it/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/application-of-bearings/bearing-preload/index.html
- [7] evolution.skf.com/it/la-strada-per-leccellenza/
- [8] www.skf.com/it/our-company/skf-italia/le-nostre-sedi/i-siti-produttivi/airasca-skf-industrie.htm
- [9] www.skf.com/it/our-company/organization/skf-history/index.html
- [10] www.skf.com/it/our-company/index.html
- [11] it.wikipedia.org/wiki/Metodo_di_Karl_Fischer
- [12] <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html>
- [13] https://it.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_del_simpleso
- [14] https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_di_Nelder-Mead
- [15] http://www.scholarpedia.org/article/Nelder-Mead_algorithm
- [16] <http://www.skf.com/group/products/seals/engineering-services/test-and-analysis/index.html>



OGGETTO

**Work Instruction:
Automatic procedure for PCA**

DATA: 27-02-2018



Work Instruction: Automatic procedure for PCA

DATA: 27-02-2018

Pag. 1/7

1. Perform the Master curve:

-Select a type of bearing;

-Open : Desktop> PCA> dati> BARbase.xlsx and create a copy with the name of the tested bearing

-Copy the reference curve in the sheet Assembly(1) (fig.1)

- Measure on the test rig the structure stiffness (using the OR) and copy the curve in the sheet Assembly(2) (fig.2)

-Measure on the test rig the bearing stiffness (using a bearing with clearance) and copy the curve in the sheet Assembly(3) (fig.3)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Force [N]	Displacement [µm]			REFERENCE				
2	0								
3	0								
4	0								
5	0								
6	0								
7	0								
8	0								
9	0								
10	0								
11	0								
12	0								
13	0								
14	0								
15	0								
16	0								
17	0								
18	0								
19	0								
20	0								
21	0								
22	0								
23	0								
24	0								

fig. 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Force [N]	Displacement [µm]			Structure Stiffness							
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												

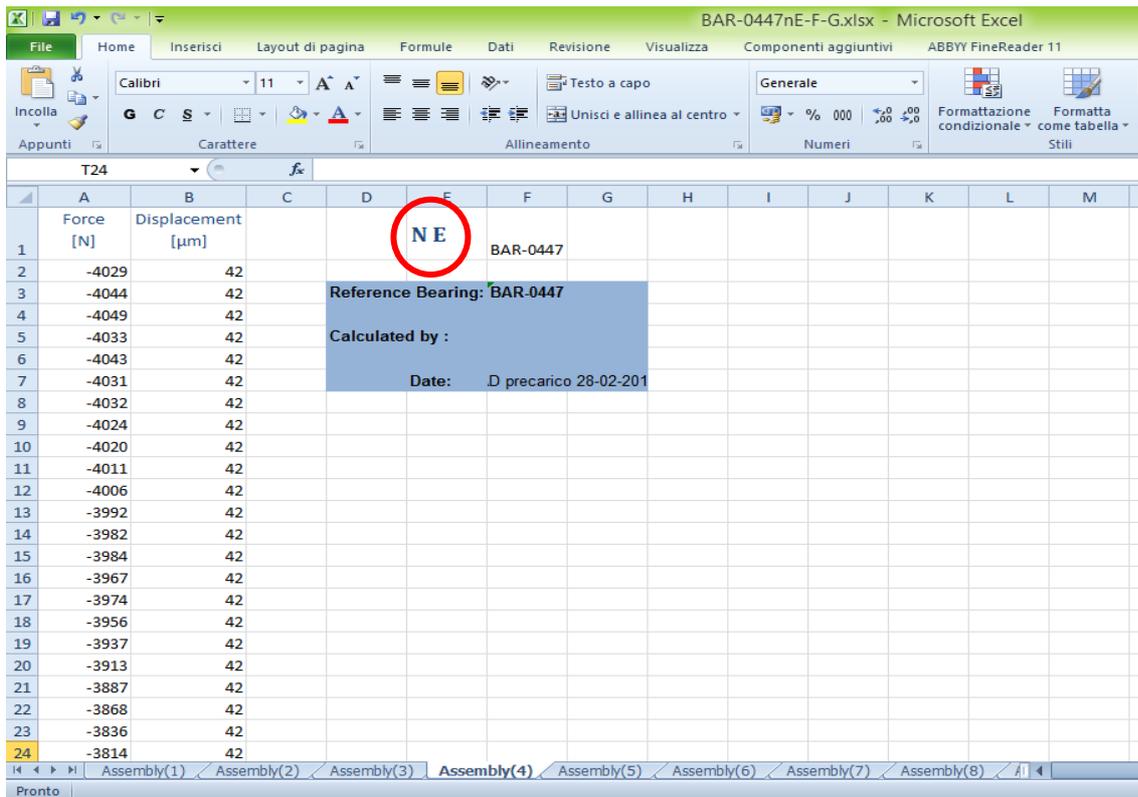
fig. 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Force [N]	Displacement [µm]			Bearing Stiffness							
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												

fig. 3

2. Perform the preload/clearance evaluation:

- Select the same type of bearing and measure it on the test rig;
- Open the same file Excel ;
- Copy the measurement curves in the sheets from **Assembly(4)** (fig.4).
- Write in the cell E-1 the number of the bearing (fig.4, red circle).
- If there are many samples to be measured, repeat the same operation and copy the curves in the sheet **Assembly (5), Assembly (6)**...



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Force [N]	Displacement [µm]			NE	BAR-0447							
2	-4029	42											
3	-4044	42											
4	-4049	42											
5	-4033	42											
6	-4043	42											
7	-4031	42											
8	-4032	42											
9	-4024	42											
10	-4020	42											
11	-4011	42											
12	-4006	42											
13	-3992	42											
14	-3982	42											
15	-3984	42											
16	-3967	42											
17	-3974	42											
18	-3956	42											
19	-3937	42											
20	-3913	42											
21	-3887	42											
22	-3868	42											
23	-3836	42											
24	-3814	42											

fig. 4

3. Begin the measurement:

- Open: Desktop > PCA > PCA.exe ;
- The GUI interface will be opened (fig.5);

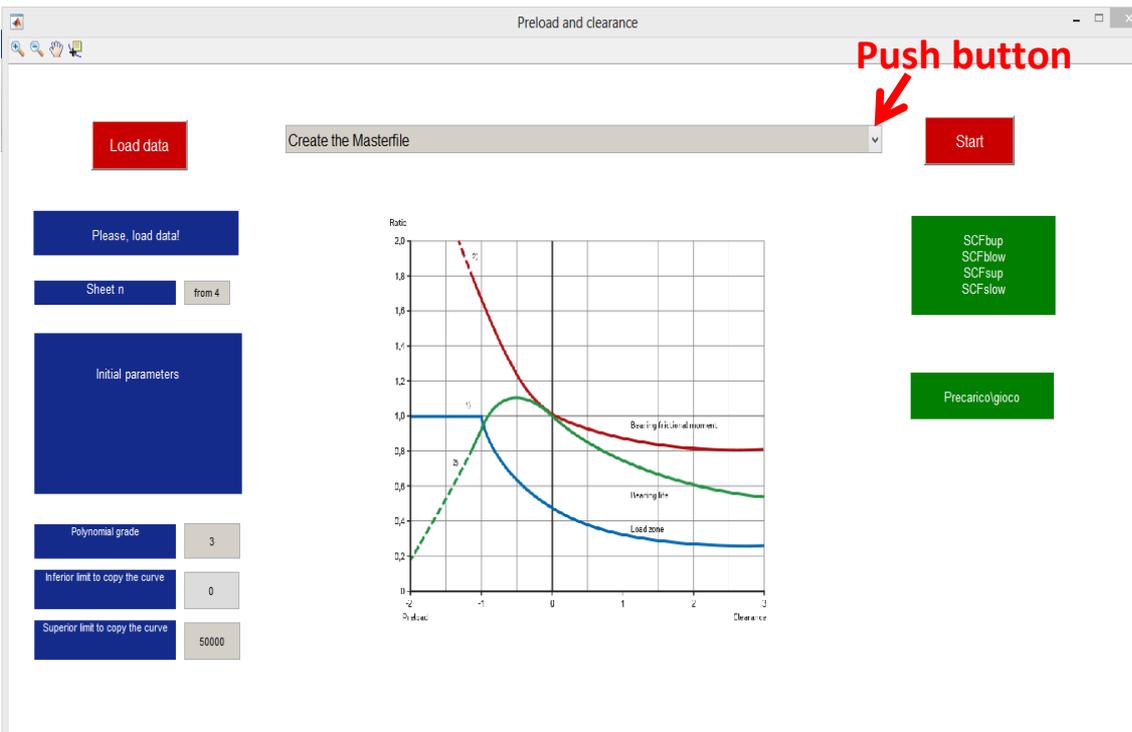
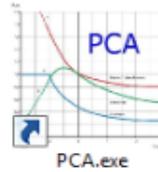


fig.5

4. Create the Masterfile

-Click on Load Data (fig.5) and select the Excel file (fig.6);

- Click on Start (in the push button must be the option: "Create the Masterfile").

-An image will show the creation of the master and the SCF values. The image will be automatically saved on the PC in the results folder (fig.7).

-The SCF value will appear on the GUI interface in the right green box (fig.8 green arrow).

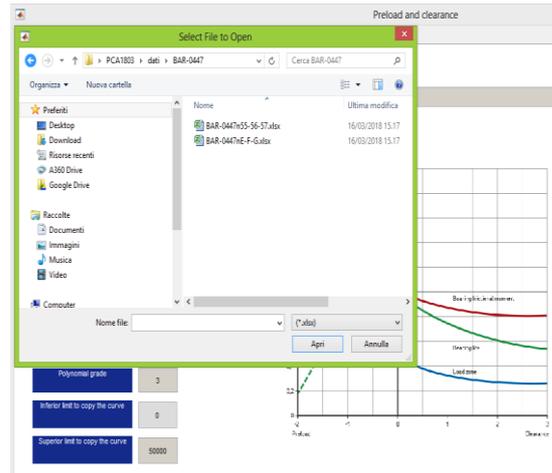


fig. 6

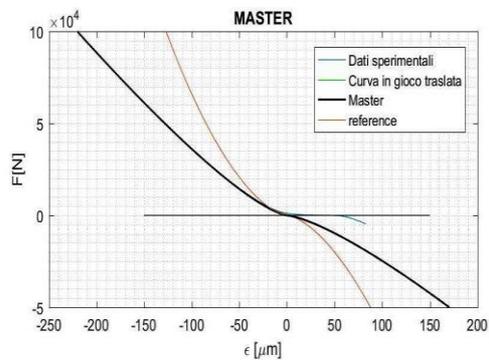
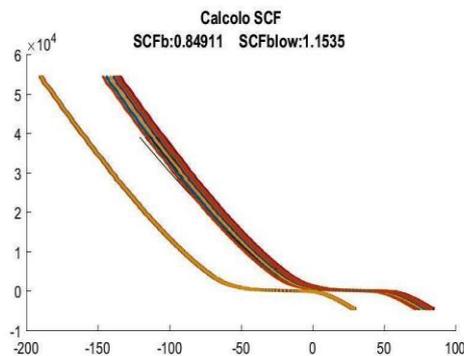
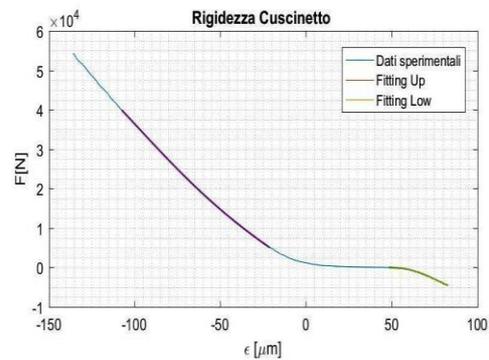
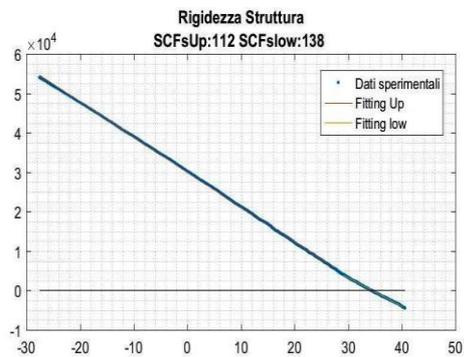


fig. 7

5. Load the preload parameters:

-Select on the push button "Load preload/clearance parameters " and then click on "Start".

-Some parameters will appear on the blue boxes. It's possible to change them if it's necessary (fig.8, red arrows).

It's possible to change the fitting polynomial grade of the measurement curve

It's possible to change the lower limit to cut the measurement curve

It's possible to change the upper limit to cut the measurement curve

fig. 8

6. Evaluate the preload/clearance:

-Choose the sheet number of the measurement curve. The first curve is on the Assembly(4), so the numbering starts from 4. You have to insert the number of the Assembly (fig.9).

-Select on the push button "Evaluate the preload/clearance" and then click on "Start". An image will show the automatic translation to evaluate the preload/clearance). The image will be automatically saved on the PC in the results folder (fig.10).

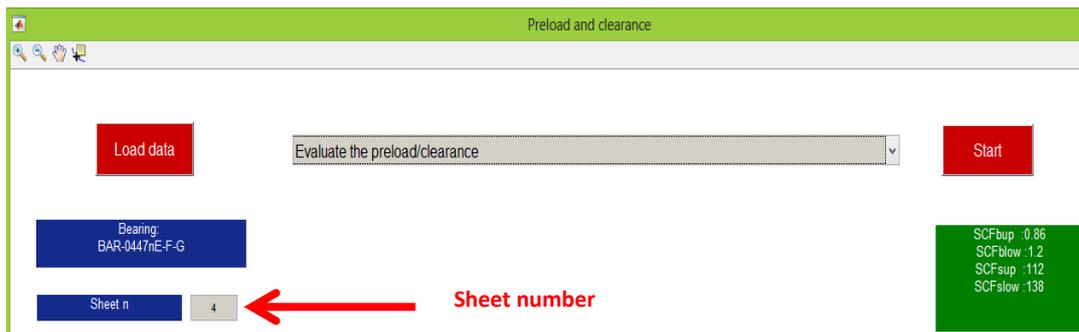


fig. 9

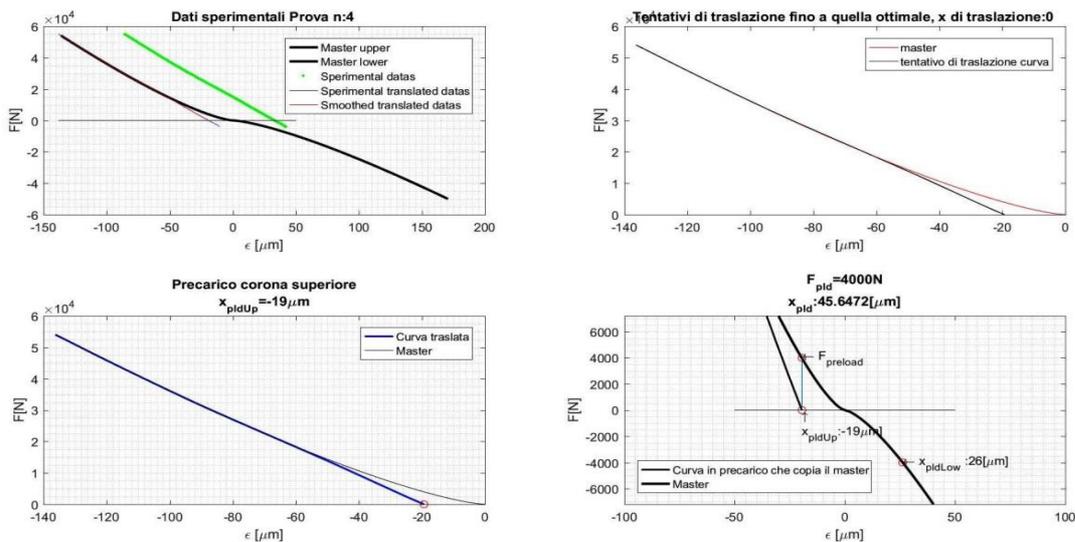


fig. 10

-The preload value will appear on the GUI interface in the green box under the SCF values (fig.11, green arrow);

7. Create the final graph:

-Select on the push button "Final preload/clearance graph" and then click on "Start" (fig.11).

8. Evaluate other preload/clearance values:

-To evaluate other preload/clearance values for an other bearing of the same type it's necessary only to change the sheet number, without create the masterfile again (the curve must be in the same Excel file).

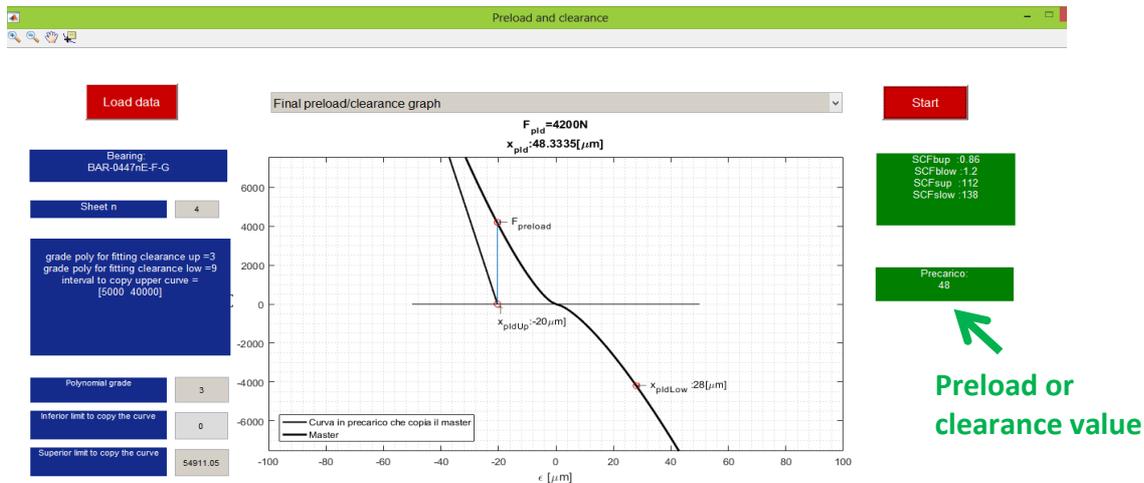


fig. 11