

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Influenza dei difetti nei corpi volventi per cuscinetti su rumore e vibrazioni



Tutor:

Ing. Raffaella Sesana
Prof. Eugenio Brusa

Candidate:

Helia Ghasemi

Anno Accademico 2019/2020

Abstract

I cuscinetti svolgono un ruolo fondamentale nelle macchine rotanti e lo scopo di questo studio è la valutazione dell'impatto delle caratteristiche della sfera sulle prestazioni vibrazionali del cuscinetto attraverso la tecnica di Design of Experiment (DoE). Applicando il DoE per lo studio delle prestazioni vibrazionali del cuscinetto e isolando il sistema sulle caratteristiche geometriche e fisiche della sfera, è possibile individuare le caratteristiche critiche della sfera che hanno maggior impatto su rumore/vibrazioni e comprendere il modo in cui esse interagiscono reciprocamente.

L'utilizzo del metodo sperimentale DoE in maniera correttamente pianificata e controllata ci permette di minimizzare il numero di prove (tempo, costo, uomo/macchina) e di ottimizzare il processo di analisi.

In particolare, in questo progetto vengono considerate alcune caratteristiche geometriche e fisiche delle sfere in acciaio 100Cr6 come ingresso, per verificare il loro impatto sulla rumorosità e sulle vibrazioni delle sfere e quindi sulla rumorosità del cuscinetto.

Le vibrazioni vengono misurate tramite un banco prova vibrazioni per cuscinetti (MGG11-MC500 Noise testing system).

INDICE

Abstract	2
Introduzione	5
Capitolo 1 - I cuscinetti	6
1.1 Definizione di cuscinetto	6
1.2 Cuscinetti a rotolamento o volventi e classificazione	6
1.3 Cuscinetti a sfere	7
1.4 Danneggiamento dei cuscinetti volventi	8
Capitolo 2 - Design of Experiment (DoE) e analisi della variabilità	9
2.1 Design of Experiment (DoE)	9
2.1.1 Formulazione del problema	10
2.1.2 Scelta del disegno sperimentale	10
2.1.3 Acquisizione, analisi dei dati e definizione del modello	5
2.2 Le tecniche del DoE	11
2.2.1 Piani Fattoriali	11
2.2.2 Superfici di Risposta	11
2.2.3 Mixture	12
2.2.4 Metodo di Taguchi	12
Capitolo 3 - Preparazione delle prove sperimentali e scelta dei fattori	13
3.1 Geometria (Ovalità-VDws)	13
3.1.1. Rotondimetro	14
3.2 Dispersione dimensionale (VDwl)	15
3.2.1 Comparatore	15
3.3 Deformazione plastica localizzata	16
3.3.1 Interferometro	17
3.4 Graffi	18
3.4.1 Rugosimetro	19
3.4.1.1 Rugosità Ra	20
3.4.1.2 Rugosità Rz	20
3.4.1.3 Rugosità Rt	21
Capitolo 4 - Definizione e misura del rumore e delle vibrazioni	22
4.1 Vibrazioni	22
4.1.1 Il rumore della pista	22
4.1.2 Il rumore della gabbia	23

4.1.3 Il rumore dell'elemento volvente	23
4.1.4 Il rumore dovuto ad handling (movimentazione)	23
4.1.4 Flaw noise	23
4.1.5 Rumore degli schermi e dei lubrificanti	24
4.2 Misura delle vibrazioni e rumore	24
4.2.1 Difetto sulla gabbia	25
4.2.2 Difetto sull'anello interno	25
4.2.3 Difetto sull'anello esterno	26
4.2.4 Difetto sull'elemento volvente	26
4.3 Acquisizione sperimentale delle vibrazioni	26
4.3.1 Macchina di analisi vibrazionale	26
4.3.2 Sensore SG4	27
Capitolo 5 - Esecuzione delle prove e analisi dei risultati	28
5.1 Campioni e numerosità	28
5.2 Analisi dei risultati	30
5.2.1 Definizione del modello di regressione multipla	30
5.2.2 Verifica dell'errore del modello	31
5.2.3 Risultati finali	34
5.2.4 Report di previsione e ottimizzazione	38
Conclusioni	41
References	42

Introduzione

Il lavoro di tesi è stato svolto presso la compagnia Tsubaki Nakashima Co., Ltd., azienda multinazionale di produzione e vendita di componenti per cuscinetti.

In particolare tale progetto è stato svolto presso il Global Product Development Center, situato nella sede italiana di Pinerolo, specializzata nella produzione di sfere in acciaio di alta qualità, le quali sono un elemento fondamentale dei cuscinetti.

Il cuscinetto rappresenta una delle parti essenziali delle macchine rotanti e viene utilizzato per diminuire l'attrito tra due oggetti che si muovono in moto rotatorio o lineare l'uno rispetto all'altro.

Se i cuscinetti subissero dei guasti durante il servizio, i danni arrecati alla macchina potrebbero essere molto seri.

Anche se i cuscinetti sono geometricamente perfetti, essi generano delle vibrazioni quando sono sottoposti a carichi radiali e/o assiali: ciò è dovuto al fatto che i corpi volventi per sostenere il carico sono in numero finito [1].

Durante la rotazione del cuscinetto si genera una variazione della rigidità totale dello stesso dovuta alla variazione del numero di corpi volventi e della loro posizione nella zona del carico. Essa a sua volta fa sì che ci sia un cambiamento nelle vibrazioni del cuscinetto che prende il nome di variazione delle vibrazioni di conformità [2].

I cuscinetti volventi, oggetto di questa tesi, sono costituiti da una corona di sfere e consentono di sopportare entrambe le tipologie di carico (assiale e radiale). Con il loro movimento, i cuscinetti contribuiscono alla vibrazione della macchina di cui essi fanno parte [3]. Questa vibrazione viene poi amplificata a seguito della presenza di difetti (distribuiti o locali) nel cuscinetto.

I difetti distribuiti, che includono rugosità superficiale, ovalità e dispersione dimensionale, sono provocati generalmente da errori nel processo di fabbricazione, da un montaggio non corretto e dall'usura abrasiva [4,5]. I difetti locali, invece, includono fessure, deformazioni e graffi sulle superfici rotolanti.

Il guasto maggiormente presente nei cuscinetti volventi è rappresentato dalla scheggiatura delle piste o degli elementi rotolanti. Essa si verifica quando una cricca originatasi al di sotto della superficie del metallo, si propaga per fatica verso la superficie stessa e provoca il distacco di un pezzo di metallo lasciando così una piccola fossa (*pitting*) o scheggia [6].

Lo scopo di questo lavoro di tesi è l'analisi della predizione dell'ampiezza di vibrazione dovuta alla presenza del difetto sulla superficie della sfera e alle caratteristiche geometriche della sfera stessa.

In letteratura sono stati condotti numerosi studi, sia sperimentali che numerici per individuare le caratteristiche della sfera che maggiormente impattano il rumore e le vibrazioni del cuscinetto.

L'analisi predittiva della vibrazione delle sfere è stata effettuata attraverso il metodo sperimentale del Design of Experiment, progettato ed elaborato tramite il software Minitab.

Capitolo 1 - I cuscinetti

1.1 Definizione di cuscinetto

Il cuscinetto è un dispositivo atto a ridurre l'attrito tra due sistemi in moto rotatorio o lineare tra di loro.

I cuscinetti possono essere suddivisi in due categorie: ad attrito radente (noti come bronzine) e ad attrito volvente. Nei primi, tra la superficie dell'albero e del cuscinetto esiste un contatto di strisciamento (contatto diretto o mediato dalla presenza di un velo di lubrificante). In quelli ad attrito volvente, che vengono chiamati cuscinetti a rotolamento, si ha la presenza di corpi volventi (sfere, rulli e rullini) tra l'albero e la sede: ciò permette di ridurre l'attrito trasformandolo da radente in volvente.

Nei successivi paragrafi verranno descritte le varie tipologie di cuscinetti volventi, che sono quelli oggetto del presente lavoro di tesi.

1.2 Cuscinetti a rotolamento

I cuscinetti volventi permettono di trasformare l'attrito radente tra albero e supporto in attrito volvente, molto inferiore al primo, con una lubrificazione minore di circa dieci volte. Gli elementi fondamentali di un cuscinetto a rotolamento sono i due anelli, uno interno, montato sull'albero, ed uno esterno, montato nel supporto (o perno) e i corpi volventi interposti tra i 2 anelli. I corpi volventi (sfere, rulli e rullini) rotolano all'interno di piste tra i 2 anelli e sono tenuti insieme ad una certa distanza gli uni rispetto agli altri mediante una cosiddetta gabbia distanziatrice.

La forma dei corpi volventi identifica la tipologia di cuscinetto volvente: si hanno pertanto cuscinetti a sfere, a rulli conici, a rulli a botte e a rullini.

Inoltre, in base al numero di corone di corpi volventi, i cuscinetti possono essere ad una o a due corone di sfere o rulli (*Figura 1.1*).



Figura 1.1: Cuscinetto a due corone di sfere

I cuscinetti possono essere classificati anche sulla base della direzione del carico che devono sopportare. Si distinguono quindi i cuscinetti radiali (o portanti), assiali (o reggispinta) e misti (o obliqui) a seconda che essi permettano di sopportare delle forze perpendicolari all'asse di rotazione, parallele all'asse o entrambe.

Si hanno infine i cuscinetti rigidi se gli assi degli anelli coincidono tra di loro e quelli orientabili se i due assi possono orientarsi tra loro in posizioni diverse, mantenendo fisso un punto comune detto centro del cuscinetto.

1.3 Cuscinetti a sfere

I cuscinetti rigidi a sfere (*Figura 1.2*) sono in grado di sopportare un carico radiale e un leggero carico assiale, possono essere a una o due corone di sfere e possono operare anche a velocità elevate. Il cuscinetto a sfere tipicamente non è scomponibile ed è munito di schermi protettivi progettati per impedire l'ingresso di detriti che potrebbero danneggiare le gole. Tali schermi possono essere non a tenuta stagna (lasciano una luce radiale e sono in acciaio) o a tenuta stagna (non lasciano una luce radiale e sono in gomma).

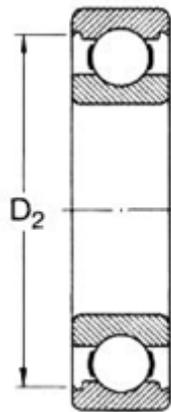


Figura 1.2: Cuscinetto radiale rigido a una corona

I cuscinetti orientabili a sfere (*Figura 1.3*) sono muniti sempre di due corone di sfere e sono utilizzati quando è richiesta un'elevata rotazione tra gli anelli. L'anello interno è formato da due piste mentre quello esterno ha una sola pista sferica e possiede dei fori di lubrificazione. Anche questi cuscinetti non sono scomponibili e possono anche essere realizzati a tenuta stagna.

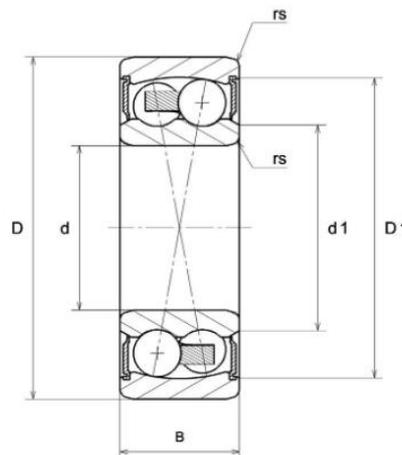


Figura 1.3: Cuscinetto radiale orientabile

Infine, i cuscinetti obliqui a sfere (*Figura 1.4*) hanno le piste degli anelli interni ed esterni spostate l'una rispetto all'altra nella direzione dell'asse del cuscinetto ed il contatto tra sfere e piste avviene per costruzione lungo un asse obliquo rispetto all'asse del cuscinetto. Tali cuscinetti sono stati progettati per sopportare carichi combinati (radiali ed assiali) che agiscono contemporaneamente. Maggiore è l'angolo tra la linea che congiunge i punti di contatto fra sfera e piste e la perpendicolare all'asse del cuscinetto, tanto più alta sarà la loro capacità di carico assiale. Essi sono scomponibili e possono essere ad una o due corone di sfere.

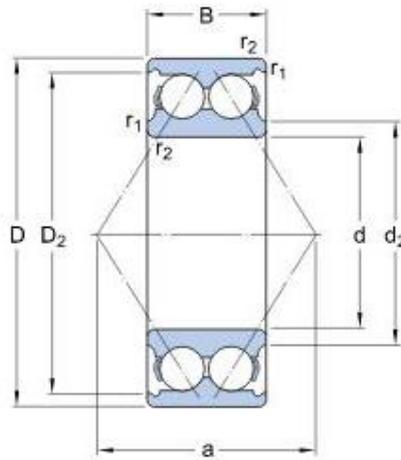


Figura 1.4: Cuscinetto obliquo a due corone di sfere

1.4 Danneggiamento dei cuscinetti volventi

I cuscinetti volventi sono dei componenti meccanici utilizzati in moltissime applicazioni, mantengono inalterata la propria affidabilità anche in condizioni estreme e solo raramente presentano difetti precoci.

Una corsa irregolare, un'accuratezza di funzionamento ridotta e un rumore diverso da quello standard sono dei comportamenti anomali che evidenziano in prima battuta un danno del cuscinetto volvente.

In generale, un guasto dei cuscinetti provoca l'incremento del livello complessivo della vibrazione. Per comprendere a cosa sia dovuto il danno è necessario ispezionare non solo i cuscinetti stessi, ma anche i componenti circostanti, le condizioni di lavoro, i fattori ambientali e la presenza di un'adeguata lubrificazione. La presenza di un difetto provoca un comportamento peggiore del cuscinetto durante l'esercizio, ma è raro che i danni "spontanei", causati ad esempio da errori di montaggio o mancanza di lubrificante, determinano un'inutilizzabilità immediata.

I guasti dei cuscinetti possono essere suddivisi in:

- GUASTI CICLICI: difetti localizzati che creano vibrazioni cicliche.
- GUASTI NON CICLICI: difetti non localizzati.

In questo studio sono considerati solo difetti dell'elemento volvente e gli altri elementi del cuscinetto sono considerati privi di difetti.

Capitolo2 - Design of Experiment (DoE) e analisi della variabilità

2.1 Design of Experiment (DoE)

I cuscinetti volventi a sfera, durante il loro esercizio, devono rispettare dei limiti di rumorosità severi in molte applicazioni, tra cui lavatrici, alternatori delle auto e condizionatori dell'aria.

In questo lavoro di tesi viene applicata la tecnica del Design of Experiment per studiare l'effetto di alcune caratteristiche fisiche e geometriche delle sfere sulla vibrazione del cuscinetto stesso.

Il Design of Experiment (DoE) è stato inventato nel 1920 dallo scienziato inglese R. A. Fisher come metodo avente l'obiettivo di massimizzare le informazioni derivanti dai dati sperimentali. Tale metodo si è sviluppato nei successivi 70 anni, ma dal momento che molti aspetti si sono rilevati eccessivamente complessi dal punto di vista matematico, era utilizzato esclusivamente dagli specialisti in materia.

La recente diffusione del DoE è associata agli studi di Taguchi [7], che si focalizzò sull'uso pratico anziché sulla teoria matematica di questa tecnica.

Quando in una serie di prove sperimentali si fanno variare in modo prestabilito delle variabili di ingresso (dette fattori) per osservare le variazioni della variabile in uscita (detta risposta), si parla di esperimento programmato.

Il Design of Experiment (Programmazione degli Esperimenti) viene utilizzato per migliorare le prestazioni di un processo oppure per far sì che un processo diventi meno sensibile alle fonti esterne di variabilità e, di conseguenza, più robusto.

Il DoE permette quindi di individuare i parametri maggiormente influenti sulla risposta di un sistema e capire in che modo variare tali parametri per ottimizzare la risposta e ridurre la sua variabilità. In tale metodo vengono quindi condotte una serie di prove sperimentali in cui si variano gli ingressi in modo da osservare le ripercussioni sulla risposta del sistema con l'obiettivo di migliorare il processo.

Inoltre il metodo del DoE può essere molto utile per identificare le variabili di ingresso che hanno una maggiore influenza sulla risposta del sistema.

In questo modo è possibile rispettare in modo più accurato le specifiche di progetto, aumentare i volumi di produzione e ridurre sia i tempi che i costi per lo sviluppo di un processo.

Il DoE assume un ruolo importante nelle attività di progetto, quando si sviluppano dei nuovi prodotti o si migliorano quelli già esistenti.

In *Figura 2.1* è possibile osservare le fasi principali del metodo del DoE che verranno descritte nei successivi paragrafi.

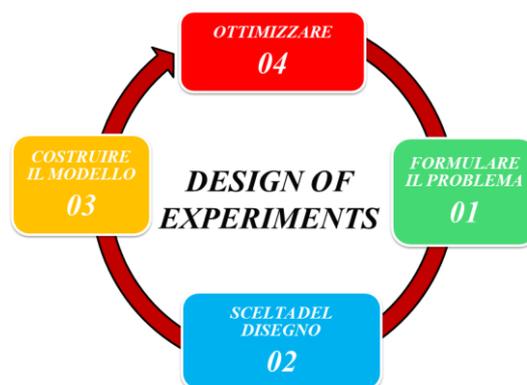


Figura 2.1: Fasi principali di un DoE

2.1.1 Formulazione del problema

Il DoE inizia con la definizione del problema. In tale fase bisogna definire una serie di grandezze elencate di seguito:

- *Risposte*: esse rappresentano le caratteristiche del sistema che si desidera ottimizzare. Per poter analizzare i risultati è necessario che tali grandezze abbiano un valore numerico (variabili quantitative).
- *Fattori (variabili indipendenti)*: variabili sperimentali che hanno influenza sulle risposte e che vengono fatte variare ad ogni esperimento. E' di fondamentale importanza la scelta delle variabili in quanto un numero elevato comporta un aumento eccessivo delle prove sperimentali richieste mentre un numero basso rischia di rendere vano l'intero studio nel caso in cui le variabili scartate dall'analisi fossero molto influenti sulle risposte del sistema. Possono essere considerati come fattori sia variabili quantitative che qualitative.
- *Livelli*: rappresentano i valori che ogni fattore può assumere. Tipicamente viene effettuata una normalizzazione dei fattori in modo che ciascuno viene fatto variare nell'intervallo tra -1 e +1 mentre lo zero rappresenta il punto centrale.
- *Dominio sperimentale*: rappresenta l'area sperimentale oggetto di investigazione, definita dagli intervalli in cui sono fatte variare le variabili sperimentali.

2.1.2 Scelta del disegno sperimentale

La fase successiva di un DoE è la scelta del disegno più opportuno per il problema oggetto di studio. Per descrivere il sistema viene associato un modello matematico al disegno scelto.

- *Modello*: equazione matematica che relaziona i fattori con le risposte.
Per poter scegliere un modello matematico adatto al disegno è di fondamentale importanza la definizione dell'obiettivo, ossia dello scopo di una sperimentazione. Se, infatti, è necessario estrarre solamente dei dati dal processo, verrà adottato un modello matematico semplice; se invece occorre ricercare delle condizioni sperimentali ottimali, allora bisognerà descrivere in modo accurato il sistema utilizzando un'equazione più flessibile, di grado superiore.

I disegni sperimentali si dividono in 3 categorie:

- *Screening*: è ideale per studiare un nuovo processo. Quando non è possibile sapere in anticipo quali, fra i diversi fattori, possa avere effetto sulla risposta, si cerca di fare uno screening dei fattori più influenti: in questo caso si possono gestire un numero elevato di fattori, compreso tra 5 e 12.
- *Ottimizzazione*: tale disegno richiede una maggiore conoscenza del sistema e, di conseguenza, un'equazione più elastica (con termini di secondo grado) per poter modellare in maniera efficace la superficie di risposta. In tal caso vengono utilizzati dai 3 ai 5 livelli.
- *Miscela*: i disegni di miscela permettono di studiare delle variabili non intrinsecamente indipendenti; in tal caso le variabili devono essere espresse in percentuali.

2.1.3 Acquisizione, analisi dei dati e definizione del modello

Dopo aver individuato il disegno sperimentale più adatto allo studio che si desidera affrontare si passa all'esecuzione delle prove stabilite (terza fase del DoE). Dopodiché viene effettuata l'analisi dei dati utilizzando degli algoritmi di regressione a cui viene fornita la matrice sperimentale insieme ai valori della variabile di risposta.

Per poter capire se il modello è valido o meno è utile rappresentare graficamente i valori della risposta ottenuti dal modello stesso insieme ai valori reali. Se i valori modellati differiscono molto da quelli reali (elevati valori di residuo) oppure hanno degli andamenti particolari è possibile che sia stato commesso qualche errore o trascurato qualche effetto. In tale fase è possibile quindi costruire la superficie di risposta, visualizzare in maniera grafica la condizione di ottimo e valutare la stabilità.

L'ultima fase del DoE è rappresentata dall'ottimizzazione nella quale si ottimizza il proprio processo e, inoltre, si possono trasformare le nuove conoscenze in processi più innovativi per il futuro.

2.2 Le tecniche del DoE

Le tecniche più utilizzate nella pianificazione sperimentale sono [8]:

- Piani Fattoriali
- Mixture
- Metodo di Taguchi

2.2.1 Piani Fattoriali

Gli esperimenti fattoriali sono un particolare tipo di esperimenti in cui ciascuno dei fattori viene considerato a due o più livelli. È uno dei metodi più utilizzati in quanto:

- Danno la possibilità di verificare tanti fattori e diminuiscono il numero delle prove;
- Sono piani esplorativi molto utili;
- Sono particolarmente adatti al frazionamento, alla suddivisione in blocchi.

I piani fattoriali sono una serie di prove con cui si raccolgono i dati sulla variabile risposta, in cui i livelli di un fattore controllabile o le combinazioni di livelli di due o più fattori, vengono cambiati in base al cambiamento definito dal progetto sperimentale. Tra i vantaggi di questa tecnica si può considerare:

- Ogni prova di un esperimento fattoriale eroga informazioni su tutti fattori considerati, permettendo un risparmio di risorse e di tempo;
- Gli effetti combinati di due o più fattori possono essere analizzati solo modificando contemporaneamente due o più fattori;
- I cambiamenti contemporanei di tanti fattori tratti da un esperimento fattoriale sono adattabili ad una varietà molto grande di condizioni.

2.2.2 Superfici di Risposta

Il metodo delle Superfici di Risposta (*Response Surface*) consiste in un insieme di tecniche matematiche e statistiche che vengono utilizzate quando la risposta è influenzata da un certo numero di variabili di ingresso e l'obiettivo è di ottimizzare tale risposta. Tale metodologia consente quindi di capire in che modo un insieme di variabili di ingresso influenza la risposta. In particolare gli effetti dei vari fattori sulla risposta del sistema vengono determinati mediante la cosiddetta analisi della regressione, nella quale viene utilizzato un certo modello che consente, una volta raccolti i dati sperimentali, di quantificare la relazione tra la risposta e i fattori.

La metodologia del *Response Surface* viene applicata prima, durante e dopo che si è effettuata l'analisi della regressione sui dati. Prima dell'analisi è necessario andare a pianificare l'esperimento, scegliere le variabili di ingresso e anche i valori da utilizzare durante il test sperimentale; dopo l'analisi della regressione devono essere applicate le tecniche di ottimizzazione.

In molti casi non si conosce la relazione tra le variabili indipendenti e la risposta del sistema: per questo è necessario prima di tutto trovare una funzione che sia in grado di approssimare a livello locale tale relazione. Se la relazione tra la risposta e le variabili indipendenti viene modellata bene attraverso una funzione lineare, allora la funzione di approssimazione è del primo ordine; se invece la funzione non è lineare, dovrà essere utilizzata un'equazione di grado più alto (es: modello del secondo ordine). I modelli polinomiali, naturalmente, non riescono ad approssimare la relazione tra la risposta e le variabili indipendenti nell'intero spazio di quest'ultime, ma ad ogni modo essi funzionano abbastanza bene per una regione relativamente piccola.

Se la superficie di risposta approssima in modo adeguato la funzione di risposta reale, allora l'analisi di tale superficie sarà approssimativamente equivalente all'analisi del sistema reale.

2.2.3 Mixture

La metodologia del DoE rappresenta un modo efficiente di ottimizzazione dei processi. Tipicamente si utilizzano nella tecnica del DoE dei modelli fattoriali a due livelli, ma nei casi in cui la risposta dipende dalle proporzioni degli ingredienti, come ad esempio nelle formulazioni chimiche o alimentari, tali modelli possono perdere di significato.

Quindi nel caso delle formulazioni, dove sono fondamentali solamente le proporzioni e non la quantità, i disegni fattoriali non funzionano: in tal caso è necessario ottimizzare la formulazione attraverso un *Mixture design*, che considera la dipendenza della variabile dipendente (risposta) dalla proporzionalità degli ingredienti.

2.2.4 Metodo di Taguchi

Il metodo di Taguchi consente di indagare su un largo numero di parametri, con l'applicazione di appropriate metodologie statistiche, per ottenere valutazioni importanti sul comportamento del sistema con un minimo numero di prove sperimentali. Inoltre tale metodo consente di ricercare miglioramenti continui della qualità dei prodotti e dei processi: attraverso il DoE si possono individuare i fattori che più influenzano la qualità e le prestazioni dei prodotti stessi, selezionare dei valori ottimizzati e rendere il comportamento di questi prodotti più robusto rispetto alle variabili esterne ed incontrollabili.

Capitolo 3 - Preparazione delle prove sperimentali e scelta dei fattori

In questo capitolo verrà spiegato come sono state preparate le prove e come sono stati scelti i “fattori”, ossia i parametri influenti sulle vibrazioni e quindi sulla rumorosità del cuscinetto.

La vibrazione e rumorosità di un cuscinetto a elementi rotanti dipendono da numerosi parametri di insieme (qualità del montaggio, lubrificante, carichi statici e dinamici, durezza del materiale, geometria delle sfere, caratteristiche superficiali della sfera, ecc.).

Durante questo studio si considerano alcune caratteristiche della sfera che sono riproducibili in maniera indipendente. Tutte le restanti caratteristiche non considerate nelle prove sono considerati costanti. In particolare i parametri esaminati sono:

- Geometria (Ovalità -VDws)
- Dispersione dimensionale (VDwl)
- Deformazione plastica localizzata
- Graffio

3.1 Geometria (Ovalità-VDws)

In tale progetto si effettua una valutazione geometrica del profilo della sfera attraverso la scomposizione in armoniche (serie di Fourier). L'ovalità della sfera (VDws) rappresenta la differenza tra il diametro della più piccola circonferenza circoscritta e quello della più grossa circonferenza inscritta al profilo misurato.

In questo progetto sono considerate le sfere di due gradi di qualità (G3, G5) (Tabella 3.1) definite dalla normativa ISO 3290 (descritta nel Capitolo 5).

Tipo di Sfera	VDws [μm]
G3	0.05
G5	0.012

Tabella 3.1: Campioni di due gradi di qualità

Lo strumento utilizzato per misurare il parametro VDws è il rotondimetro MHA 160 prodotto da SKF Steyr. È un macchinario appositamente pensato per i cuscinetti ed i suoi componenti. (Figura 3.1). La misura è ottenuta tramite il comparatore con precisione 0,01 μm (Figura 3.2).

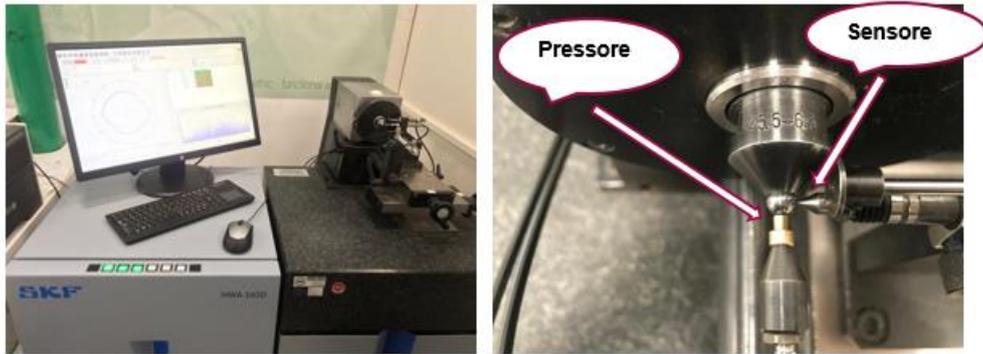


Figura 3.1: Rotondimetro SKF

In Figura 3.2 è rappresentato il rilievo del profilo con scala amplificata per due sfere appartenenti alla categoria G3 e G5.

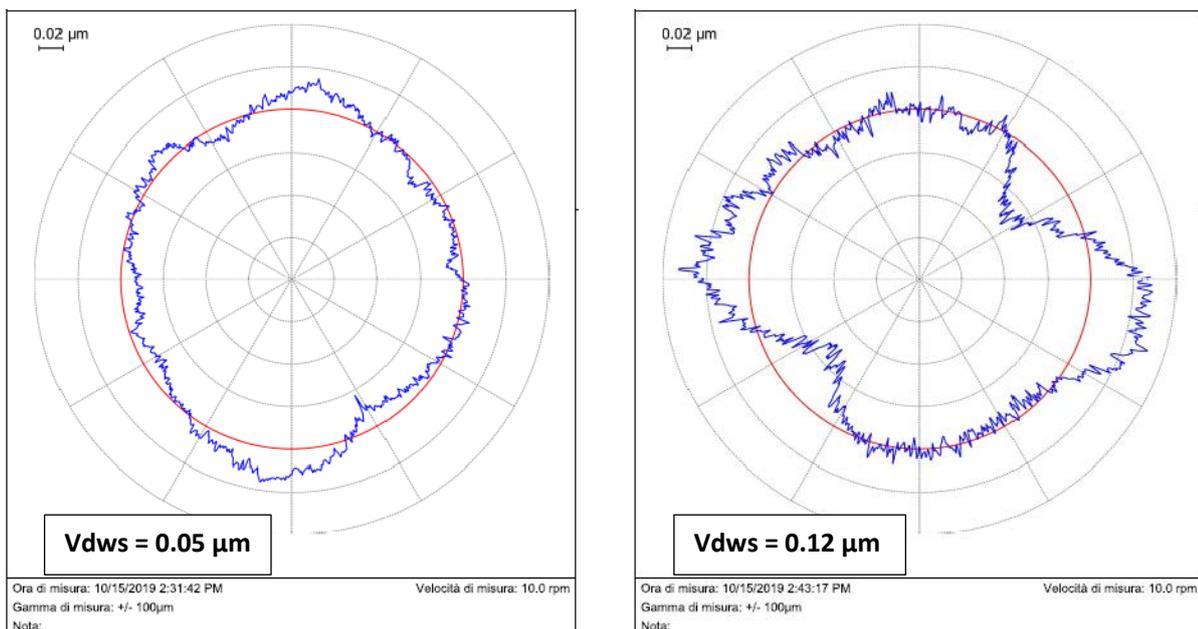


Figura 3.2: Rilievo del profilo della sfera

3.1.1. Rotondimetro

Utilizzando un rotondimetro si possono misurare con semplicità le caratteristiche di un componente assialsimetrico.

I risultati delle misurazioni effettuate tramite rotondimetro sono basati sulla normativa ISO 3290-1.

ISO 3290-1 è una specifica dei requisiti per sfere in acciaio finite per cuscinetti volventi. In tale norma i parametri definiti sono:

- Diametro nominale della sfera (D_w) → valore del diametro che viene utilizzato per l'identificazione generale di una dimensione della sfera.
- Diametro medio della sfera (D_{wm}) → media aritmetica tra il diametro della più piccola circonferenza circoscritta e quello della più grande circonferenza inscritta al profilo misurato.
- Diametro medio di un lotto di sfere (D_{wml}) → media aritmetica dei diametri medi della sfera più grande e più piccola di un campione di sfere, ossia una quantità definita di sfere fabbricate in condizioni presunte uniformi che viene considerata come un'entità.

- Gauge di sfera (S): quantità di cui il diametro medio del lotto di sfere dovrebbe differire dal diametro nominale della sfera.
- V_{Dws} → la differenza tra il diametro della più piccola circonferenza circoscritta e quello della più grande circonferenza inscritta al profilo misurato.

3.2 Dispersione dimensionale (VDwl)

La dispersione dimensionale è la differenza diametrale tra la sfera più grande e quella più piccola all'interno del campione. In questo studio vengono misurate tutte le sfere utilizzate nei test le quali sono divise in gruppi dimensionali ampi $0.05 \mu\text{m}$ ed in seguito sono assemblate nel cuscinetto prelevandole dallo stesso gruppo o da gruppi diversi in modo tale da creare tre lotti di sfere. Il lotto 1 è caratterizzato da sfere appartenenti allo stesso gruppo, per cui la variazione massima del diametro medio è $0.05 \mu\text{m}$. I lotti 2 e 3 invece sono caratterizzati da sfere appartenenti a gruppi diversi in modo che la variazione massima del diametro medio fosse $0.175 \mu\text{m}$ in un caso e $0.300 \mu\text{m}$ nell'altro caso (*Tabella 3.2*).

Lotto 1 [μm]	Lotto 2 [μm]	Lotto 3 [μm]
0.050	0.175	0.300

Tabella 3.2: Classificazione delle sfere in base alla dispersione dimensionale

3.2.1 Comparatore

Il comparatore (*Figura 3.3*) è uno strumento di misura utilizzato per misure di spostamento lineare. Esso basa il suo funzionamento sulla lettura dello spostamento di un'asta cilindrica mobile che scorre all'interno di una guida tubolare. L'estremità dell'asta (chiamata tastatore o palpatore) è a contatto con la superficie dell'oggetto sottoposto a misura. Una molla spinge costantemente l'asta verso l'esterno del corpo del comparatore, assicurando così che il tastatore sia in contatto con l'oggetto di misura. Quando la superficie si sposta nella direzione dell'asse dell'asta (avvicinandosi o allontanandosi), anche quest'ultima si muove.

Un sistema di lettura amplifica e visualizza questo spostamento rendendo disponibile la misura.



Figura 3.3: Comparatore

3.3 Deformazione plastica localizzata

La deformazione plastica localizzata è un difetto dovuto all'urto sfera contro sfera che accade solitamente durante il processo di produzione. In questo studio le deformazioni plastiche localizzate sono realizzate tramite l'urto sfera-sfera a energia controllata con altezza variabile utilizzando lo strumento per gli urti ad energia controllata (*Figura 3.4*).



Figura 3.4: Strumento per urti ad energia controllata

Le deformazioni sono misurate con interferometro laser che in questo studio è di marca Trioptics. È un strumento μ Phase 1000 con una risoluzione di 1000×1000 px e la sensibilità dello strumento è dell'ordine del nm. Le deformazioni plastiche localizzate sono definite in tre livelli in base alla profondità di deformazione (*Tabella 3.3*).

Livello	Altezza di caduta [mm]	Profondità di deformazione [μ m]
1	-	Non rivelabile
2	700	< 0.3
3	1000	0.3 ÷ 0.6

Tabella 3.3: Tre livelli di profondità di deformazione

In *Figura 3.5* sono riportati alcuni risultati ottenuti a valle della misurazione effettuata mediante interferometro:

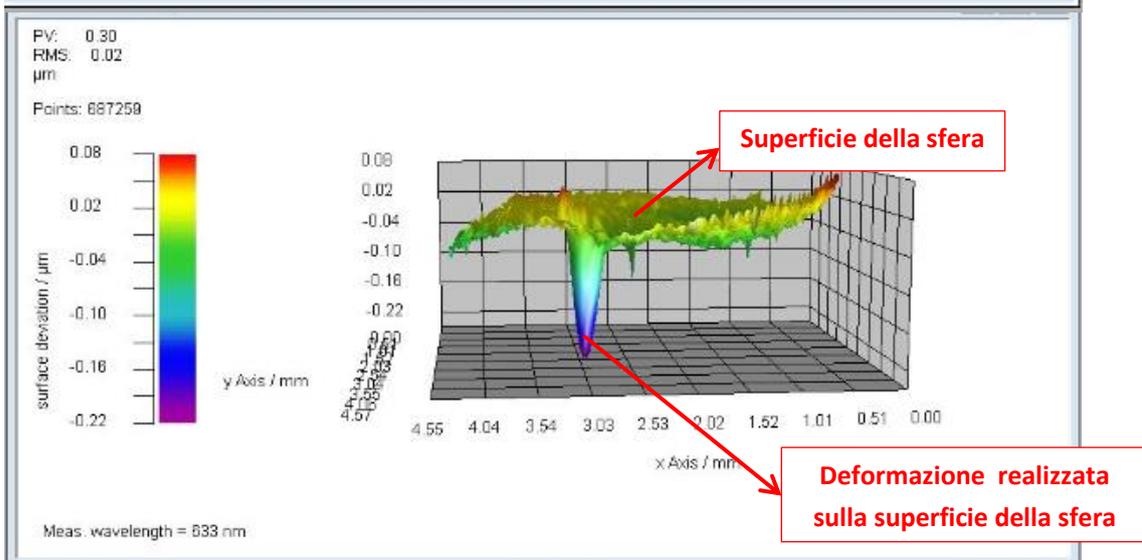
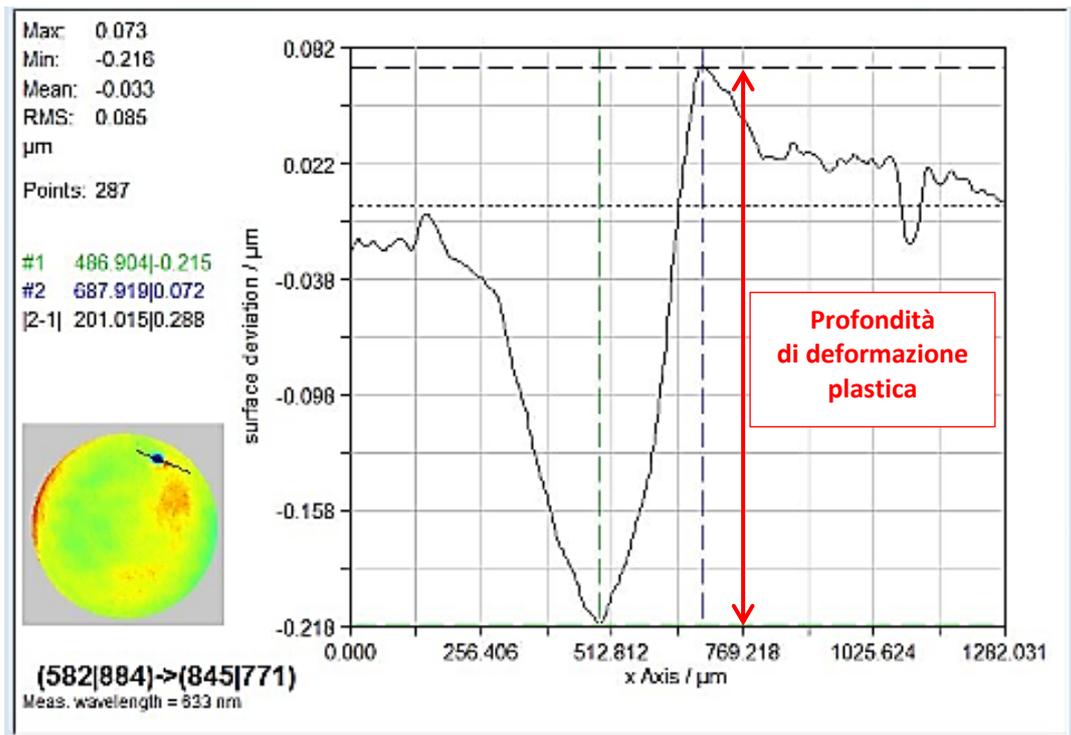


Figura 3.5: Profondità di deformazione plastica (livello 2)

Nelle misure effettuate viene presa in considerazione solamente la profondità di deformazione, calcolata come differenza tra picco più alto e valle più profonda sulla superficie della sfera e non l'estensione superficiale di deformazione.

3.3.1 Interferometro

L'interferometro è una parte dell'ottica fisica che si occupa dello studio dei fenomeni interferenziali della luce e delle loro applicazioni a scopo sia tecnico industriale. In particolare l'interferometro ottico, strumento utilizzato in questo studio (Figura 3.6), è uno strumento modulare adatto a dar luogo ad un sistema osservabile di frange per interferenza di onde luminose provenienti da una medesima sorgente di luce e percorrenti cammini ottici diversi, in accordo con la teoria ondulatoria della luce. La tecnica strumentalizza la coerenza della luce sorgente al fine di creare un dispositivo fotosensibile e ottenere dunque informazioni sull'obiettivo in esame, quali velocità, distanza, vibrazioni e direzione di

moto. Oggi l'interferometria rappresenta uno dei più importanti metodi per realizzare misure di alta precisione in molti ambiti industriali e di ricerca [9,10].

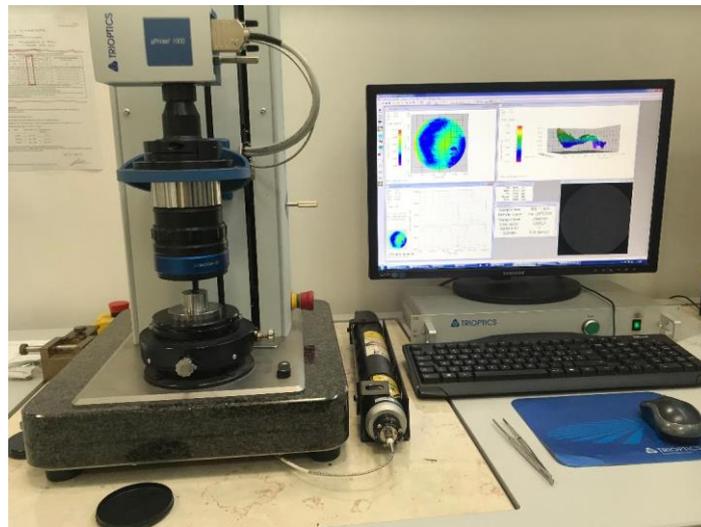


Figura 3.6: Interferometro

3.4 Graffio

Nelle superfici reali il contatto avviene tramite le asperità inevitabilmente presenti sulla superficie dei corpi con la conseguenza che l'effettiva area di contatto è minore di quella nominale. Nel caso di problemi di contatto di superfici reali non è pertanto possibile non tenere in conto degli effetti della rugosità superficiale. Così facendo infatti si potrebbero valutare pressioni di contatto minori di quelle effettive e pertanto sottostimare il rischio di danneggiamenti e fastidio di vibrazioni e rumorosità.

Nel caso in esame i graffi (*Figura 3.7*) sono realizzati manualmente con la lima, controllati mediante microscopio e misurati con rugosimetro.

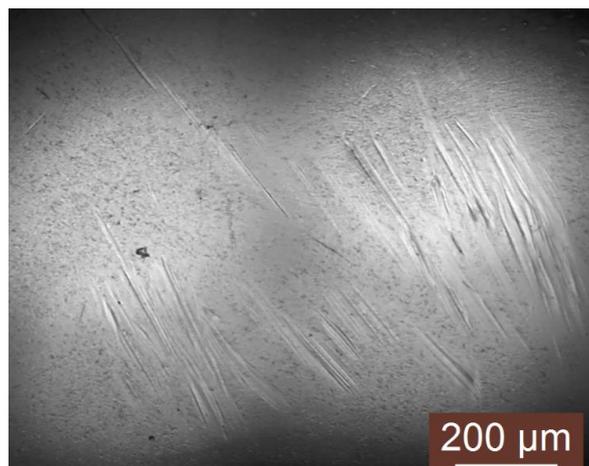


Figura 3.7: Graffio osservato mediante microscopio

I graffi sono considerati sulla base della loro profondità e non dell'estensione superficiale e vengono misurati mediante rugosimetro. In particolare, il rugosimetro utilizzato in questo studio acquisisce una lunghezza di 0.6 mm ed elabora i

calcoli scartando le code di 0.1 mm (per cui la lunghezza finale elaborata è di 0.4 mm). Sulla base di ciò essi sono classificati in tre livelli (Tabella 3.4):

Livello	R_t [μm]
1	0.1 ÷ 0.39 (senza graffio)
2	0.4 ÷ 0.59
3	0.6 ÷ 0.9

Tabella 3.4: Tre livelli di R_t

Dove R_t è la distanza tra la linea tangente al picco più alto e quella tangente alla valle più profonda.

3.4.1 Rugosimetro

Di solito la superficie degli oggetti reali non è perfetta, ma presenta delle irregolarità microgeometriche. Tali irregolarità possono essere casuali, oppure avere degli andamenti preferenziali (molto frequente in pezzi sottoposti a lavorazioni alle macchine utensili). La rugosità si misura immaginando di sezionare la superficie secondo un piano, detto piano di rilievo, ortogonale alla superficie stessa. Il profilo reale è la linea risultante dall'intersezione della superficie reale con il piano di rilievo. La misura della rugosità si realizza tramite uno strumento chiamato rugosimetro (Figura 3.8).



Figura 3.8: Rugosimetro

Il rugosimetro funziona in maniera analoga alla puntina da grammofono, segnando irregolarità della superficie. Si ottiene un profilo del tipo mostrato in Figura 3.9.

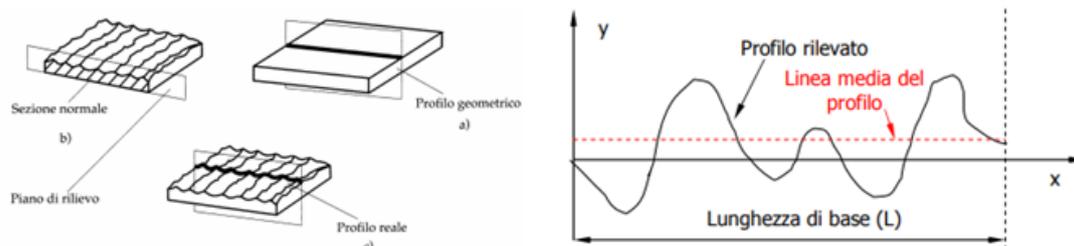


Figura 3.9: Profilo superficiale

A partire dal profilo misurato è opportuno trarre certi parametri sintetici che caratterizzino il profilo. Anzitutto le coordinate del profilo rilevato sono riferite ad uno zero dello strumento che è poco significativo. Occorre riportarle ad un sistema di riferimento indipendente dallo strumento. Perciò si definisce la linea media del profilo come la linea per la quale è minima la somma delle distanze al quadrato dei punti del profilo dalla linea stessa.

3.4.1.1 Rugosità R_a

Considerando come asse X_m la linea media del profilo, si definisce il parametro di rugosità R_a (rugosità media) come il valore medio (espresso in μm) delle ordinate (y_1, y_2, \dots, y_n) del profilo rispetto alla sua linea media. Nel dominio continuo si ha quindi la seguente definizione:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx$$

Nel dominio discreto si ha che:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

La rugosità R_a provvede un valore di finitura superficiale medio che non è in grado di prevedere il tipo di rugosità. Per esempio pochi picchi elevati potrebbero sortire lo stesso effetto di molti picchi più bassi. Preticamente il rugosimetro provvede un valore di R_a calcolato su una lunghezza maggiore della lunghezza di base che è la media dei valori calcolati su più lunghezze di base.

3.4.1.2 Rugosità R_z

La distanza tra due linee parallele alla linea media passanti mediamente fra i cinque picchi più alti e le cinque valli più basse è R_z (Figura 3.10). Supponendo che le ordinate dei cinque picchi più elevati siano ($y_{p1}, y_{p2}, y_{p3}, y_{p4}, y_{p5}$), e che le ordinate delle cinque valli più profonde siano ($y_{v1}, y_{v2}, y_{v3}, y_{v4}, y_{v5}$), sempre con riferimento alla linea media, si ha:

$$R_z = \frac{(y_{p1} + y_{p2} + \dots + y_{pn}) - (y_{v1} + y_{v2} + \dots + y_{vn})}{5}$$

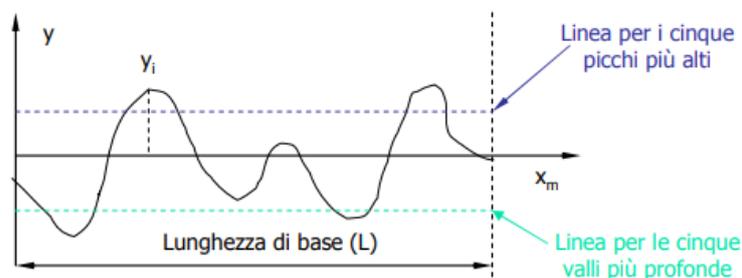


Figura 3.10: R_z

La rugosità R_z prevede una misura dell'irregolarità massima mediata su cinque picchi e cinque valli.

3.4.1.3 Rugosità R_t

La rugosità R_t (Figura 3.11), invece, è la distanza tra due linee, parallele alla linea media, tangenti al picco più alto ed alla valle più profonda. Dette $y_{p,max}$, $y_{v,min}$, rispettivamente, le ordinate del picco più alto e della valle più profonda si ha:

$$R_t = (y_{p,max} - y_{v,min})$$

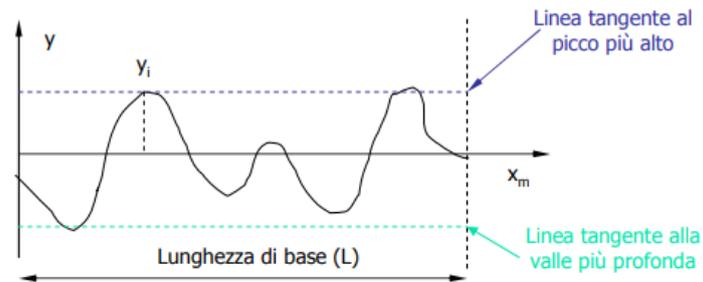


Figura 3.11: R_t

La rugosità R_t prevede una misura dell'irregolarità massima del profilo.

Capitolo 4 - Definizione e misura del rumore e delle vibrazioni

4.1 Vibrazioni

Il rumore del cuscinetto generato durante la sua rotazione è un'attività molto importante nella produzione di cuscinetti radiali a sfere di medie e piccole dimensioni. Negli ultimi anni tanti diversi strumenti sia on-line che off-line sono stati utilizzati in ambito di produzione per comprendere i diversi motivi che causano vibrazioni/rumorosità nel cuscinetto, con lo scopo di permettere ai tecnici di sviluppare azioni per migliorare il processo di produzione dei cuscinetti e minimizzare la loro rumorosità [11,12,13,14,15,16].

Le vibrazioni e il rumore nei cuscinetti possono essere classificati in quattro categorie:

- Strutturale
- Di produzione
- Di movimentazione
- altro

Il rumore della pista, il rumore stridente e quello della gabbia si trovano nella categoria della vibrazione strutturale, che può essere continua o intermittente. Invece, il rumore causato dalle imperfezioni geometriche dell'anello interno ed esterno dei cuscinetti e quello dei corpi volventi (le sfere) sono collegati alla vibrazione di produzione. La vibrazione di movimentazione è collegata ai difetti locali e ai fenomeni di contaminazione che producono di solito rumore irregolare. Infine ci sono altri tipi di vibrazione dovuti al lubrificante.

Il processo di produzione ha un ruolo molto importante nelle vibrazioni e rumorosità dei cuscinetti. Nella maggior parte dei casi, quando il cuscinetto è rumoroso, si verifica una vibrazione e viceversa. L'incapacità degli umani nel sentire la vibrazione è condizionata dalla frequenza. Le vibrazioni sono problemi a bassa frequenza mentre quelli ad alta frequenza sono problemi di rumore. 1000 Hz è un confine arbitrario per separare i problemi di rumore e di vibrazione. In realtà le frequenze al di sotto dei 1000Hz sono considerati problemi di vibrazione mentre quelle al di sopra di 1000 Hz sono problemi di rumore.

Il rumore della pista è un rumore continuo e regolare ed è un metodo per definire la qualità del cuscinetto.

Le sue caratteristiche fondamentali sono le seguenti:

- La frequenza del rumore è indipendente dalla velocità di rotazione;
- Aumentando la velocità, il rumore diventa più forte;
- Diminuendo il gioco radiale, il rumore aumenta;
- Maggiore è la rigidità dell'alloggiamento, minore è l'ampiezza del rumore.

4.1.1 Il rumore della pista

Il rumore della pista è causato dall'ondulazione della superficie dei componenti del cuscinetto; tale ondulazione è evitabile utilizzando delle tecnologie di lavorazione avanzate per lavorare le superfici delle piste e la superficie degli elementi volventi. Durante il funzionamento del cuscinetto il contatto tra gli anelli e gli elementi volventi si comporta come una molla che ondeggia con debole ampiezza. La vibrazione della cosiddetta molla applica una forza di eccitazione sugli anelli e tale forza crea le vibrazioni e rumori della pista.

Questo tipo di rumore cosiddetto “*click*” si trova nei cuscinetti relativamente grandi, caricati radialmente con bassa velocità. Nei cuscinetti sottoposti a carico radiale, esiste una zona con e senza carico in cui l’anello interno non viene toccato dagli elementi volventi a causa della forza centrifuga dovuta alla rotazione, perciò gli elementi volventi vengono spinti contro l’anello esterno. Quando la forza centrifuga è più bassa della gravità, gli elementi volventi cadono e si scontrano con la gabbia e/o con l’anello interno ed il risultato di questo incontro crea il rumore di click.

Un altro tipo di rumore è il rumore stridente che è un suono dovuto allo strisciamento di due parti in metallo. È più comune in cuscinetti relativamente grandi sottoposti a carico radiale ed è dovuto all’attrito tra l’anello esterno e i corpi volventi, ma non è molto chiaro se il contatto avviene nella zona di carico o no.

Le sue caratteristiche sono riportate di seguito:

- La sua creazione è imprevedibile;
- Si crea quando il gioco radiale è grande;
- Si verifica in un certo intervallo di velocità che tende a diminuire, aumentando le dimensioni del cuscinetto;
- Si ripete spesso a basse temperature;
- Migliora principalmente utilizzando il grasso come lubrificante, e raramente olio.

4.1.2 Il rumore della gabbia

L’impatto della gabbia con i corpi volventi e con gli anelli creano il rumore della gabbia. La sua ampiezza non è elevata e può essere generata in qualsiasi tipo di cuscinetto. Diminuendo l’errore di montaggio può essere ridotto. Le sue caratteristiche sono:

- Si ripete spesso in cuscinetti sottoposti a carico radiale con grandi dimensioni;
- Migliora utilizzando sia grasso che olio come lubrificante;
- Si crea se una coppia viene applicata all’anello esterno del cuscinetto;
- Si verifica con vari tipi di gabbia (in acciaio, gabbie lavorate e di plastica).

4.1.3 Il rumore dell’elemento volvente

Il rumore dell’elemento volvente è un problema comune per i cuscinetti sottoposti a carichi radiali. Il centro dell’albero diventa eccentrico sia verticalmente che orizzontalmente quando si manifesta tale tipo di vibrazione. Il gioco radiale, carico radiale e il numero dei corpi volventi hanno effetto sull’ampiezza di questo tipo di vibrazione.

4.1.4 Il rumore dovuto a movimentazione (*handling*)

La superficie degli elementi volventi e degli anelli è decisamente dura, con valore di durezza superiore a 60 HRC. Se il cuscinetto prende un corpo o viene fatto cadere, si creano le ammaccature e i bolli sulle superfici dei componenti del cuscinetto. Per di più una minima contaminazione di elementi estranei può portare il cuscinetto ad essere rumoroso. Questo è il cosiddetto rumore di *handling*.

4.1.4 Flaw noise

Con la rotazione del cuscinetto, in presenza di ruggine o graffio o ammaccatura sulla superficie delle piste, gli elementi volventi colpiscono il difetto e creano il rumore che è chiamato *flaw noise* o picco. Tale rumore ha una frequenza uguale

alla frequenza della pista. Il livello dell'intero spettro di frequenza aumenta quando viene prodotto un picco. Non è sufficiente neanche la trasformata di Fourier [17] per riuscirle a discriminare da altri rumori.

4.1.5 Rumore degli schermi e dei lubrificanti

L'attrito tra il labbro degli schermi e la sede degli anelli in cui si verifica il loro movimento relativo genera il rumore degli schermi. Invece, il rumore dei lubrificanti si genera quando le bolle di lubrificante vengono schiacciate tra le piste e gli elementi volventi.

Infine, il rumore di eccentricità, legato ad esempio ad un albero eccentrico, è caratterizzato da una frequenza di vibrazione pari a quella di rotazione. La vibrazione è un'oscillazione meccanica con movimento circolare rispetto ad un punto d'equilibrio. Ci sono due tipi di oscillazioni: la prima periodica come ad esempio il movimento di un pendolo e la seconda casuale come il moto di una gomma su una strada asfaltata. L'Hertz è la loro unità di misura e corrisponde ad un numero di ripetizioni in un secondo [18,19,20].

4.2 Misura delle vibrazioni e rumore

Si considera un cuscinetto semplice a sfere per la determinazione delle frequenze. Lo strisciamento tra le piste e le sfere non viene considerato.

I due parametri fondamentali che influenzano la frequenza con cui si ripetono gli urti sono:

1. La velocità con cui gli anelli ruotano
2. Il numero dei corpi volventi

La quota di strisciamento è un fattore molto importante dell'analisi del cuscinetto, perché non permette di affermare che il corpo volvente torni sul difetto generato sulla pista dell'anello in maniera periodica. Lo strisciamento è un componente indipendente dalla velocità di rotazione.

Il segnale prodotto dal difetto non può essere stimato come periodico, variando la quota % di strisciamento, ad ogni giro di rivoluzione. Questa variazione della quota di strisciamento è bassa e quindi il segnale è definibile come "ciclo stazionario". Il segnale dovuto al difetto sul cuscinetto non è periodico, perciò il segnale viene eliminato usando la teoria della media sincrona [21, 22] che è una teoria molto attendibile nell'analisi degli ingranaggi.

La zona di contatto tra le sfere e la pista avviene lungo una linea inclinata dell'angolo di contatto β rispetto al piano perpendicolare all'asse di rotazione. Questo contatto è dovuto alle spinte assiali o al gioco (Figura 4.1).

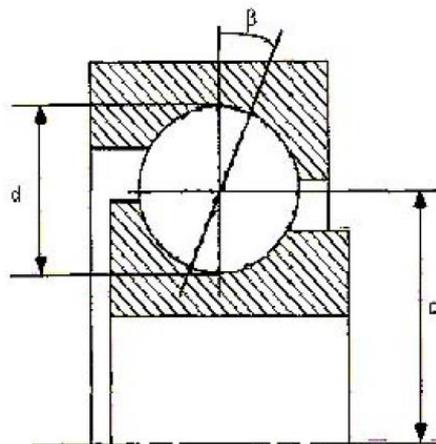


Figura 4.1: Schema del cuscinetto

La relazione è ricavata dall'analisi geometrica caratteristica del contatto sfera – piste degli anelli.

$$\cos\beta = 1 - \frac{g_r}{4 \times (r_a - r)}$$

Dove:

- r è il raggio delle sfere
- g_r è il gioco
- r_a è il raggio dell'arco di cerchio che costituisce il profilo delle piste degli anelli

Ci sono delle deformazioni, sia dell'elemento volvente che della pista del cuscinetto, che influiscono sul valore dell'angolo di contatto aumentandolo all'aumentare delle deformazioni, che in questa relazione non vengono considerati. Le deformazioni creano espressioni che ci permettono di provocare la presenza di difetto sull'anello esterno, interno, sulle sfere e sulla gabbia, utilizzando le sigle BPFi (*Ball Passing Frequency* i), usate in diagnostica.

4.2.1 Difetto sulla gabbia

Gli impulsi transitori vengono prodotti a frequenze che sono funzione della velocità di rotazione del cuscinetto e della geometria e sono dipendenti dalle frequenze caratteristiche del cuscinetto [10].

La vibrazione del cuscinetto con difetto sulla gabbia può essere misurata a diverse frequenze caratteristiche del difetto (FTF, *Train or cage frequency*). Di seguito la relazione per calcolare tali frequenze:

$$FTF = \frac{f_s}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right]$$

Dove:

- d è il diametro della singola sfera [mm];
- D è il diametro medio del cuscinetto, anche detto diametro di *pitch* [mm];
- α è l'angolo di contatto [rad];
- f_s è la frequenza di rotazione dell'albero $\rightarrow f_s = \frac{1}{2\pi} (\Omega)$
- Ω è la velocità di rotazione dell'albero [rad/s]

4.2.2 Difetto sull'anello interno

Quando un corpo volvente passa su un difetto che si trova sulla pista interna di un cuscinetto, genera un urto che produce una vibrazione ad una frequenza caratteristica (BPFI, *Ball Pass Frequency Inner race*), che si può valutare con la relazione:

$$BPFI = \frac{z \times f_s}{2} \left[1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right]$$

dove z indica il numero di corpi volventi del cuscinetto.

4.2.3 Difetto sull'anello esterno

La frequenza caratteristica (BPFO, *Ball Pass Frequency Outer race*) è la frequenza con cui si segna il passaggio dell'elemento volvente sul difetto della pista esterna, che si può stimare con la formula:

$$BPFO = \frac{z \times f_s}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right]$$

4.2.4 Difetto sull'elemento volvente

L'elemento volvente realizza un movimento di rivoluzione attorno all'asse dell'albero e un moto attorno al proprio asse, durante la rotazione del cuscinetto. Nel campo della rotazione del cuscinetto, il difetto sulla sfera incontra una volta l'anello interno e una volta l'anello esterno. La frequenza ricondotta a questo fenomeno (BSF, *Ball Spin Frequency*) [19], si valuta con la formula:

$$BSF = \frac{D \times f_s}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right]$$

4.3 Acquisizione sperimentale delle vibrazioni

Lo scopo della prova acustica è evitare la distribuzione o l'ulteriore assemblaggio del cuscinetto volvente con un comportamento indesiderato.

Gli strumenti utilizzati nelle prove di rumore si riferiscono a tipi specifici e dovrebbero essere selezionati e utilizzati su questa base. È molto importante utilizzare gli strumenti adatti, in caso si usassero gli strumenti sbagliati e/o non adatti, si acquisiscono i risultati sbagliati.

4.3.1 Macchina di analisi vibrazionale

La macchina utilizzata per la misura delle vibrazioni del cuscinetto (*Figura 4.2*) è una macchina costruita da Schaeffler, azienda privata tedesca produttrice di cuscinetti volventi per i settore industriali, automotive e aerospaziale. Tale macchina consente di misurare manualmente le vibrazioni dei cuscinetti applicando un carico assiale a velocità costante (MGG11-MC500 *Noise testing system*). Tale apparecchiatura di misura del rumore comprende l'hardware di misura MC500 compatibile con software Windows.

Durante la prova, l'anello interno del cuscinetto è solidale con un albero che è molto silenzioso e gira a velocità costante di 1800 giri/min mentre all'anello esterno viene applicata una forza assiale scelta in base alla tipologia del cuscinetto (nel caso in esame il carico applicato è di 100 N). Infine un sensore di velocità è posizionato al di sopra del cuscinetto. Nel caso oggetto di studio il sensore di velocità è un sensore SG4 il quale viene solitamente impiegato per le prove manuali. Esistono anche altri hardware come il dispositivo MC 3002 dotati di sensore ICP il quale viene solitamente impiegato per le prove in automatico.

I segnali delle vibrazioni, espressi in $\mu\text{m/s}$, vengono acquisiti e filtrati mediante l'utilizzo di un computer collegato alla macchina di vibrazione.

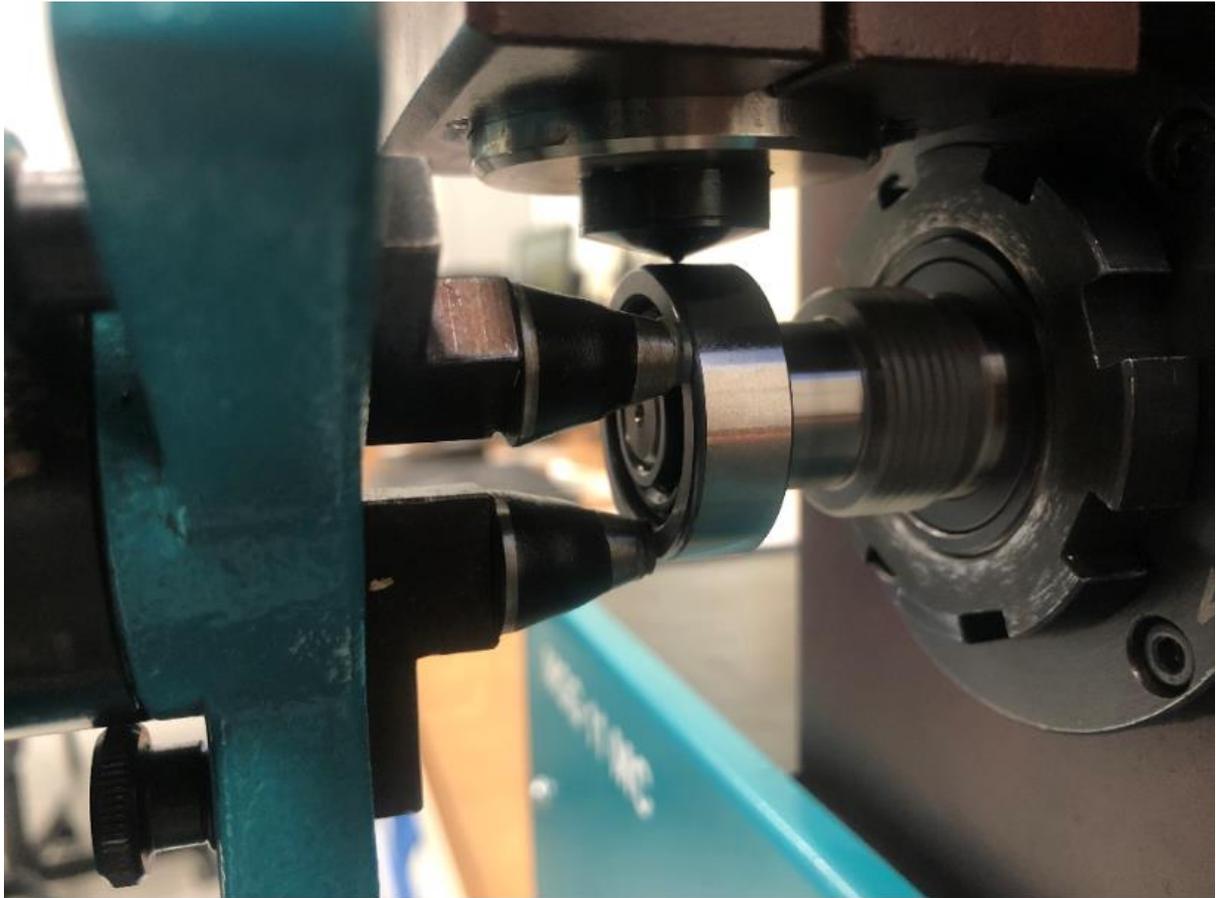


Figura 4.2: Macchina di analisi vibrazionale (MGG11-MC500 Noise testing system)

4.3.2 Sensore SG4

Il sensore SG4 è un sensore induttivo per la misurazione della velocità ed, in particolare, è un sensore piezoelettrico con un segnale elettrico direttamente proporzionale alla velocità ed espresso in $\mu\text{m/s}$, con un range di sensibilità da 0 Hz a 20 Hz. I sensori induttivi [23] per la misurazione della posizione e della velocità sono disponibili in forme, dimensioni e tecnologie alquanto diverse. I sensori induttivi sono basati sul principio di funzionamento del trasformatore e su un fenomeno fisico imperniato sulle correnti elettriche alternate. La scoperta di tale fenomeno si deve a Michael Faraday che nel 1831 scoprì che un primo conduttore di corrente poteva "indurre" il trasferimento di un flusso di corrente verso un secondo conduttore. Le scoperte di Faraday sono alla base dei motori elettrici, della dinamo e, naturalmente, anche dei sensori induttivi di posizione e di velocità. Nella categoria dei sensori induttivi rientrano semplici interruttori di prossimità, sensori a induttanza variabile, sensori a riluttanza variabile, sincronizzatori, resolver e sensori a trasformatore rotativi o lineari (RVDT o LVDT).

Capitolo 5 - Esecuzione delle prove e analisi dei risultati

5.1 Campioni e numerosità

Le sfere prodotte in TN sono di diverse dimensioni e diversi livelli di qualità. Le classi di qualità sono riferite alla normativa ISO 3290 che è una specifica dei requisiti internazionali concordati tra fornitore e cliente per le sfere in acciaio contenente una serie di parametri tra cui: dimensione della sfera, qualità della geometria e della superficie, dispersione del materiale, durezza, ecc.

A titolo di esempio, viene riportata una tabella delle tolleranze di forma e rugosità superficiale per i diversi livelli di qualità (Tabella 5.1).

Grade	Variation of ball diameter V_{Dws} max.	Deviation from spherical form max.	Surface roughness R_a max.
G 3	0,08	0,08	0,010
G 5	0,13	0,13	0,014
G 10	0,25	0,25	0,020
G 16	0,4	0,4	0,025
G 20	0,5	0,5	0,032
G 24	0,6	0,6	0,040
G 28	0,7	0,7	0,050
G 40	1	1	0,060
G 60	1,5	1,5	0,080
G 100	2,5	2,5	0,100
G 200	5	5	0,150

NOTE The values given in this table do not take into account surface defects; hence measurement must be taken outside such defects.

Tabella 5.1: Tolleranze di forma e rugosità della superficie (ISO 3290)

Le analisi oggetto di questa ricerca sono effettuate su sfere di diametro 6 mm, realizzate in acciaio 100Cr6, di due gradi di qualità (G3, G5) definite dalla ISO 3290.

L'acciaio 100Cr6 è un materiale a elevatissima resistenza all'usura adesiva grazie anche alla lubrificazione. Possiede inoltre elevata resistenza all'usura abrasiva, data dalle basse inclusioni non metalliche e dall'uniformità nella distribuzione dei carburi, che macinano le eventuali inclusioni. È caratterizzato da buona resistenza alla fatica grazie all'omogeneità della struttura ed è temprabile fino al cuore grazie alla presenza del cromo.

Il cuscinetto usato per le prove è un cuscinetto SKF a carico assiale, smontato e controllato che sia privo di qualunque difetto.

In Tabella 5.2 sono riportate le caratteristiche del cuscinetto:

Diametro di pitch [mm]	Diametro di sfera [mm]	Angolo di contatto [grad]	Numero di sfere
22	6	40	9

Tabella 5.2: Caratteristiche del cuscinetto sottoposto a prova

Le sfere vengono lavate mediante lavatrice ad ultrasuoni per eliminare l'effetto della sporcizia sui risultati.

Per ciascuna prova sono acquisite le vibrazioni tramite la macchina di analisi vibrazionale per cuscinetti (MGG11-MC500 Noise testing system) in [$\mu\text{m/s}$]. La durata di ogni acquisizione è stata 2 secondi e l'acquisizione è stata ripetuta 3 volte per ogni campione. Ogni acquisizione è stata effettuata con lo stesso paio di anelli, utilizzando la lubrificazione adatta.

Utilizzando il metodo di Design of Experiment è stata realizzata tramite il programma Minitab una *variation list* dei fattori di ingresso considerati (geometria, graffio, deformazione, VDWL). In base al numero di fattori in ingresso, Metodo di Design of Experiment applicato attraverso Minitab definisce un numero minimo di misure da effettuare per ottenere un modello matematico (esplicito modello) attendibile dipendente dal numero di variabili e i rispettivi livelli. Nel caso in esame il numero di prove da effettuare è 36. Considerando quindi 9 sfere utilizzate per ciascuna prova, il numero totale di sfere sottoposte a prova è 324.

Minitab è un software di analisi statistica per il controllo qualità, utilizzato per analizzare i dati e migliorare i processi.. Rappresenta uno standard per le metodologie Six Sigma e Lean Six Sigma [24] e viene utilizzato in diversi settori dell'industria per l'analisi statistica, la diminuzione dei costi, l'incremento dell'efficienza, la riduzione dei difetti ed il controllo delle variazioni.

Le vibrazioni portate nella tabella sono la media delle vibrazioni specificate delle sfere assemblate nel cuscinetto, acquistate tre volte.

In *Tabella 5.3* vengono riportate la *variation list* dei 4 fattori di ingresso e le vibrazioni misurate per i 36 test.

Numero di test	Geometria (VDw)[μm]	Graffi (Rt)[μm]	Deformazione[μm]	VDwL[μm]	Vibrazioni[$\mu\text{m/s}$]
T1	0.05	0.05	0	0.05	2.3
T2	0.05	0.05	0.265	0.175	3.2
T3	0.05	0.05	0.413	0.3	3.2
T4	0.05	0.05	0	0.05	2.1
T5	0.05	0.05	0.282	0.175	4.1
T6	0.05	0.05	0.402	0.3	4.1
T7	0.05	0.05	0	0.05	1.8
T8	0.05	0.05	0.316	0.175	3.7
T9	0.05	0.05	0.407	0.3	3.2
T10	0.05	0.43	0	0.05	3.2
T11	0.05	0.84	0.139	0.175	3.8
T12	0.05	0.64	0.474	0.3	4.9
T13	0.05	0.6	0	0.175	3
T14	0.05	0.85	0.259	0.3	4
T15	0.05	0.6	0.325	0.05	3.6
T16	0.05	0.5	0	0.175	4.2
T17	0.05	0.76	0.219	0.3	2.8
T18	0.05	0.58	0.416	0.05	3.7
T19	0.12	0.05	0	0.175	3.5
T20	0.12	0.05	0.289	0.3	4.2
T21	0.12	0.05	0.447	0.05	3.0
T22	0.12	0.05	0	0.175	3.2
T23	0.12	0.05	0.223	0.3	4.2
T24	0.12	0.05	0.547	0.05	4.3
T25	0.12	0.05	0	0.3	3.6
T26	0.12	0.05	0.288	0.05	3.7
T27	0.12	0.05	0.461	0.175	4.2
T28	0.12	0.77	0	0.3	4.7
T29	0.12	0.81	0.359	0.05	4.3
T30	0.12	0.89	0.42	0.175	5.1
T31	0.12	0.47	0	0.3	4.7
T32	0.12	0.71	0.296	0.05	5.2
T33	0.12	0.52	0.322	0.175	4.5
T34	0.12	0.55	0	0.3	3.6
T35	0.12	0.6	0.259	0.05	4.6
T36	0.12	0.66	0.331	0.175	5.0

Tabella 5.3: Variation list e misure sperimentali

5.2 Analisi dei risultati

5.2.1 Definizione del modello di regressione multipla

Il coefficiente di correlazione fra due variabili quantitative X e Y fornisce informazioni sull'esistenza o meno di un legame lineare fra le due variabili. Tale indice, però, non permette di individuare se è X che influisce su Y, oppure se è Y che influisce su X, oppure se sia X che Y sono conseguenze di un fenomeno che influisce su tutte e due: solo la conoscenza del problema oggetto di studio può in alcuni casi permettere di fare alcune ipotesi di dipendenza di una variabile dall'altra. Se si può ipotizzare l'esistenza di una dipendenza lineare ad esempio di Y da X, si può dire che le osservazioni della variabile Y si possono ottenere, a meno di un errore (o residuo), da una funzione lineare delle osservazioni della variabile X. Per ciascuna osservazione avremo quindi:

Y: Variabile risposta (variabile dipendente)

X: Variabile esplicativa (variabile indipendente)

Coefficienti di regressione B_i : Descrivono la dimensione e la direzione della relazione tra una variabile esplicativa e la variabile di risposta. I coefficienti sono i numeri per i quali i valori delle variabili esplicative vengono moltiplicate in un'equazione di regressione.

Quindi il modello di regressione multipla con P variabili indipendenti sarà:

$$Y_i = B_0 + B_1X_{1i} + B_2X_{2i} + B_3X_{3i} + \dots + B_pX_{pi}$$

B_0 : costante

$B_1, B_2, B_3, \dots, B_p$: coefficienti di regressione

Il coefficiente del termine X_i rappresenta la variazione della risposta media per un'unità di variazione di quel termine. Se il coefficiente è negativo, all'aumentare del termine, il valore medio della risposta diminuisce. Se il coefficiente è positivo, all'aumentare del termine, aumenta il valore medio della risposta.

Nel modello viene elencato un coefficiente per ogni livello della variabile X_i . Il coefficiente per un livello della variabile X_i deve essere impostato su zero in modo che il modello possa essere adeguato. L'interpretazione del coefficiente per una variabile X_i dipende dallo schema di codice scelto per queste variabili.

Con lo schema di codice (0, 1), utilizzato in caso di due livelli della variabile, ciascun coefficiente rappresenta la differenza tra ogni media di livello e la media di livello di riferimento. In questo caso il coefficiente per il livello di riferimento non viene visualizzato nella tabella dei coefficienti.

Con lo schema di codice (-1, 0, + 1), utilizzato in caso di tre livelli della variabile, ciascun coefficiente rappresenta la differenza tra ogni media di livello e la media complessiva.

Nel caso in esame, caratterizzato da una variabile dipendente (Vibrazioni) e 4 variabili indipendenti (Geometria, Graffio, Deformazione, VDwl), l'equazione del modello realizzato con Minitab è definita in *Figura 5.1*.

```

Regression Equation in Uncoded Units
Vibrazioni = 1.722 + 11.02 Geometria + 1.180 Graffio + 1.785 Deformazione + 1.786 VDWL
    
```

Figura 5.1: Equazione di regressione

5.2.2 Verifica dell'errore del modello

Il primo passaggio è stato quello di determinare se l'associazione tra la risposta e ogni fattore nel modello fosse statisticamente significativa, andando a confrontare il **P-Value** per ogni fattore con il livello di significatività per valutare l'ipotesi nulla. L'ipotesi nulla è che non vi sia nessuna associazione tra il fattore e la risposta. Di solito, viene utilizzato un livello di significatività (indicato come α o alpha), che indica una percentuale del rischio massimo accettabile per il rifiuto di un'ipotesi nulla, quindi una probabilità di commettere errore affermando che il fattore non è statisticamente significativo. Il livello di significatività più usato è 0,05 in un intervallo tra 0 e 1. A questo livello, la possibilità di trovare un effetto che non esiste realmente è solo del 5%. Più piccolo è il valore, meno è probabile che si rifiuti in modo errato l'ipotesi nulla.

- $P\text{-Value} \leq \alpha$: l'associazione è statisticamente significativa.

Se il P-value è minore o uguale del valore di significatività, è possibile concludere che esiste un'associazione statisticamente significativa tra la variabile di risposta e il fattore.

- $P\text{-Value} > \alpha$: l'associazione non è statisticamente significativa.

Se il P-value è maggiore del valore di significatività, non è possibile concludere che esista un'associazione statisticamente significativa tra la variabile di risposta e il fattore.

Come si può vedere in *Figura 5.2* e *Figura 5.4*, il P-Value per i vari fattori di ingresso ha un valore molto basso: questo vuol dire che esiste almeno un fattore significativo.

Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.516852	65.61%	61.17%	53.91%		
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		4.0136	0.0947	42.40	0.000	
Geometria	0.7712	0.3856	0.0863	4.47	0.000	1.00
Graffio	0.991	0.496	0.114	4.34	0.000	1.00
Deformazione	0.977	0.488	0.133	3.67	0.001	1.00
VDWL	0.446	0.223	0.106	2.11	0.043	1.00

Figura 5.2: Model Summary

SE Coef: L'errore standard del coefficiente si usa per misurare la precisione della stima del coefficiente. Più piccolo è l'errore standard, più precisa è la stima.

La divisione del coefficiente per il suo errore standard determina il T-value.

Se il P-value (calcolato sulla base del T-value), è inferiore al livello di significatività, si conclude che il coefficiente è statisticamente significativo.

VIF: questo parametro viene utilizzato per descrivere quanta multicollinearità (correlazione tra le variabili) esiste in un'analisi di regressione. La multicollinearità è problematica perché può aumentare la varianza dei coefficienti di regressione, rendendo difficile valutare l'impatto individuale che ciascuno dei fattori correlati ha sulla risposta.

VIF = 1 → non esiste correlazione tra le variabili.

1 < VIF < 5 → moderata correlazione.

VIF > 5 → elevata correlazione.

S-value: rappresenta la deviazione standard della distanza tra i valori reali dei dati e i valori stimati dal modello. S-value si usa per valutare quanto bene il modello descrive la risposta. Esso viene misurato nelle unità della variabile di risposta e definisce quanto lontano cadono i valori dei dati dai valori approssimati dal modello. Più basso è il valore di S, migliore è il modello nella descrizione della risposta. Nel caso in esame assume un valore di 0.51.

Tuttavia, un valore di S basso non indica se il modello soddisfa le ipotesi del modello. È necessario anche controllare i grafici dei residui per verificare le ipotesi.

R-sq: è una misura statistica di quanto vicino sono i dati alla retta di regressione del modello (la retta di regressione valuta la relazione tra un fattore e la risposta) e rappresenta la percentuale della variabilità della risposta che viene espressa attraverso un modello lineare. È la somma delle differenze al quadrato tra il modello e i punti sperimentali e nel caso in esame è uguale a 65,61% (*Figura 5.2* e *5.3*). R-sq può assumere valori all'interno di un intervallo tra 0% e 100%:

- 0% indica che il modello non riesce ad esprimere la variabilità della risposta attorno la sua media;
- 100% indica che il modello esprime tutta la variabilità della risposta intorno la sua media.

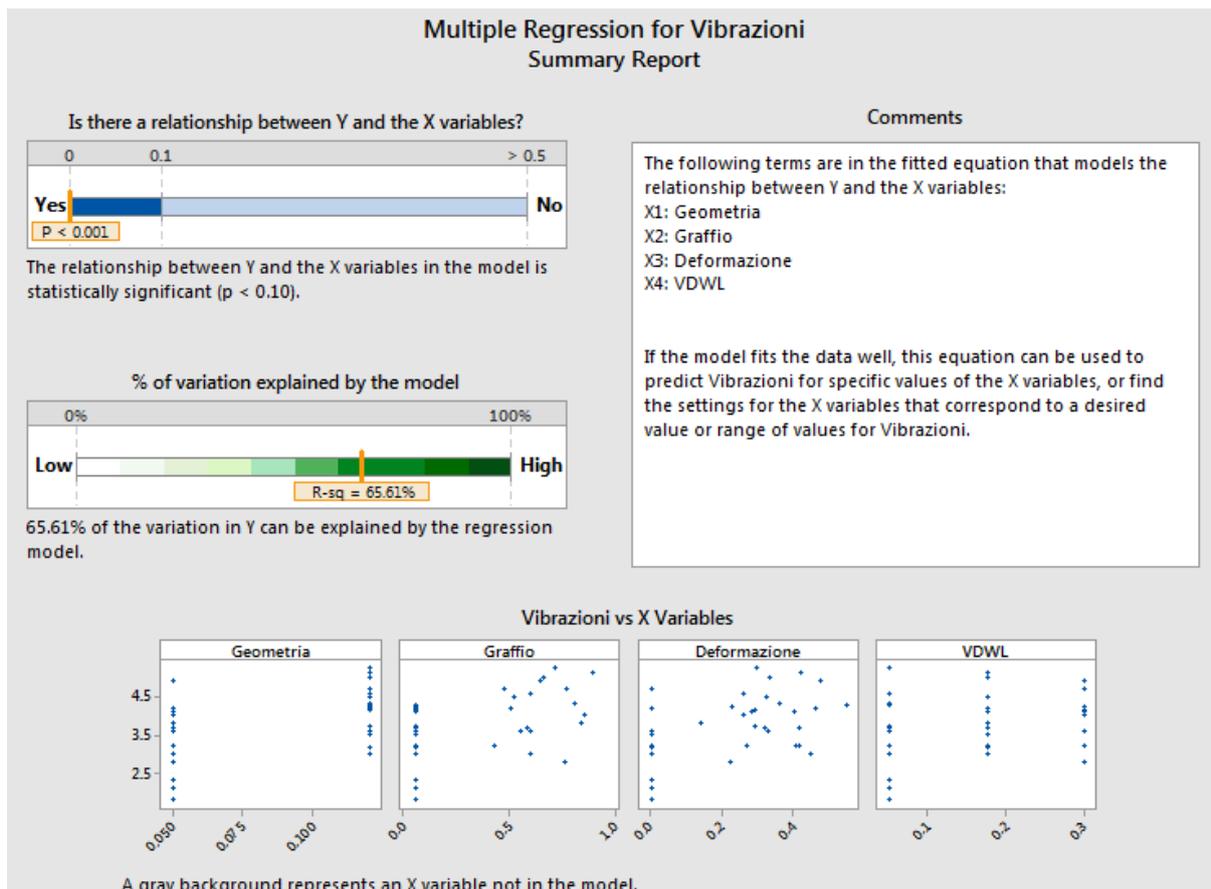


Figura 5.3: P-value e R-sq significativi

In *Figura 5.4* sono mostrati ad esempio 2 modelli di regressione: quello di sinistra caratterizzato da un R-sq del 38% mentre quello di destra caratterizzato da un R-sq di 87.4%. Si nota che il modello caratterizzato da un R-sq più elevato è in grado di approssimare al meglio i dati sperimentali i quali risultano infatti più vicini alla retta di regressione del modello.

In linea teorica, se un modello avesse un R-sq del 100%, significherebbe che i dati stimati da modello coincidono sempre con i valori misurati e il modello interpola i dati.

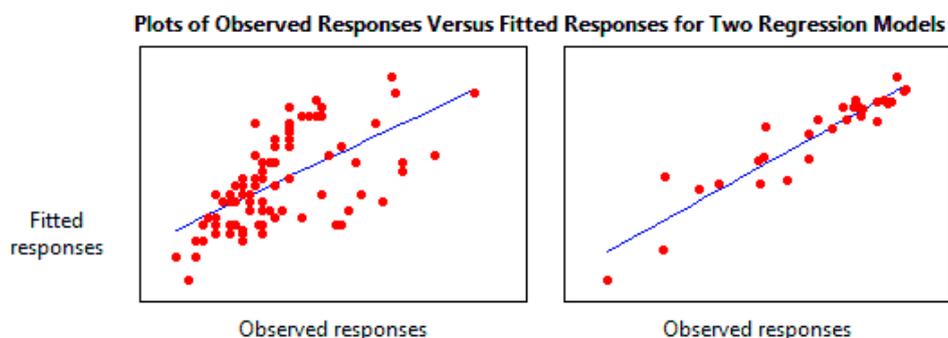


Figura 5.4: Rappresentazione grafica di R-sq

R-sq (adj): indica la percentuale della variabilità della risposta che viene espressa attraverso un modello lineare, aggiustata a seconda del numero di fattori nel modello in relazione al numero di osservazioni.

R-sq (adj) è una versione modificata di R-sq che è stata regolata per il numero di fattori nel modello. R-sq (adj) aumenta solo se il nuovo termine migliora il modello più di quanto ci si aspetterebbe e diminuisce quando un fattore migliora il modello di meno del previsto. R-sq (adj) può essere negativo, ma di solito non lo è; inoltre è sempre inferiore all'R-sq.

R-sq (pred): indica quanto bene un modello preveda le risposte per nuove osservazioni. Questa statistica consente di determinare quanto il modello si adatta ai dati originali e quanto è capace a fornire previsioni valide per nuove osservazioni. Minitab calcola l'R-sq (pred) rimuovendo sistematicamente ogni osservazione dal set dei dati, stimando l'equazione di regressione e determinando quanto bene il modello prevede l'osservazione rimossa. R-sq (pred) può essere negativo ed è sempre inferiore all'R-sq.

Come abbiamo detto è necessario anche controllare i grafici dei residui per verificare le ipotesi. I grafici dei residui si utilizzano per determinare se il modello è adeguato e se soddisfa le ipotesi dell'analisi. Se le ipotesi non sono soddisfatte, il modello potrebbe non adattarsi bene ai dati e si dovrebbe prestare attenzione ad interpretare i risultati.

Il grafico seguente (*Figura 5.5*) si usa per verificare l'ipotesi che i residui siano distribuiti casualmente e abbiano una varianza costante. Idealmente, i punti dovrebbero cadere casualmente su entrambi i lati dello 0, senza schemi riconoscibili nei punti. In questo caso si nota che i punti non hanno nessuna tendenza particolare e sembrano essere distribuiti casualmente intorno allo zero: possiamo affermare che il modello è adeguato e soddisfa le ipotesi dell'analisi.

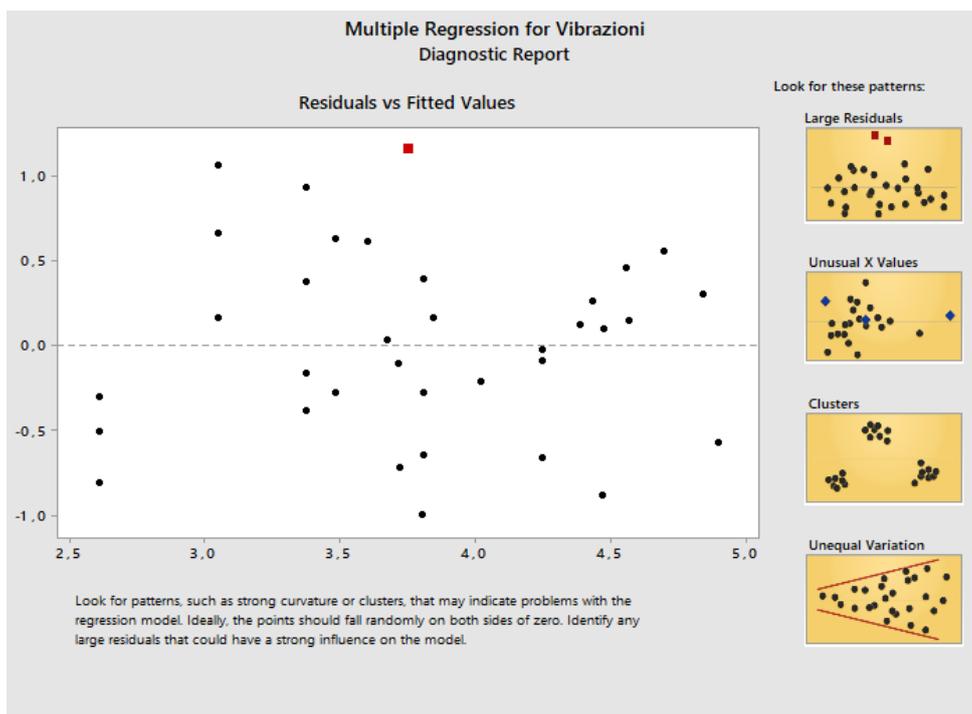


Figura 5.5: Residual fitted value

Quindi, a questo punto si può passare ad un'analisi più dettagliata e a capire quali di questi fattori, e la loro interazione, siano influenti sulla risposta.

5.2.3 Risultati finali

Il *Main Effects Plot* mostra gli effetti che i diversi fattori di ingresso hanno sulla risposta. Questo diagramma mostra la variazione della risposta in funzione della variazione di ciascun fattore. Come si nota in *Figura 5.6*, graffio, geometria e le deformazioni plastiche localizzate sono i fattori che hanno un maggiore effetto sulle vibrazioni mentre il fattore di

dispersione dimensionale (VDwl) risulta essere meno influente sulla risposta. Per esempio per il fattore graffio, passando da un cuscinetto con sfere di rugosità di circa $0.05 \mu\text{m}$ (sfere senza graffio) ad uno con sfere aventi graffio di profondità di circa $0.89 \mu\text{m}$, le vibrazioni aumentano in modo notevole.

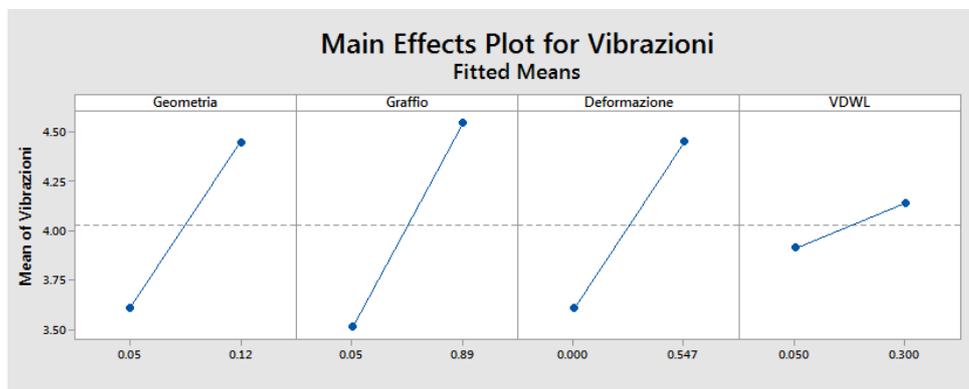


Figura 5.6: Main effects plot

In Figura: 5.7 è possibile osservare in che modo le combinazioni tra i fattori hanno effetto sulla variazione delle vibrazioni. Un risultato interessante è relativo alla combinazione dei fattori di dispersione dimensionale (VDwl) e deformazione plastica localizzata. In particolare nel caso di cuscinetto con sfere senza deformazione plastica, aumentando la dispersione dimensionale delle sfere, le vibrazioni rimangono costanti. Al contrario, in un cuscinetto con sfere di massimo grado di deformazione plastica, aumentando la dispersione dimensionale, le vibrazioni aumentano notevolmente.

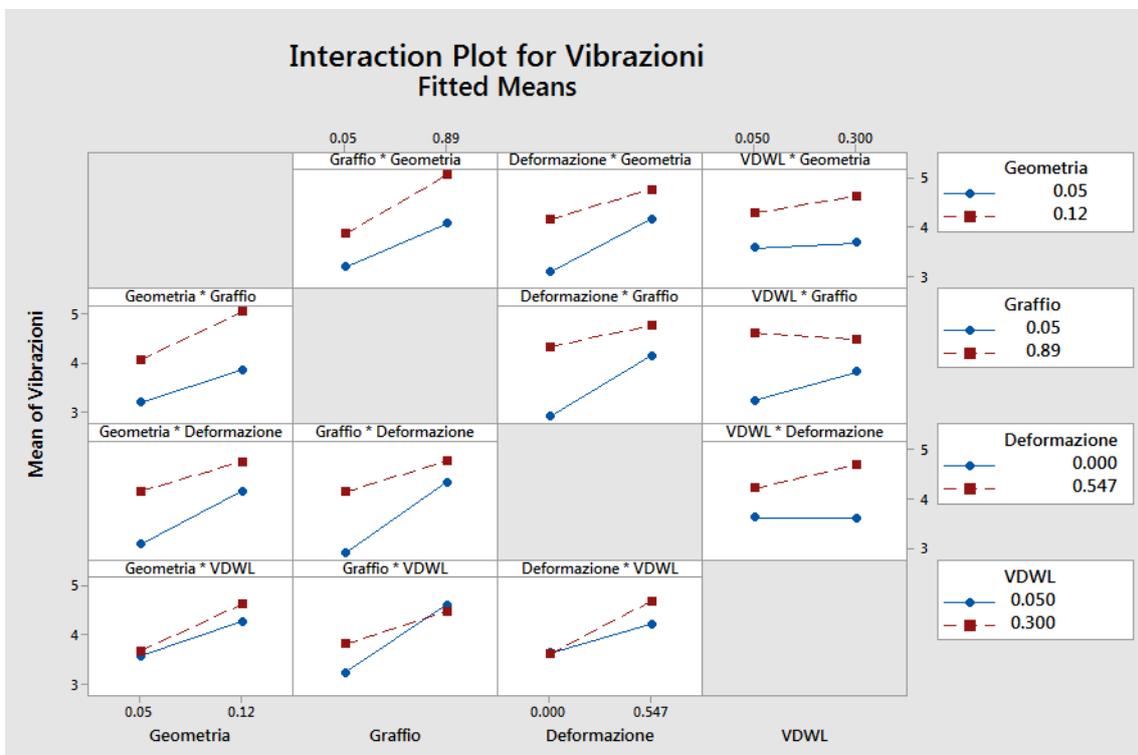


Figura 5.7: Effetto dell'interazione tra i fattori sulle vibrazioni

Un altro risultato di particolare interesse è relativo alla combinazione tra i fattori di graffio e deformazione. In particolare sul cuscinetto con sfere senza graffio, aumentando la profondità di deformazione, le vibrazioni aumentano in modo elevato. Invece, in un cuscinetto con sfere caratterizzate dal massimo grado di profondità del graffio, aumentando la profondità di deformazione, le vibrazioni aumentano in misura notevolmente minore (Figura 5.8).

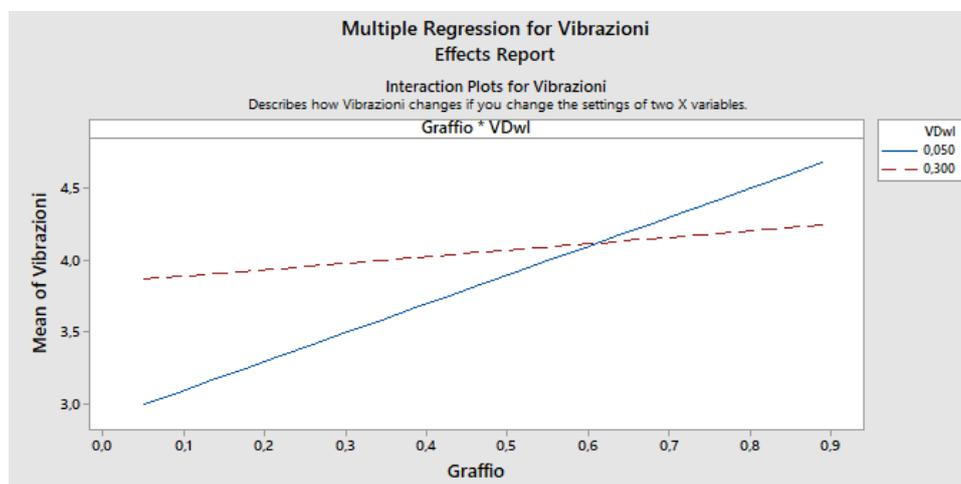


Figura 5.8: Effetto dell'interazione tra graffio e VDwl sulle vibrazioni

Inoltre si può analizzare la variazione delle vibrazioni, variando e combinando le caratteristiche delle sfere (fattori di ingresso) tramite il *Contour Plot*. Sono riportati di seguito tutti casi delle combinazioni dei fattori (Figure 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14).

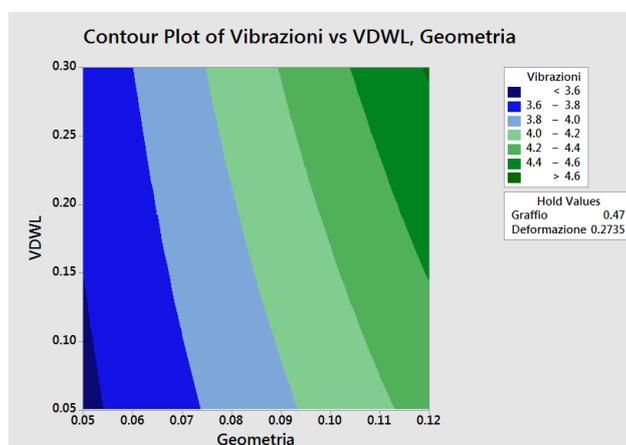


Figura 5.9: Contour Plot, interazione tra VDwl e geometria

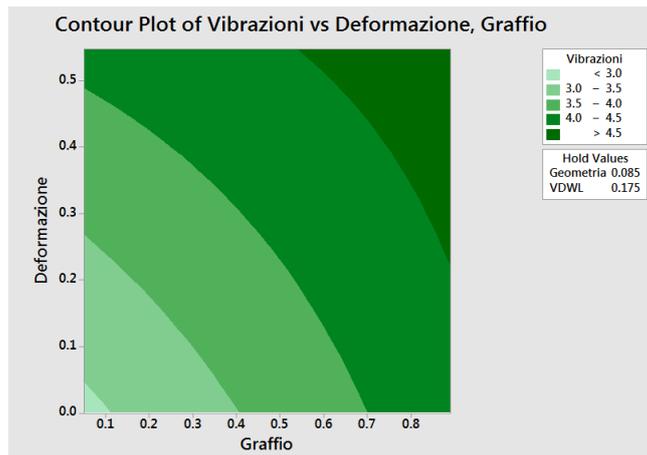


Figura 5.10: Contour Plot, interazione tra deformazione e graffio

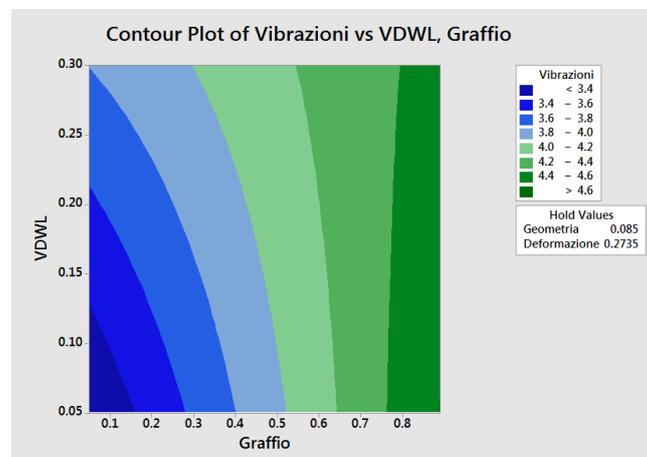


Figura 5.11: Contour Plot, interazione tra VDwl e graffio

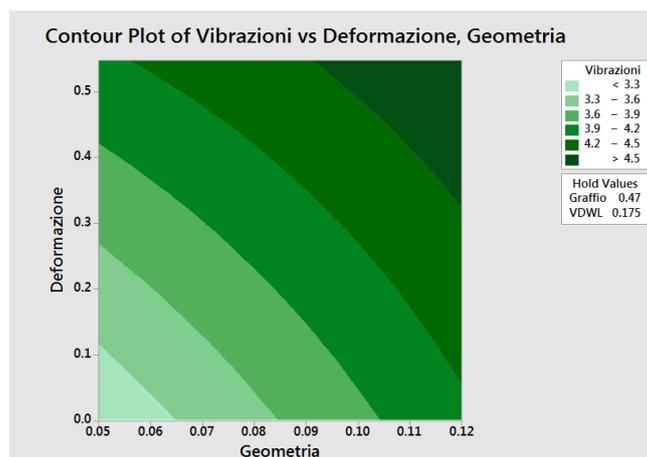


Figura 5.12: Contour Plot, interazione tra deformazione e geometria

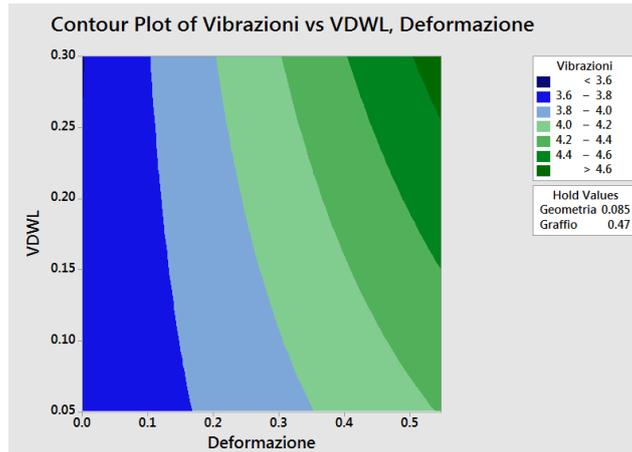


Figura 5.13: Contour Plot, interazione tra VDwl e deformazione

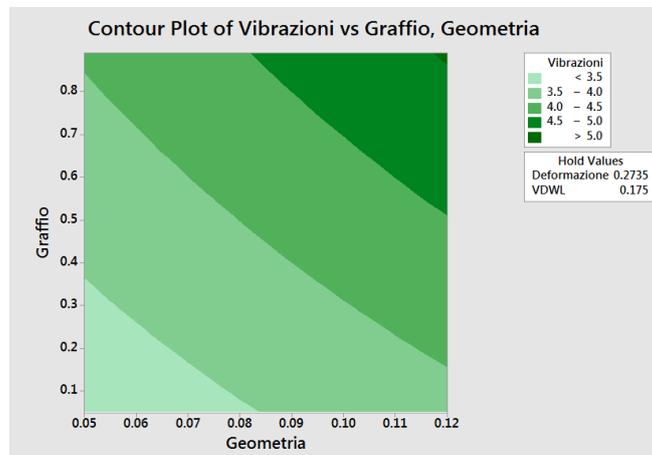


Figura 5.14: Contour Plot, interazione tra graffio e geometria

5.2.4 Report di previsione e ottimizzazione

Il report di previsione e ottimizzazione (Figura 5.15) mostra le soluzioni necessarie per ottenere il target, cioè misurare i contributi alle vibrazioni dei singoli fattori. È possibile osservare che i valori ottimali dei fattori (Geometria, Graffio, Deformazione plastica localizzata e VDwl) per i punti focali sono ovviamente i valori che rappresentano le sfere senza graffio, senza deformazione plastica, con la geometria (ovalità) quasi perfetta e con minimo valore di VDwl.

Un altro accoppiamento ottimale dei fattori è rappresentato dalle sfere con geometria (ovalità) di 0.05 μm , senza graffio, con deformazione plastica di livello medio (profondità 0.265 μm) e VDwl della categoria 0.175 μm .

Altri accoppiamenti ottimali dei vari fattori sono mostrati in tale report.

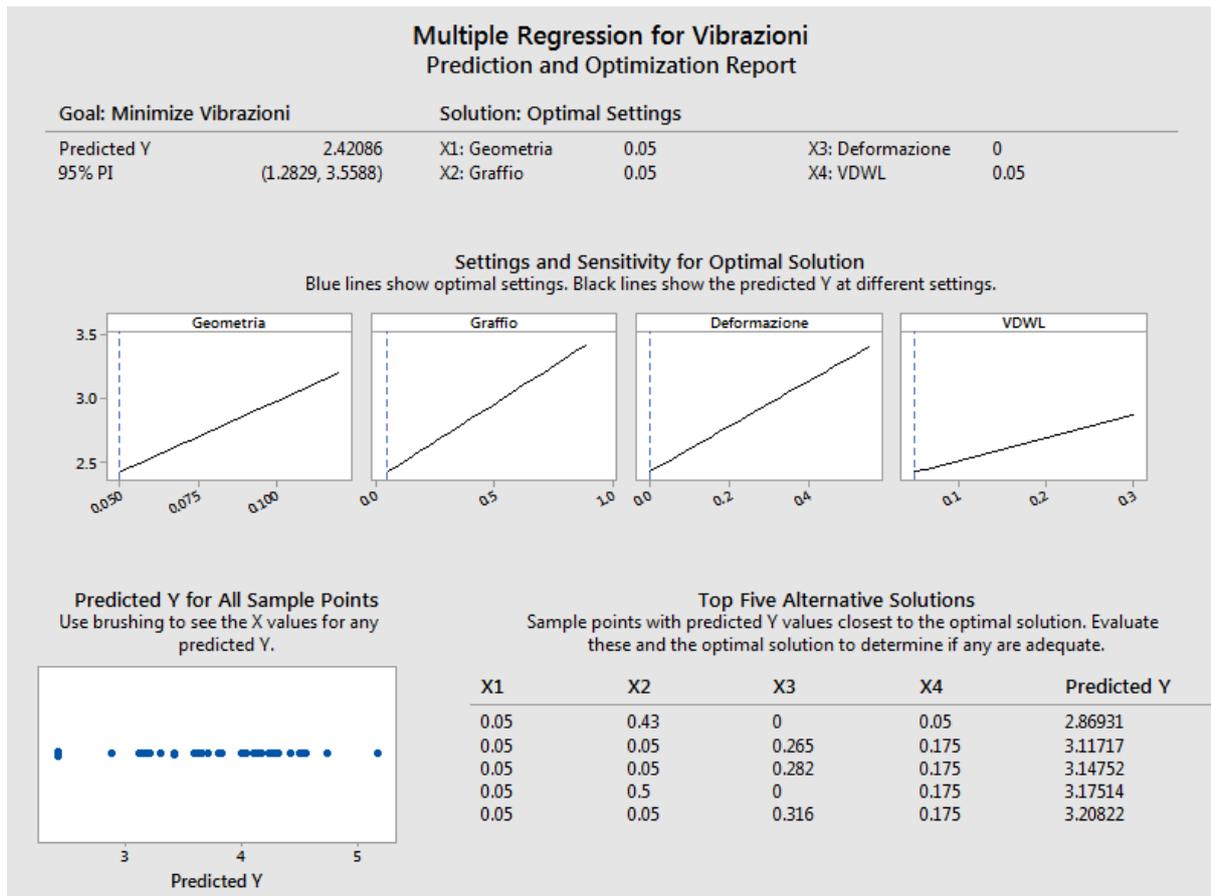


Figura 5.15: Report di previsione e ottimizzazione (1)

Inoltre Minitab fornisce anche i valori peggiori dei fattori che portano il cuscinetto ad essere rumoroso, con elevati valori delle vibrazioni (*Figura 5.16*).

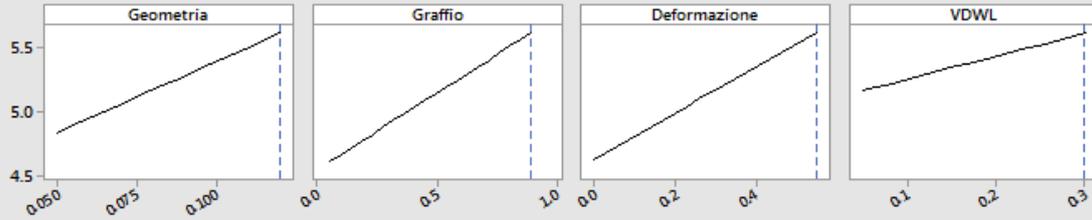
Multiple Regression for Vibrazioni Prediction and Optimization Report

Goal: Maximize Vibrazioni

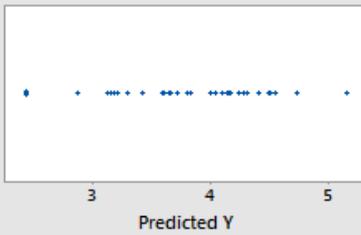
Solution: Optimal Settings

Predicted Y	5.60639	X1: Geometria	0.12	X3: Deformazione	0.547
95% PI	(4.4216, 6.7911)	X2: Graffio	0.89	X4: VDWL	0.3

Settings and Sensitivity for Optimal Solution
Blue lines show optimal settings. Black lines show the predicted Y at different settings.



Predicted Y for All Sample Points
Use brushing to see the X values for any predicted Y.



Other bad solutions

X1	X2	X3	X4	Predicted Y
0.12	0.89	0.42	0.175	5.15645
0.12	0.81	0.359	0.05	4.72992
0.12	0.66	0.331	0.175	4.72613
0.12	0.52	0.322	0.175	4.54484
0.12	0.71	0.296	0.05	4.49943

Figura 5.16: Report di previsione e ottimizzazione (2)

Conclusioni

Il metodo del DoE (Design of Experiment) è stato efficace per l'individuazione dei fattori che hanno maggiormente effetto sulle vibrazioni e quindi sulla rumorosità del cuscinetto. Il progetto è iniziato con la selezione dei fattori di ingresso e la successiva definizione dei test applicando il metodo del DoE. È stata effettuata poi una serie di prove sperimentali nelle quali sono state alterate e successivamente misurate alcune caratteristiche geometriche e fisiche delle sfere del cuscinetto. Infine è stato verificato il loro impatto sulle vibrazioni delle sfere e quindi sulla rumorosità del cuscinetto.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di individuare le caratteristiche critiche della sfera che hanno maggiore impatto su rumore/vibrazioni del cuscinetto e trovare una dipendenza ottimale tra i parametri di ingresso (geometria, graffio, deformazione plastica e dispersione dimensionale) e quelli di misura (vibrazioni).

Da tale progetto è emerso che graffio, geometria (ovalità) e deformazione plastica sono i 3 fattori maggiormente impattanti su rumore e vibrazioni, al contrario della dispersione dimensionale che risulta avere un'importanza ridotta.

Inoltre le analisi effettuate hanno evidenziato che, nonostante la dispersione dimensionale abbia un effetto ridotto come fattore singolo, essa assume una certa importanza andandola a combinare con altri fattori.

Come era possibile aspettarsi, le sfere senza nessun difetto, con la rotondità quasi perfetta e con minimo valore di dispersione dimensionale risultano avere vibrazioni e rumore molto ridotti. Il metodo del DoE, applicato tramite il programma Minitab, ha permesso inoltre di individuare altre combinazioni ottimali dei fattori di input che minimizzano la rumorosità del cuscinetto.

In questo progetto sono state considerate quattro caratteristiche delle sfere come fattori di ingresso, ma oltre a queste ce ne possono essere altre (es: durezza, stress superficiale ecc.) che possono essere esaminate in studi futuri.

References

- [1] C.S. Sunnersjo, "Rolling element Vibrations-The effects of geometrical imperfections and wear" *Journal of sound and vibration* 1985
- [2] Ian Howard "A review of Rolling Element Bearing Vibration 'Detection, Diagnosis, and Prognosis'" Department of Defence science and Technology Organization, 1994.
- [3] Structure-borne noise and vibration of concrete box structure and rail viaduct
- [4] N. Tandon and A. Choudhury, "A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings," *Tribology International*, vol. 32, no. 8, pp. 469–480, 1999.
- [5] N. Tandon and A. Choudhury, "Theoretical model to predict the vibration response of rolling bearings in a rotor bearing system to distributed defects under radial load," *Journal of Tribology*, vol. 122, no. 3, pp. 609–615, 2000.
- [6] SadettinOrhan, NizamiAkturk "Vibration Monitoring for defect diagnosis of Rolling Element Bearings as a predictive maintenance
- [7] Montgomery D.C., (1991), *Design and analysis of experiments*, J.Wiley & Sons. *Disegno Sperimentale*
- [8] *Design of Experiment*, tutore Khan Rehman M Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2013
- [9] M. Norgia and S. Donati. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry. *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on
- [10] 52(6):1765–1770, Dec 2003.] [Marco B. Sistema interferometrico per la misura della velocità e del verso di spostamento di un bersaglio. Master's thesis, Politecnico di Milano, 2015].
- [11] J. Antoni, F. Bonnardot, A. Raad, M. El Badaoui, Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals, *Mechanical, Systems and Signal Processing* 18 (6) (2004) 1285–1314.
- [12] A.C. McCormick, A.K. Nandi, Cyclostationary in rotating machine vibrations, *Journal of Sound and Vibration* 12 (2) (1998) 225–242. [13] I. Antoniadis, G. Glossiotis, Cyclostationary analysis of rolling-element bearing vibration signals, *Journal of Sound and Vibration* 248 (2001) 829–845.
- [14] R.B. Randall, J. Antoni, S. Chobsaard, The relationship between spectral correlation and envelope analysis for cyclostationary machine signals, application to ball bearing diagnostics, *Mechanical System Processing* 15 (5) (2001) 945-962.
- [15] C. Capdessus, M. Sidahmed, J.-L. Lacoume, Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing* 14 (3) (2000) 371–385.
- [16] J. Antoni, R.B. Randall, Differential diagnosis of gear and bearing faults, *ASME Journal of Vibration and Acoustics* 124 (2) (2002) 165–171].
- [17] Trasformata ed anti-trasformata di Fourier Corso di Fisica Matematica 2, a.a. 2019-2020 Dipartimento di Matematica, Università di Milano 11/11/2019
- [18] J. Antoni, Cyclic spectral analysis of rolling element bearing signals: facts and fictions, *Journal of Sound and Vibration* 304, 2007, pagg. 497-529.
- [19] Y. T. Su, S. J. Lin, On the initial fault detection of a tapered roller bearing: frequency domain analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 155, 1992.

- [20] J. Halme, P. Andersson, Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics – state of the art, Institution of Mechanical Engineers, 2009.
- [21] S. Devendiran, Dr. K. Manivannan Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Component International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 6 (2016) pp 3966-3975 © Research India Publications],
- [22] “Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review” -International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 6 (2016) pp 3966-3975 © Research India Publications.
- [23] Rapisarda D., Automazione industriale (<http://sair.arezzeo.ing.unisi.it/downloads/dcai.pdf>) Catalogo Allen-Bradley
- [24] B. Wheat, C. Mills, M. Carnell, Leaning into Six Sigma – a parable of the journey to Six Sigma and a lean enterprise, McGraw-Hill, 2003

*Desidero ringraziare
la prof. Raffaella Tesana
e Sebastiano Rizzo
per la loro grande disponibilità
e per il supporto dimostratomi
in questo lungo periodo.
Infine ringrazio Stefano per essere
stato sempre disponibile a risolvere
i vari problemi riscontrati durante
la stesura di questo lavoro.*