POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea In Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi dei parametri influenti su comportamento elastodinamico di tendicinghia

Relatore: Candidato:

Sesana Raffaella Seu Gianluca

Maffiodo Daniela

Indice

1	Intr	Introduzione				
2	Des	crizione e tipologie di tendicinghia	. 2			
	2.1	Single eccentric "autosetting"	. 5			
	2.2	Double eccentric	. 6			
	2.3	Double eccentric with "crank/rod"	. 7			
	2.4	Sliding single eccentric	. 8			
3	Ana	lisi tendicinghia	. 9			
	3.1	Calcolo di coppie e forze agenti sul tenditore	10			
4	Des	ign of Experiments (DOE)	12			
	4.1	Formulazione del problema	13			
	4.2	Scelta del disegno sperimentale	14			
	4.3	Acquisizione, analisi dei dati e definizione del modello	15			
5	Pre	parazione delle prove da effettuare e scelta dei fattori	16			
6	Ese	Esecuzione delle prove				
7	Analisi risultati					
8	Con	Conclusioni				
9	9 Bibliografia					
1(o s	itografia	37			

1 Introduzione

Questo lavoro di tesi è stato svolto nell'azienda Dayco Europe S.r.l ad Ivrea, in particolare nel reparto di Prototipia del dipartimento di Ricerca & Sviluppo. Dayco è un leader a livello mondiale in ricerca, progettazione, produzione e distribuzione di componenti essenziali del motore, sistemi di trazione e servizi per automobili, camion, macchinari edili, agricoli e industriali.

La tesi tratta un'analisi DOE (Design of Experiments) che è stata eseguita su un tendicinghia allo scopo di individuare i fattori influenti sul comportamento meccanico del tenditore.

Il tendicinghia in questione, che è stato progettato e sviluppato dall'azienda Dayco, viene utilizzato nelle automobili commerciali per mettere in tensione la cinghia di distribuzione e per assorbire e smorzare tutte le vibrazioni che arrivano dall'albero motore e dalla cinghia stessa.

La motivazione alla base di quest'analisi DOE è rappresentata dal fatto che il tenditore in esame, dopo essere stato montato sul motore, presentasse alcune problematiche in termini di Coppia di Attrito (Friction Torque) e Coppia, che sono le grandezze principali che caratterizzano un qualsiasi tendicinghia, soprattutto nel corso dei cicli iniziali di funzionamento. Per cui, questa analisi Doe consiste nell'andare a capire quali parametri, e in che percentuale, influenzano il comportamento del tenditore: in seguito i parametri verrano chiamati Fattori e il loro range di variabilità sarà definito dai Livelli.

E' importante sottolineare che questo studio è il proseguimento di un lavoro iniziato in passato dall'azienda stessa e che quindi va ad approfondire e migliorare le conoscenze di un progetto già avviato.

Il presente lavoro si articola in 6 capitoli.

Nel primo capitolo le caratteristiche generali del tendicinghia saranno descritte andando a considerare le diverse tipologie di funzionamento; nel secondo capitolo, prendendo in considerazione il tenditore oggetto di studio, verranno esaminate le forze e le coppie che agiscono su di esso in condizioni di funzionamento; nel terzo capitolo si descriveranno le caratteristiche del DOE; nel quarto e quinto capitolo l'attenzione verrà posta sulla preparazione dei test, sulla scelta dei parametri dei quali verrà valutata l'influenza sul comportamento meccanico del tenditore, e sullo svolgimento delle prove; infine, nell'ultimo capitolo verranno elaborati e discussi i risultati.

2 Descrizione e tipologie di tendicinghia

Saranno ora descritti nel dettaglio i principi di funzionamento dei tendicinghia utilizzati su autoveicoli commerciali e, successivamente, nei paragrafi 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, le 4 tipologie principali di tendicinghia.

Una delle funzioni più diffuse presenti all'interno delle macchine è la trasmissione del moto tra un organo conduttore o *motore* ed un organo condotto o *mosso*; le trasmissioni flessibili si rendono necessarie quando gli alberi sono posti ad una distanza tale che sarebbe poco conveniente, dal punto di vista tecnico ed economico, ricorrere agli ingranaggi e così si impiegano organi flessibili come cinghie e catene.

Le cinghie trasmettono il moto per attrito su delle pulegge che sono calettate sugli alberi, come si vede dalla figura che segue *Figura 2.1* :

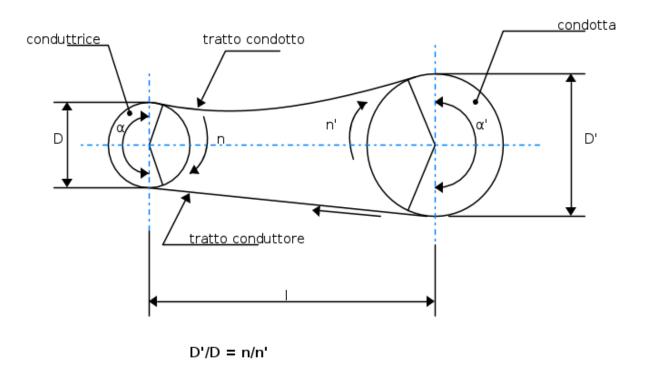


Figura 2.1 Trasmissione moto tramite cinghie

Sono presenti una puleggia conduttrice e una puleggia condotta; si chiamerà conduttore il tratto di cinghia che va nel senso del moto dalla condotta alla conduttrice e che è in tensione; il tratto opposto è detto tratto condotto ed è poco teso: in caso di posizione orizzontale è

generalmente posto superiormente, spesso è premuto contro le pulegge grazie ad appositi dispositivi detti **tendicinghia/tenditori**.

Il tendicinghia è posto sul tratto meno teso della cinghia e aumenta l'angolo di avvolgimento con un aumento della coppia trasmissibile (*Figura 2.2*):

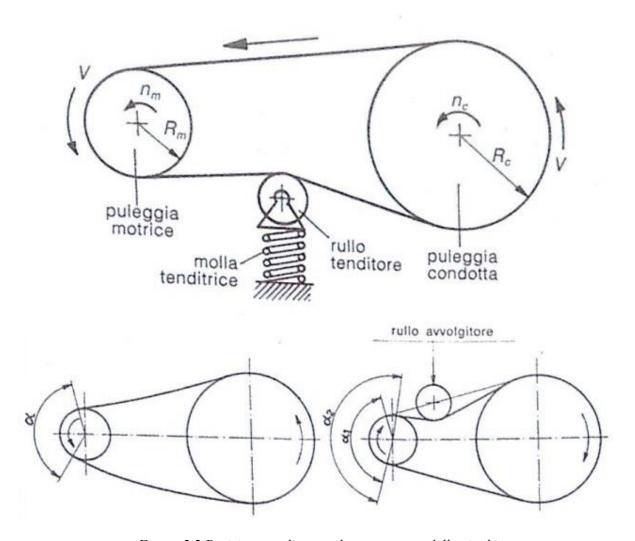


Figura 2.2 Posizione tenditore su lato meno teso della cinghia

I componenti generalmente presenti in un generico tenditore sono rappresentati nella seguente *Figura 2.3* :

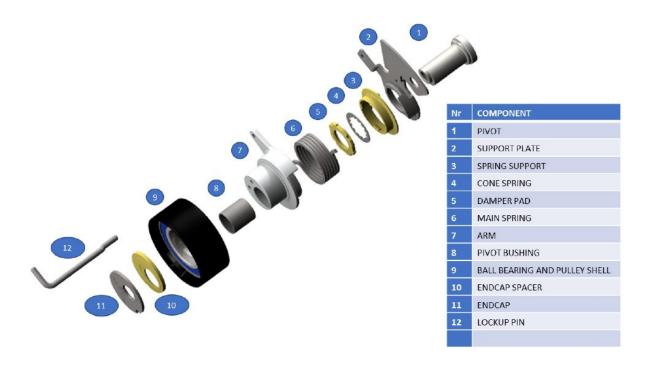


Figura 2.3 Componenti generalmente presenti in un tendicinghia

Il gruppo di tenditori comprende 4 famiglie di tensionatori principali, le cui procedure di installazione sul lato anteriore del motore possono differire l'una dall'altra, e sono:

- 1) Single eccentric "autosetting"
- 2) Double eccentric
- 3) Double eccentric with "crank/rod" loading system
- 4) Sliding single eccentric

Di seguito la rappresentazione schematica dei principi di funzionamento e caricamento per le suddette famiglie di tenditori.

2.1 Single eccentric "autosetting"

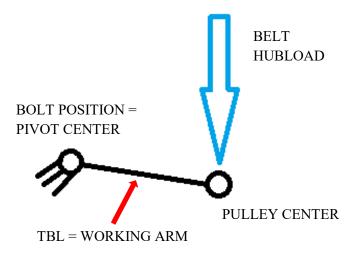


Figura 2.4 Schema di un tenditore di tipo Single Eccentric

Nella *Figura 2.4* si mostra l'architettura più semplice di un tenditore in cui il centro del bullone di fissaggio (*bolt position*) e il centro del perno (*pivot center*) sono coincidenti e può essere schematizzato da una singola asta (*working arm*). Il braccio di lavoro è generato dall'eccentricità tra la sede del cuscinetto e il centro della boccola, che a sua volta coincide con il centro del pivot. Non consente di controllare né la coppia di installazione né l'angolo differenziale durante l'installazione e presenta un'elevata sensibilità rispetto alle tolleranze di layout.

I tenditori autosetting sono meno costosi rispetto alle altre 3 categorie perché:

- Non è richiesta alcuna operazione di caricamento della cinghia all'interno del motore
- Componente più semplice (ad esempio, nessuna fresatura antirotazione sulla parte superiore del perno, nessun foro eccentrico)

Pertanto, i tenditori autosetting devono essere verificati al primo tentativo (inteso come primo ed unico posizionamento della cinghia e del tenditore sul motore) nello studio di un determinato layout della distribuzione.

2.2 Double eccentric

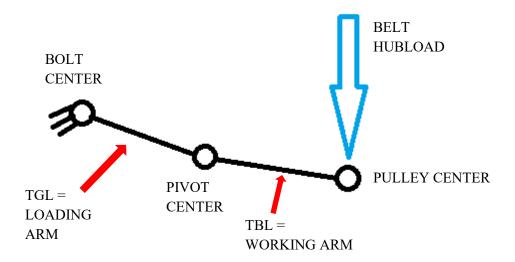


Figura 2.5 Schema di in tenditore di tipo Double Eccentric

Questo tipo di tensionatore può essere schematizzato da 2 differenti "bracci" (loading arm + working arm); il braccio di carico (loading arm) può essere realizzato usando un perno (pivot) eccentrico (TGL con foro eccentrico rispetto al diametro della boccola). Il braccio di lavoro (working arm) è generato dall'eccentricità tra la sede del cuscinetto e il centro della boccola come nei tenditori a singola eccentricità. Questa tipologia di tensionatore (Figura 2.5) viene normalmente utilizzata per tenere sotto controllo la tensione di installazione della cinghia, consentendo a questa esecuzione di neutralizzare le tolleranze sulla lunghezza della cinghia e del layout: a differenza del single eccentric autosetting, in questa tipologia di tenditore, grazie alla presenza del loading arm, durante l'installazione è possibile spostare e posizionare il tenditore nella posizione ideale sulla cinghia, intesa come posizione che garantisce il corretto funzionamento della cinghia stessa.

2.3 Double eccentric with "crank/rod"

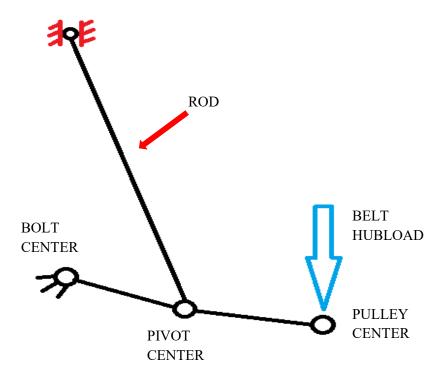
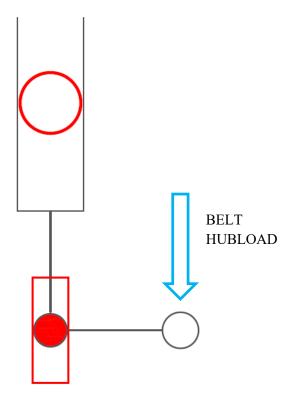


Figura 2.6 Schema di un tenditore di tipo Double Eccentric con asta

Questo tipo di tensionatore (*Figura 2.6*) può essere schematizzato da 2 bracci (*loading arm* + *working arm*) e da un ulteriore elemento cinematico, l'asta (*rod*), la cui funzione è assolta da una piastra di supporto in acciaio. Questa è geometricamente collegata, attraverso un giunto rotazionale, al centro del pivot e, attraverso una guida, alla parte anteriore del motore. Questa architettura consente, durante la procedura di caricamento/ tensionamento della cinghia, di mantenere sia la tensione di installazione che l'angolo differenziale sotto controllo, perché, fino a quando la cinghia non entra in contatto con la puleggia, il braccio di lavoro del tenditore si avvicina alla cinghia con un movimento di quasi traslazione.

Questa tipologia è preferita rispetto al doppio eccentrico e questo è dovuto al fatto che il costo è lo stesso ma si ha un miglior controllo dell'angolo differenziale; se il motore non offre la possibilità di avere una guida, si dovrà prendere in considerazione la soluzione del doppio eccentrico.

2.4 Sliding single eccentric



Questo tipo di tenditore è fissato al motore tramite un perno che è in grado di scorrere attraverso una guida, ma non può ruotare grazie ad una testa che ha una funzione anti-rotazionale, per consentire il serraggio del dado.

Questa è una soluzione di nicchia a causa del maggior costo rispetto alle altre soluzioni.

3 Analisi tendicinghia

Verrà di seguito presentata un'analisi approfondita del tenditore oggetto della presente ricerca. In particolare verranno analizzate le forze e le coppie che agiscono sul tenditore durante il funzionamento.

Il tendicinghia esaminato appartiene alla categoria "double eccentric" ed è quindi caratterizzato da 2 differenti bracci, working arm e loading arm. Come è stato detto nel paragrafo 2.2, il braccio di carico (loading arm) viene "annullato" subito dopo l'installazione del tenditore nella parte anteriore del motore e, di conseguenza, questo tipo di tenditore può essere ricondotto alla soluzione più semplice di "Single eccentric autosetting" e può essere schematizzato come si vede in Figura 3.1:

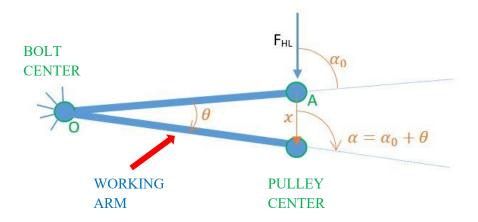


Figura 3.1 Schema di un tenditore con variazione di angolo differenziale e angolo di oscillazione

Dallo schema si possono definire i seguenti parametri:

- F_{HL} : forza [N] scambiata tra cinghia e puleggia;
- α : angolo differenziale [gradi] tra braccio di lavoro e forza F_{HL} , nella posizione nominale del tenditore;
- θ : angolo [gradi] di oscillazione del braccio del tenditore;

3.1 Calcolo di coppie e forze agenti sul tenditore

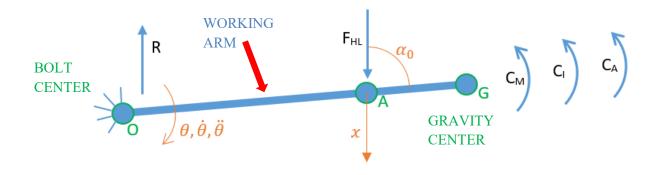


Figura 3.2 Coppie e Forze che agiscono su tenditore

Nella *Figura 3.2* si possono notare le coppie e le forze che agiscono sul tenditore una volta che quest'ultimo viene caricato dalla forza F_{HL} che la cinghia esercita sulla puleggia.

Bisogna tener presente che la cinghia di distribuzione sincronizza il movimento tra albero motore e albero a camme, il quale regola l'apertura e la chiusura delle valvole. Quest'ultima funzione (far aprire e chiudere le valvole in maniera sincronizzata con il motore, ogni valvola si apre e si chiude esattamente quando occorre) deve essere fatta con precisione estrema perché è necessaria per il corretto funzionamento della fase di aspirazione e di scarico che avvengono nel motore.

Durante il funzionamento del motore si vengono a creare:

- Forze di inerzia centrifughe
- Forze di inerzia alternate
- Fluttuazione della forza motrice

che costituiscono le principali cause di vibrazioni del motore.

In sostanza le forze agenti nel motore variano periodicamente e il risultato è che il motore acquista un moto vibratorio.

Per questo motivo il tenditore deve assorbire tutte queste vibrazioni che arrivano dalla cinghia e in *Figura 3.2* si mostrano le forze e le coppie che ne derivano:

• C_M : Coppia della molla [Nm]

$$C_M = K_T \cdot (\theta_O + \theta)$$

dove:

- \triangleright K_T è il coefficiente di rigidezza della molla (main spring);
- ho θ_0 è l'angolo di oscillazione in posizione nominale (in θ_0 , $\theta=0$);
- C_A : Friction Torque assiale/Coppia di Attrito assiale [Nm]

$$C_A = \mu \cdot b \cdot N$$

dove:

- μ è il coefficiente di attrito tra molla a tazza e damper pad;
- ➤ b [mm] è il raggio medio della molla a tazza;
- ➤ N [N] è il *gap* della molla a tazza, ossia quanto quest'ultima viene più o meno compressa;
- C_I : Coppia dovuta alle inerzie

$$C_I = I \cdot \ddot{\theta}$$

dove:

- > I $[kg \cdot mm^2]$ è il momento di inerzia totale;
- \triangleright $\ddot{\theta}$ è l'accelerazione delle masse;
- R: Forza [N] risultante che si oppone alla forza F_{HL} ad una distanza ρ dal centro del bullone
- C_P : Friction Torque radiale/Coppia di Attrito radiale [Nm]

$$C_P = R \cdot \rho$$

dove:

- ho è raggio di circolo di attrito [mm] definito come $ho = \mu \cdot r_{pivot}$;
- \triangleright μ è il coefficiente di attrito tra pivot e boccola;
- $ightharpoonup r_{pivot}$ è il raggio [mm] del pivot;

Facendo un equilibrio alla rotazione e alla traslazione si avrebbe:

$$\begin{cases} F_{HL} \cdot e \cdot \sin \alpha = C_M + C_A + C_I + C_P \\ F_{HL} = R + F_I \end{cases}$$

 \triangleright e: working arm [mm];

 \succ F_I : forze di inerzia [N];

4 Design of Experiments (DOE)

Incorporando considerazioni statistiche nella progettazione degli esperimenti, si possono raggiungere i seguenti risultati:

• Riduzione dei tempi di sviluppo dei processi;

• Uso più efficiente delle risorse;

• Maggiore affidabilità dei processi;

Design of Experiments (DOE) è diventato uno delle tecniche statistiche per la progettazione degli esperimenti più conosciute degli anni '90 : è stato inventato come metodo per massimizzare le informazioni derivanti da dati sperimentali. In particolare, è un metodo statistico che permette la pianificazione, l'organizzazione degli esperimenti e quindi una corretta ed efficiente acquisizione dei dati.

Considerare la sperimentazione come una mera fase di prova volta a verificare se l'implementazione pratica di un nuovo processo/prodotto risponde effettivamente agli obiettivi fissati in fase di progettazione, può essere riduttivo. La sperimentazione infatti può portare valore aggiunto se pensata non solo come conferma di quanto previsto ma anche come potenziale fonte di opportunità di miglioramento non intuibili a priori.

Il metodo di sperimentazione tradizionale si basa sul seguente sequenza :

- Sviluppo di un'ipotesi teorica;
- Effettuazione di una prova volta a verificare tale ipotesi;
- Analisi dei risultati;
- Individuazione delle correzioni;
- Effettuazione di ulteriori prove;

Il ciclo si conclude con il raggiungimento di un risultato ritenuto adeguato. Se le informazioni teoriche possedute sono stabili e complete, l'approccio è rapido e soddisfacente.

Spesso però nell'ambiente industriale la complessità dei fenomeni impedisce il pieno controllo dei fattori sotto indagine e una conoscenza teorica completa: ciò significa che non sempre è nota a priori la relazione di causa-effetto tra i fattori che influiscono sul processo in esame e le variabili da ottimizzare. Per questo motivo, con l'utilizzo del DOE si possono

ottimizzare le tecniche di sperimentazione e si possono prendere in esame dei casi più complessi.

Il metodo DOE invece consta di 4 fasi principali (Figura 4.1) che verranno descritte di seguito.

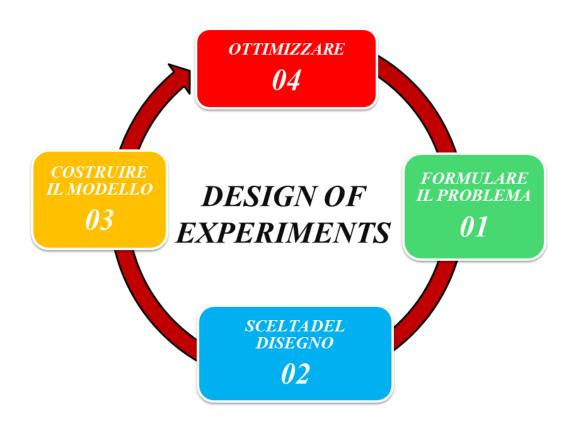


Figura 4.1 Le 4 fasi principali di un DOE

4.1 Formulazione del problema

La prima fase di una pianificazione sperimentale prevede la definizione del problema. In questa fase bisogna definire i seguenti aspetti:

• <u>Risposte</u>: sono le proprietà del sistema studiato che si vogliono ottimizzare. Le risposte misurate devono essere grandezze rappresentative delle proprietà di interesse e devono necessariamente essere fornite come valore numerico, anche quando la rilevazione è prevista secondo una scala qualitativa, questa deve essere trasformata opportunamente in una scala quantitativa affinchè i risultati possano essere sottoposti ad analisi.

- Fattori o variabili indipendenti: sono le variabili sperimentali che influenzano le risposte e che vengono fatte variare ad ogni esperimento. La scelta delle variabili è un delicato bilanciamento. Lo studio di molte variabili può comportare lo svolgimento di un numero elevato di esperimenti; d'altra parte, l'esclusione di alcune variabili rischierebbe di vanificare lo studio se queste risultassero importanti e molto influenti. Possono essere considerati come fattori sia variabili quantitative e qualitative.
- <u>Livelli</u>: i valori che può assumere ogni fattore controllabile sono definiti come livelli.
 Generalmente viene utilizzata una scala normalizzata in modo che ciascun fattore venga fatto variare nell'intervallo tra -1 e +1 mentre lo zero rappresenta il punto centrale.
- <u>Dominio sperimentale</u>: area sperimentale investigata, definita dagli intervalli in cui sono fatte variare le variabili sperimentali.

4.2 Scelta del disegno sperimentale

La seconda fase di una pianificazione DOE è la scelta del disegno più opportuno per il problema in esame. Al disegno scelto è associato il modello matematico che sarà utilizzato per descrivere il sistema.

• *Modello*: equazione matematica che mette in relazione i fattori con le risposte.

La definizione dell'obiettivo, ossia dello scopo di una sperimentazione, è fondamentale per determinare struttura del piano sperimentale. Qualora lo scopo sia estrarre dai dati le informazioni preliminari sul processo in esame allora sarà adottato un modello semplice in grado di fornire indicazioni di massima; se invece lo scopo è la ricerca di condizioni sperimentali ottimali allora il piano dovrà prevedere l'uso di un disegno in grado di fornire una descrizione dettagliata del sistema mediante un'equazione più flessibile, di grado superiore.

I disegni sperimentali si dividono in 3 categorie:

• <u>Screening</u>: ideale quando si studia un nuovo processo (o si mette a punto un nuovo metodo); alcune volte è possibile che non si sappia in anticipo quali, fra i tanti possibili fattori, possa avere effetto sulla risposta. Quindi si cerca di fare uno screening dei fattori più influenti. Con questo approccio si possono gestire un numero elevato di fattori, compreso tra 5 e 12.

- <u>Ottimizzazione</u>: richiede una maggiore conoscenza del dominio da esplorare e un'equazione più elastica (con termini di secondo grado) per poter modellare efficacemente la superficie di risposta. Solitamente vengono considerati 3 livelli per ogni fattore, ma si possono utilizzare anche 5 livelli.
- <u>Miscela</u>: i disegni di miscela consentono di indagare variabili che non sono intrinsecamente indipendenti. Nel caso in cui si volesse ottimizzare una formulazione le variabili vengono espresse in percentuali.

4.3 Acquisizione, analisi dei dati e definizione del modello

Una volta scelto il piano di sperimentazione si può procedere ad andare in laboratorio o sulla linea di produzione per effettuare le prove stabilite. Subito dopo è possibile fare l'analisi dei dati dando agli algoritmi di regressione la matrice sperimentale insieme ai valori della variabile di risposta. Per comprendere la validità del modello, un metodo efficace è quello di plottare i valori di risposta ottenuti dal modello insieme a quelli reali: se i valori di discostano molto (alti valori di residuo) o presentano andamenti particolari potrebbero essere stati fatti degli errori o trascurati alcuni effetti.

A questo punto, si è in grado di costruire la superficie di risposta, visualizzare graficamente quale sia la condizione di ottimo e valutarne la stabilità.

L'ottimizzazione, che è l'ultimo step del DOE (*Figura 4.1*), è quella fase in cui, non solo si va ad ottimizzare il proprio processo, ma si possono trasformare le nuove conoscenze in decisioni più efficaci e processi più innovativi per il futuro.

5 Preparazione delle prove da effettuare 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 sul comportamento elastodinamico del tendicinghia.

I parametri principali che descrivono il comportamento dinamico di un tendicinghia e che saranno di seguito presi in considerazione sono:

- Friction Torque, ossia quanto attrito in senso radiale ed assiale ci deve essere tra i
 diversi componenti del tenditore per smorzare gli effetti dinamici/vibratori che
 arrivano dalla cinghia;
- Coppia, riferita alla rigidezza della molla principale;
- Parallelismo tra i diversi componenti che costituiscono il tenditore (ad esempio, tra boccola e *pivot*);
- Off Set, ovvero la distanza tra il piano di serraggio del motore e piano della cinghia.

Il tenditore che è stato oggetto di studio era caratterizzato dall'avere un andamento iniziale della Friction Torque (senza distinzione tra assiale e radiale), in funzione del numero di cicli, mostrato di seguito :

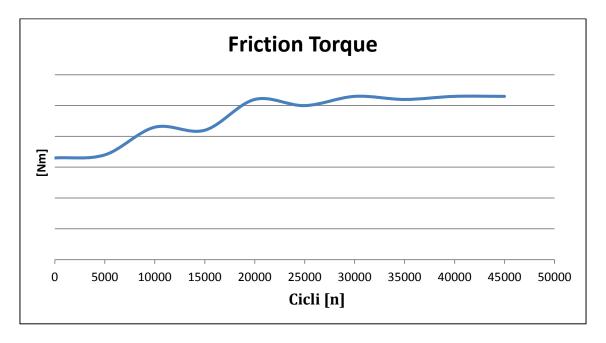


Figura 5.1 Andamento Friction Torque

Come si può notare nella *Figura 5.1*, la *Friction Torque* non è stabile inizialmente ma cresce rapidamente in modo non lineare fino a stabilizzarsi dopo un certo numero di cicli. Mentre la

crescita iniziale della *Friction Torque* è un fenomeno che si manifesta normalmente durante la fase di rodaggio e quindi consolidamento dei componenti, la crescita successiva non lo è.

Per cui, attraverso il DOE, si è cercato di capire quali fossero le cause di questa ulteriore varizione della *Friction Torque*, in particolare sono stati scelti alcuni fattori e sono state fatte delle prove in cui questi ultimi si sono fatti variare in modo tale da comprendere in che percentuale influenzassero l'andamento della *Friction Torque*.

Prima di andare ad analizzare questi fattori è importante dire che le prove sono state eseguite sempre nel reparto di Prototipia ed in particolare ad ogni prova il tenditore in esame è stato montato su una macchina di prova universale MTS (*Figura 5.2*), che è una macchina di prova servoidraulica con cella di carico utilizzata per test statici e a fatica (trazione, compressione, flessione) e prove di meccanica della frattura su provini ed elementi meccanici di diversa geometria e materiale.

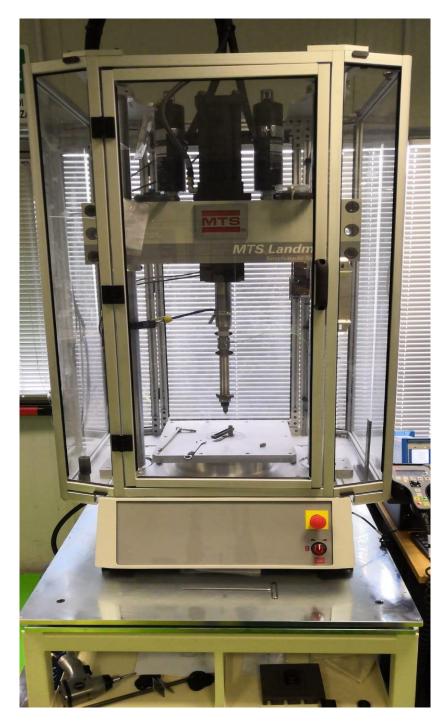


Figura 5.2 Macchina di prova servoidraulica

In questo specifico caso, è stato utilizzato un sistema da banco MTS Landmark Servohydraulic Test System (370.02) con le seguenti caratteristiche:

- Forza nominale dell'attuatore da 15 kN a 25 kN;
- Alloggiamento di provini di dimensioni da ridotte a standard (da 50 mm a 400 mm);
- Ampia spaziatura tra le colonne (circa 460 mm) per l'inserimento di dispositivi di fissaggio, camere ambientali e forni;

• Capacità di effettuare prove su materiali e bassa resistenza, dalla plastica all'alluminio;

Questo macchinario riproduce i movimenti e le vibrazioni che la cinghia di distribuzione trasmette al tendicinghia durante il moto di un'auto; in particolare, il braccio servoidraulico che si vede in *Figura 5.3*, impone una certa forza assiale al tenditore con una frequenza e un'ampiezza, ossia uno spostamento assiale, che vengono stabiliti dall'operatore a seconda delle esigenze.



Figura 5.3 Braccio servoidraulico su tenditore

Per la scelta dei fattori è stato molto importante comprendere come ogni singolo componente del tendicinghia potesse reagire a queste sollecitazioni, in particolare si è posta l'attenzione sugli accoppiamenti tra tutti i componenti, e quindi capire se tra questi ci fosse gioco o interferenza.

Come abbiamo visto nel paragrafo 3.1, tra le forze/coppie principali che caratterizzano il tendicinghia c'è quella che è stata indicata con C_A (Friction Torque assiale), che dipende sostanzialmente dalla molla a tazza.

Per prima cosa, sono state fatte delle prove in cui si è andato a cambiare il precarico della molla a tazza fino ad avere carico assiale nullo, e si è visto che l'andamento della *Friction Torque* rimaneva uguale, ossia il valore della *Friction Torque* misurato a fine rodaggio rimaneva troppo alto rispetto al valore della *Friction Torque* misurato a inizio rodaggio. Da questi primi test, quindi, si è capito che bisognava considerare l'attrito tra i diversi componenti solamente in senso radiale, e non assiale; per cui, andare a prendere in considerazione quello che nel paragrafo 3.1 è stato indicato con C_P , che dipende dal diametro del pivot e dall'accoppiamento tra pivot e boccola.

Per questo motivo il primo fattore che è stato scelto è il **Diametro del pivot**, e si sono presi in considerazione tre livelli che si discostano rispettivamente di 0.7%, 0.2%, 0.15% rispetto al valore nominale del diametro (*Tabella 1*).

Sono stati scelti altri 2 fattori che sono la **Frequenza** e l'**Ampiezza** di oscillazione del tensionatore in condizioni di funzionamento: per quanto riguarda i livelli della frequenza, si è passati da 10 Hz a 50 Hz perché rappresentano i limiti inferiore e superiore che generalmente si hanno in un'auto in diverse condizioni di funzionamento; invece, per quanto riguarda l'ampiezza e quindi lo spostamento assiale, sono stati scelti dei valori che rientrassero nei limiti costruttivi della macchina servoidraulica (in particolare il valore più alto dell'ampiezza).

Nella seguente tabella si possono individuare i 3 fattori che sono stati scelti e i 3 rispettivi livelli:

Frequenza [Hz]	Ampiezza [mm]	Diametro pivot [mm]
10	1.630	19.75
30	1.525	19.85
50	1.340	19.92

Tabella 1 Fattori e rispettivi Livelli

Essendo 3 il numero dei fattori e 3 quello dei rispettivi livelli, il numero delle prove che sono state eseguite è $3^3 = 27$.

6 Esecuzione delle prove

Una volta scelti i fattori ed i rispettivi livelli, si è potuti passare allo svolgimento delle prove sulla macchina servoidraulica. Come detto precedentemente, sono state effettuate 27 prove in cui si è fatto variare il livello di ogni singolo fattore: bisogna tener conto che tra alcuni componenti del tenditore (puleggia-cuscinetto, cuscinetto-arm, arm-boccola) vi sono degli accoppiamenti forzati e di conseguenza, ad ogni prova, si è smontato il tenditore e sono stati montati componenti nuovi. Questo per evitare che l'usura dei componenti tra loro a contatto influenzasse in modo negativo le prove successive. Le prove sono state effettuate montando il tenditore sulla macchina servoidraulica in cui sono state impostate:

- 1) Ampiezza [mm], ossia spostamento del braccio nella direzione verticale;
- 2) Frequenza [Hz] di oscillazione del braccio servoidraulico;
- 3) Il numero di cicli da effettuare;

Le condizioni assunte durante le prove sono state le seguenti:

- Temperatura di misura = costante (25°C<T<30°C);
- Spazio percorso dalla boccola = costante (come condizione stabile si è assunto 20Hz a
 +/- 25 gradi a n=30000 cicli);

Lo spazio percorso è calcolato in questo modo:

$$m = \left(2 \cdot r_p \cdot \pi\right) \cdot n \cdot A \cdot \left(\frac{4}{360}\right) [mm]$$

Dove:

- $ightharpoonup r_p$ è il raggio del pivot [mm];
- \triangleright n è il numero di cicli;
- ➤ A è l'ampiezza espressa in gradi;

Ad ogni prova sono state calcolate Friction Torque e Coppia sia all'inizio che alla fine dei cicli prevvisti perché, come è stato detto, la grandezza di interesse è il Delta Friction Torque. Ogni misura fatta dalla macchina servoidraulica è stata eseguita secondo una modalità standard che è la seguente:

- 1) 210 cicli a 30 Hz;
- 2) Data acquisition;
- 3) 3 cicli a 0.1 Hz;
- 4) Data acquisition;
- 5) Data elaboration;

Nei punti 2 e 4 vengono acquisiti dalla macchina i dati di Forza dell'attuatore e spostamento che vengono plottati su grafico Load[N] Vs Movement[mm] (*Figura 6.1*).

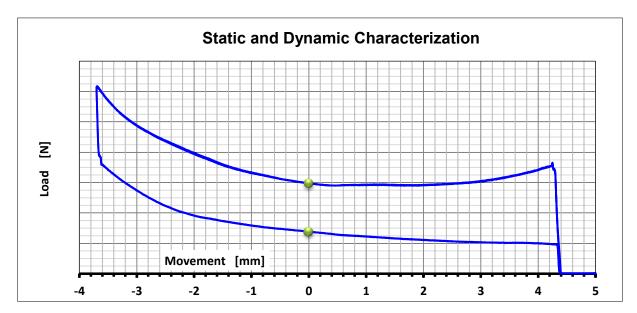


Figura 6.1 Load Vs Movement

I 2 pallini verdi di *Figura 6.1*, che rappresentano i punti di Forza max e Forza min nella posizione nominale del tenditore (spostamento uguale a zero), vengono presi in considerazione dalla macchina e nel punto 5 vengono elaborati su un foglio di lavoro excel e vengono trasformati in Torque[Nm] Vs Diff.Angle[deg], *Figura 6.2*, secondo opportune formule che derivano dalla geometria del tenditore.

La coppia T viene calcolata in questo modo:

$$T = [(T_{MAX} + T_{MIN})/2] \cdot \sin 0.0025$$

Dove 0.0025m rappresenta il braccio di lavoro (working arm).

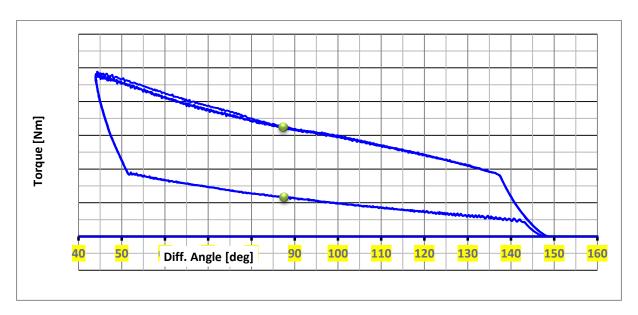


Figura 6.2 Torque Vs Diff.Angle

La *Friction Torque* **D** invece viene calcolata, sempre nella posizione nominale, nel seguente modo:

$$D = ([T_{MAX} - T_{MIN})/2] \cdot \sin 0.0025$$

7 Analisi risultati

Come abbiamo detto nel Capitolo 4, per effettuare un'analisi DOE si ha bisogno di un valore critico che, consiste in una grandezza rappresentativa della proprietà di interesse e che necessariamente deve essere fornita come valore numerico. La risposta che , in questo studio, è stata presa in considerazione è il ΔF_T , ossia la differenza tra il valore di *Friction Torque* misurato alla fine dei cicli e il valore misurato a numero di cicli pari a zero.

Nella *Tabella 2* si vedono i risultati per tutte le 27 prove:

Frequenza [Hz]	Ampiezza [mm]	Diametro pivot [mm]	Cicli	Delta Friction Torque [Nm]
Fattore A	Fattore B	fattore C	[n]	Risposta
10	1.34	19.75	23437	0,45
10	1.34	19.85	23437	0,39
10	1.34	19.92	23437	0,43
10	1.525	19.75	20270	0,3
10	1.525	19.85	20270	0,35
10	1.525	19.92	20270	0,23
10	1.63	19.75	17857	0,26
10	1.63	19.85	17857	0,45
10	1.63	19.92	17857	0,55
30	1.34	19.75	23437	0,42
30	1.34	19.85	23437	0,39
30	1.34	19.92	23437	0,55
30	1.525	19.75	20270	0,12
30	1.525	19.85	20270	0,49
30	1.525	19.92	20270	0,5
30	1.63	19.75	17857	0,13
30	1.63	19.85	17857	0,2
30	1.63	19.92	17857	0,49
50	1.34	19.75	23437	0
50	1.34	19.85	23437	0,04
50	1.34	19.92	23437	0,35
50	1.525	19.75	20270	0,06
50	1.525	19.85	20270	0,07
50	1.525	19.92	20270	0,24
50	1.63	19.75	17857	0,13
50	1.63	19.85	17857	0,72
50	1.63	19.92	17857	0,04

Tabella 2 Risposta per tutte le 27 prove

Tutti questi risultati sono stati inseriti ed analizzati nel programma Minitab¹.

Di seguito verranno riportati ed analizzati tutti i risultati che sono stati ottenuti su Minitab.

_

¹ Minitab è il Software di Analisi Statistica per il Controllo Qualità, utilizzato per analizzare i dati e migliorare i processi. Minitab, oltre disporre di tutti gli strumenti necessari per analizzare in modo efficace i dati, aiuta a trovare soluzioni significative ai problemi aziendali più complessi, è lo standard per le metodologie Six Sigma e Lean Six Sigma 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

Il primo step 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) di 0,05. Un livello di significatività di 0,05 indica un rischio del 5% di concludere che un'associazione esiste quando non esiste un'effettiva associazione, quindi una bassa probabilità di commettere errore affermando che il fattore non è statisticamente significativo.

• P-Value $\leq \alpha$: l'associazione è statisticamente significativa.

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

• P-Value > α : 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.

Nella *Figura 7.1* si vede come il P-Value abbia un valore molto basso (grafico in alto a sinistra) : questo vuol dire che sicuramente un fattore è significativo.

Sotto quest'ultimo grafico, si nota che un valore chiamato *R-sq*, più comunemente R² (misura la somma delle differenze al quadrato tra il modello e i punti sperimentali), sia uguale a 62,43%. Questo valore deve essere il più alto possibile: dà una misura della percentuale di variazione spiegata dal modello (più è grande e meglio il modello sta spiegando la variazione dei dati). *R-sq* è sempre tra 0% e 100% : aumenta quando si aggiungono predittori aggiuntivi ad un modello. Ad esempio, il miglior modello a cinque predittori avrà sempre un *R-sq* alto almeno quanto il miglior modello a quattro predittori. Pertanto, *R-sq* è utile quando si confrontano modelli della stessa dimensione.

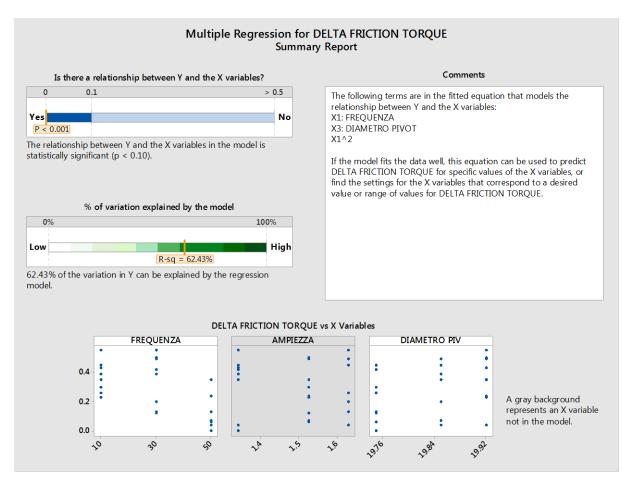


Figura 7.1 P-Value e R-sq significativi

Nella *Figura 7.2* viene mostrata l'influenza dei singoli fattori sulla risposta. In particolare, nel grafico a sinistra, si prende in considerazione un altro coefficiente chiamato *R-sq*(adjusted), meglio conosciuto come R² corretto o aggiustato, che rappresenta una variante del R² semplice. Mentre R² semplice viene utilizzato per l'analisi di regressione lineare semplice come indice di bontà della curva di regressione , R² corretto viene utilizzato per l'analisi di regressione lineare multipla, in particolare viene utilizzato quando si desidera confrontare modelli con numeri diversi di predittori. *R-sq*(adj) deve essere il più alto possibile ed aumenta sempre quando si aggiunge un predittore al modello, anche quando non c'è un miglioramento reale nel modello.

Sia nel grafico a sinistra, in cui si ha il valore di R-sq(adj) per ogni fattore, ma soprattuto in quello a destra, si vede quale fattore sia più influente sulla risposta: il fattore Frequenza risulta essere molto influente così come il fattore Diametro Pivot (anche se in misura inferiore); mentre invece, il fattore Ampiezza risulta essere statisticamente non influente.

In generale però, quando si interpretano i valori di R-sq, bisogna considerare i seguenti punti:

- I campioni poco numerosi non forniscono una stima precisa della forza della relazione tra risposta e predittori;
- *R-sq* è solo una misura di quanto bene il modello si adatta ai dati. Anche quando un modello ha un *R-sq* alto, è necessario verificare i grafici residui per verificare che il modello soddisfi i presupposti del modello stesso.

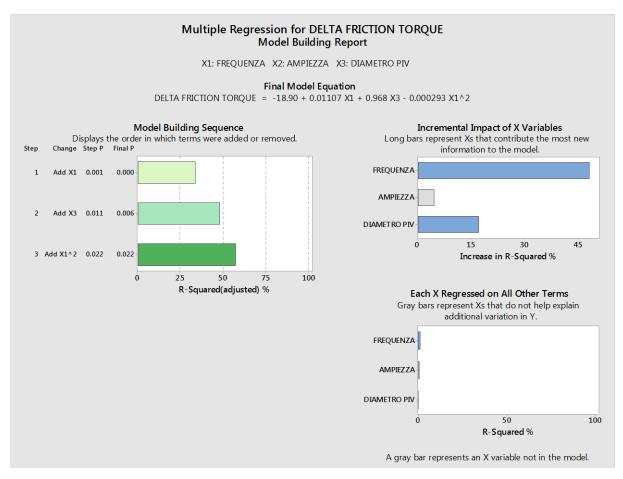


Figura 7.2 Influenza di ogni fattore sulla risposta

Per questo motivo, è importante analizzare il grafico di *Figura 7.3*. 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 di Figura 7.3, *Residuals - Fitted Values*, 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 nessun tendenza particolare e sembrano essere distribuiti

casualmente intorno allo zero: possiamo affermare che il modello è adeguato e soddisfa le ipotesi dell'analisi.

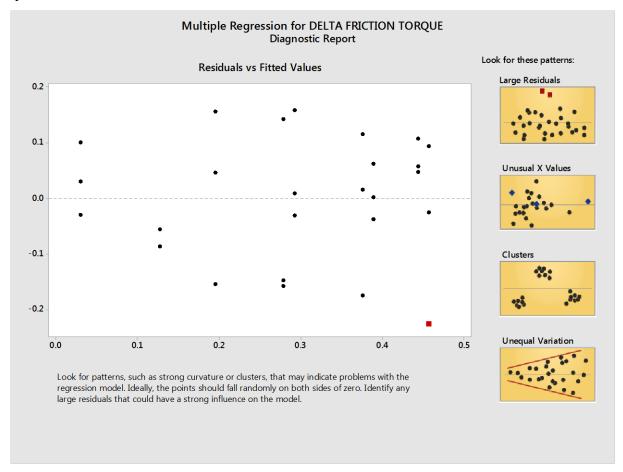


Figura 7.3 Analisi dei Residui

Questi grafici appena visti suggeriscono che il modello indicato dalle equazioni di funzionamento, come è stato detto, è adeguato e che i risultati che sono stati ottenuti hanno una certa validità: questo è stato visto soprattutto nei grafici dei residui. Quindi, a questo punto si può passare ad un analisi più dettagliata e capire quali di questi fattori, e la loro interazione, siano influenti sulla Risposta.

Nella *Figura 7.4*, per prima cosa, si può notare quanto cambia la Risposta in funzione di ogni singolo fattore. In particolare, in questo grafico, si dimostra quello che è stato detto precedentemente: il fattore Ampiezza è quello che risulta meno influente sulla Risposta (l'andamento della linea rossa è quasi costante al variare dei livelli dell'Ampiezza). Per gli altri 2 fattori, invece, si nota come, al variare dei rispettivi livelli, la linea rossa vada ad aumentare o diminuire: all'aumentare del diametro del pivot (da 19,75 a 19,92 mm) il ΔF_T aumenta; mentre invece all'aumentare della frequenza (da 10 a 50 Hz) il ΔF_T diminuisce.

Altro aspetto importante di questo grafico, è vedere la variabilità della Risposta in funzione dei fattori ossia vedere la distribuzione dei punti blu lungo l'asse delle ordinate.

Prendendo in considerazione il fattore Ampiezza, che è quello che influisce di meno sulla Risposta, si nota come i punti blu abbiano un ampio intervallo di variabilità soprattutto per i livello 1,4 e 1,6: la Risposta passa da valori molto basi a valori molto alti.

Un discorso opposto si può fare, ad esempio, per il livello 10 e 50 della frequenza: il range di variabilità della Risposta è molto piccolo (i punti blu sull'asse delle ordinate sono molto vicini tra di loro). Per quanto riguarda il fattore Diametro Pivot si ha un piccolo intervallo di variabilità soprattutto per il livello più basso, 19,75 mm.

Quindi già da questo grafico si può dire che la condizione migliore e quindi un ΔF_T piccolo si ha per il valore più piccolo del diametro pivot e per il valore più alto della frequenza.

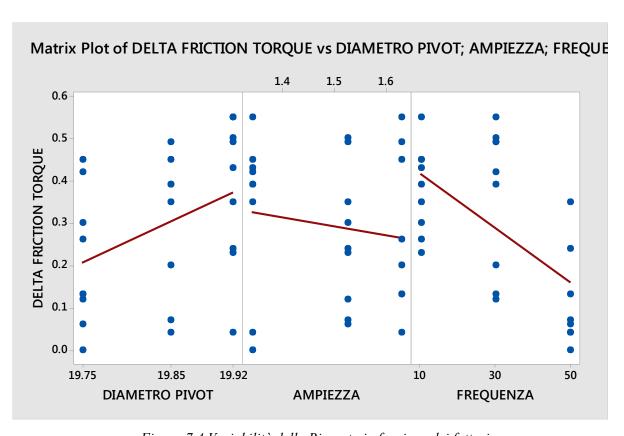


Figura 7.4 Variabilità della Risposta in funzione dei fattori

Nella Figura 7.5 viene mostrato quello che si chiama Grafico di Pareto degli effetti.

Questo grafico viene utilizzato per confrontare la grandezza relativa e il significato statistico degli effetti principali e della loro interazione. Il grafico mostra il tipo di effetto come segue:

- Se il modello non include un termine di errore, il grafico visualizza il valore assoluto degli effetti non standardizzati.
- Se il modello include un termine di errore, il grafico visualizza il valore assoluto degli effetti standardizzati.

Minitab traccia gli effetti nell'ordine decrescente dei loro valori assoluti. La linea di riferimento sul grafico indica quali effetti sono significativi. Per impostazione predefinita, minitab utilizza un livello di significatività di 0,05 per tracciare la linea di riferimento.

Nei risultati di *Figura 7.5*, solo il fattore A (Frequenza) è statisticamente significativo perché si estende più lontano. L'effetto del fattore Ampiezza con l'interazione del fattore Diametro del Pivot è il più piccolo perché si estende di meno.

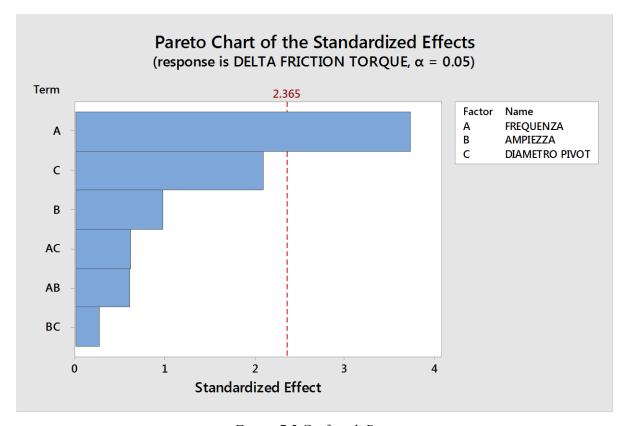


Figura 7.5 Grafico di Pareto

Dal momento che le interazioni non sono significative, vengono tolte dal modello una alla volta e viene fatto nuovamente il grafico di Pareto per ogni nuova condizione. L'eliminazione delle interazioni non significative avviene con la sequenza indicata di seguito:

- 1) BC (*Figura 7.6*);
- 2) AB (*Figura 7.7*);
- 3) AC (Figura 7.8);

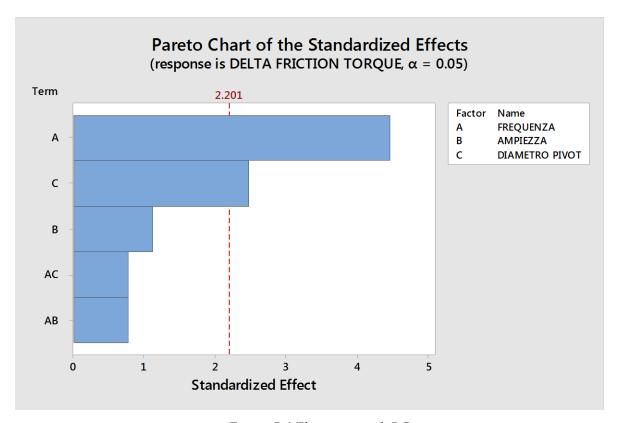


Figura 7.6 Eliminazione di BC

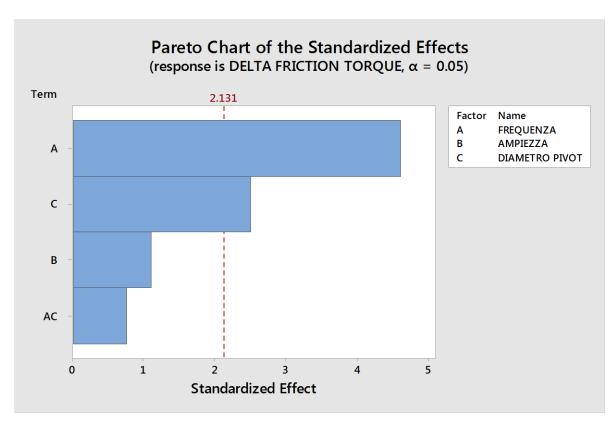


Figura 7.7 Eliminazione di AB

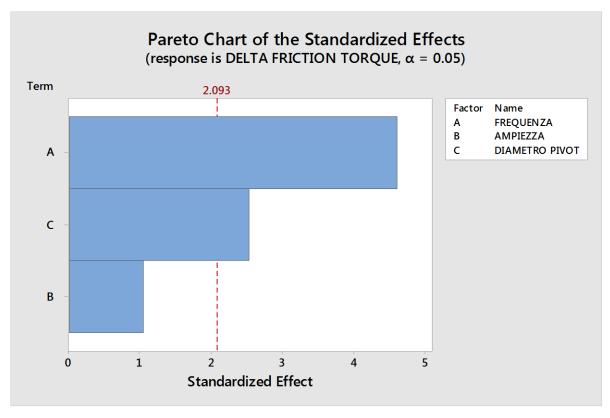


Figura 7.8 Eliminazione di AC

Dalla *Figura 7.8* si vede che, alla fine, gli unici 2 fattori significativi sono la Frequenza e il Diametro del Pivot. Per cui, viene confermato e verificato quello che è stato detto all'inizio dell'analisi.

Proprio per questo motivo, prendendo in considerazione i 2 fattori principali, è stato fatto il Grafico di Contorno (*Figura 7.9*): questo grafico viene utilizzato per vedere come una variabile di risposta si riferisce a due variabili predittive. Un grafico di contorno fornisce una vista bidimensionale i cui tutti i punti che hanno la stessa risposta sono collegati per produrre delle linee di contorno di risposte costanti. I grafici di contorno sono utili per lo studio dei valori di risposta desiderabili e delle condizioni operative.

Un grafico di contorno contiene i seguenti elementi:

- Predittori sugli assi x ed y;
- Linee di contorno che collegano punti con lo stesso valore di risposta;
- Bande di contorno colorate che rappresentano intervalli dei valori di risposta.

Il grafico di *Figura 7.9* mostra la relazione tra i fattori Diametro Pivot e Frequenza per andare a individuare i valori di ΔF_T in ogni punto del grafico. Le regioni più scure indicano un valore di ΔF_T maggiore, e quindi una condizione sfavorevole.

La condizione migliore si ha nella parte alta, a sinistra, del grafico: zone rappresentate da valori alti di Frequenza e valori più o meno bassi del Diametro Pivot.

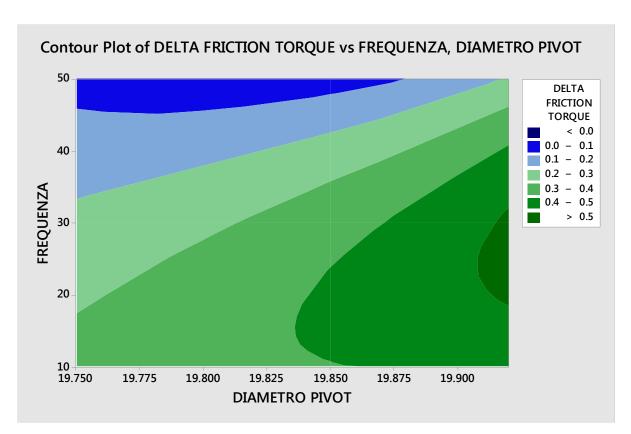


Figura 7.9 Grafico di Contorno

8 Conclusioni

Il seguente lavoro ha cercato di rispondere alla domanda: "Quali parametri, e in che misura, influenzano il comportamento elastodinamico di un tendicinghia commerciale?". A tal fine, è stata fatta un'analisi DOE, che ha mostrato:

- Dei 3 Fattori presi in considerazione, solo Frequenza e Diametro Pivot influenzano il comportamento elastodinamico del tenditore;
- La condizione per un funzionamento ottimale è rappresentata da una frequenza di 50
 Hz e un diametro del pivot di 19.75mm.

Inoltre i risultati hanno dimostrato che una condizione accettabile è rappresentata dall'avere un diametro pivot di 19.75 mm e frequenze che vanno da 10 a 50 Hz. Naturalmente questo è da riferire ad una certa condizione di funzionamento e quindi stabilire se, per dette condizioni di funzionamento, è possibile accettare un certo range di Delta Friction Torque.

Una possibile spiegazione di tali risultati può essere fornita dalle seguenti considerazioni:

- ➤ Fra i 3 livelli di Diametro Pivot, 19.75 mm è quello che tende a far funzionare correttamente il tenditore. Questo può essere dovuto al fatto che, essendo il diametro più piccolo, la superficie di contatto è minore che si traduce in minor attrito, minor usura. Non è consigliabile utilizzare diametri pivot più piccoli di 19.75mm in quanto il gioco tra pivot e boccola sarebbe troppo elevato e potrebbero nascere fenomeni dannosi per il tenditore.
- ➤ Il tenditore si comporta meglio ad una frequenza di 50 Hz. Bisogna tener conto che i componenti del tenditore in esame sono, nella maggior parte, lubrificati da olio e questo può portare, ad alte frequenze e quindi alte velocità, ad una diminuzione del coefficiente di attrito tra queste superfici lubrificate.

Una raccomandazione per ulteriori ricerche future potrebbe essere quella di effettuare un'analisi può approfondita, andando ad eseguire delle prove anche ad un numero di cicli maggiore rispetto a quello preso in considerazione in questo studio. Questo per verificare che il comportamento del tenditore sia corretto anche nei cicli successivi.

9 Bibliografia

- [1] Taguchi, Genichi, "System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs", New York: Unipub Kraus; Dearborne: American Supplier Institute; 1987.
- [2] Fisher, Ronald A. "The design of experiments", Edinburgh; London: Oliver and Boyd, 1960.

10 Sitografia

- [1] http://www.gmsl.it/getting-started-with-minitab-17/
- [2] https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/getting-started/designing-an-experiment/