

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



Analisi agli ordini del fenomeno di judder su una sospensione automobilistica

Relatore: Prof. Francesco BOCCIOLONE

Co-relatore: Ing. Francesco CUCCHI

Tesi di Laurea di:

Fabio OLIVARES Matr. 734302

Anno Accademico 2010 - 2011



## Indice

INTRODUZIONE.....	13
INTRODUCTION.....	14
1 FENOMENI VIBRATORI DEI FRENI.....	15
1.1 Funzionamento dell'impianto frenante.....	15
1.1.1 Il freno a disco.....	16
1.1.2 Il freno a tamburo.....	20
1.1.3 La pompa del freno.....	21
1.2 Le vibrazioni del freno a disco.....	22
1.2.1 Judder.....	25
1.2.2 Groan, grunt, grind e moan.....	25
1.2.3 Fischi.....	25
1.3 Il judder.....	26
1.3.1 Il disco e le variazioni di forma.....	28
1.3.2 Le pastiglie, la distribuzione di pressione e il coefficiente d'attrito.....	29
1.3.3 Usura differenziale.....	30
1.3.4 Superfici a contatto non costanti.....	30
1.3.5 Sospensione.....	30
1.3.6 Variazioni nel tempo.....	31
2 JUDDER BREMBO.....	33
2.1 Considerazioni preliminari.....	33
2.2 L'interfaccia.....	36
2.3 Gestione componenti.....	38
2.3.1 Inserimento di un nuovo componente.....	38
2.3.2 Apertura di un componente esistente.....	41
2.3.3 Apertura di un assieme.....	41
2.3.4 Opzioni della visualizzazione dei componenti.....	41
2.4 Gestione degli accelerometri e dei loro segnali.....	43
2.5 Elaborazione dati.....	46
2.5.1 Correzione dei ritardi: la crosscorrelazione.....	47
2.5.2 Divisione in slice e FFT.....	49
2.5.3 Scalatura dei segnali.....	52
2.5.4 Ricostruzione degli spostamenti in base all'ordine.....	53
2.5.5 Finestra di lancio dell'elaborazione.....	55
2.6 Gestione dell'animazione.....	56
2.7 Visualizzazione risultati.....	57
2.7.1 Spettrogramma.....	58
2.7.2 Spettri.....	59
2.7.3 Segnali.....	60
2.7.4 Esportazione in un foglio di calcolo.....	60
2.8 Test del programma.....	61

## Indice

---

2.8.1	Dati di partenza.....	61
2.8.2	Buon funzionamento del programma.....	62
2.8.3	Risoluzione in frequenza.....	64
2.8.4	Influenza del leakage.....	64
2.9	Schema riassuntivo dell'elaborazione dati.....	66
3	TEST AL BANCO.....	69
3.1	Il banco e l'assieme freno/sospensione.....	69
3.2	Il sistema di acquisizione dati.....	72
3.2.1	Accelerometri.....	72
3.2.2	Vibrometro laser.....	74
3.2.3	Termocamera a raggi infrarossi.....	75
3.2.4	Sensori di pressione e torsionmetro.....	76
3.3	La procedura.....	79
3.4	Raccolta dati per Judder Brembo.....	81
3.4.1	Posizione punti e accelerometri.....	81
3.4.2	Esecuzione prove.....	86
3.5	Raccolta dati termocamera.....	86
3.6	Raccolta dati vibrometro.....	86
3.7	Raccolta dati pressioni e coppie.....	87
4	RISULTATI DELLE PROVE.....	89
4.1	Accelerometro di riferimento.....	89
4.2	Temperature in pastiglia.....	91
4.3	Prime conclusioni e indicazioni per il prosieguo.....	92
5	ANALISI APPROFONDATA DELLE FRENATE CRITICHE.....	95
5.1	Disco.....	95
5.1.1	Temperature.....	95
5.1.2	Vibrometria.....	99
5.2	Pinza.....	101
5.2.1	Vibrometria.....	102
5.2.2	Judder Brembo.....	109
5.3	Sospensione.....	113
5.3.1	Vibrometria del fusello.....	113
5.3.2	Judder Brembo sul fusello.....	115
5.4	Triangolo inferiore.....	119
5.5	Triangolo superiore.....	121
5.6	Braccio laterale.....	123
5.7	Assemblato complessivo.....	124
6	CONCLUSIONI.....	127
6.1	Judder Brembo.....	127
6.2	Studio del judder.....	128
APPENDICE 1: POSIZIONE ACCELEROMETRI.....		131
Triangolo superiore.....		131
Triangolo inferiore.....		131

*Indice*

---

Braccio laterale.....	132
Pinza.....	133
Fusello.....	134
Bibliografia.....	137



## Indice figure

Figura 1.1: Impianto frenante.....	15
Figura 1.2: Freno a disco.....	17
Figura 1.3: Freno a disco con pinza flottante.....	17
Figura 1.4: Pastiglie per freni a disco.....	19
Figura 1.5: Freno a tamburo.....	20
Figura 1.6: Pompa tandem per impianti frenanti.....	21
Figura 1.7: Ampiezza oscillazione a varie frequenze.....	23
Figura 1.8: Tubo oscillante al 1° modo di vibrare.....	24
Figura 1.9: Tubo oscillante al 2° modo di vibrare.....	24
Figura 1.10: Spettrogramma di un fenomeno judder.....	27
Figura 2.1: Test al banco.....	33
Figura 2.2: Accelerometri sul fusello.....	34
Figura 2.3: Interfaccia del programma con un assieme già caricato.....	36
Figura 2.4: Schema di un componente.....	39
Figura 2.5: Interfaccia per l'inserimento di nuovi componenti.....	40
Figura 2.6: Finestra delle opzioni di visualizzazione.....	42
Figura 2.7: Componente con due accelerometri.....	43
Figura 2.8: Finestra per l'inserimento delle posizioni degli accelerometri.....	44
Figura 2.9: Finestra per gestire i file dei set.....	44
Figura 2.10: Finestra per assegnare un segnale ad ogni accelerometro.....	46
Figura 2.11: Crosscorrelazione di due segnali.....	48
Figura 2.12: Finestra di Hamming.....	51
Figura 2.13: Confronto tra finestrazione rettangolare e Hamming.....	51
Figura 2.14: Accelerazioni registrate durante un fenomeno di judder.....	52
Figura 2.15: Ordini nella FFT di una slice di tempo.....	54
Figura 2.16: Finestra impostazioni elaborazione dati.....	55
Figura 2.17: Finestra opzioni dell'animazione.....	56
Figura 2.18: Finestra visualizzazione dati.....	58
Figura 2.19: Visualizza FFT.....	60
Figura 2.20: Piastrine per il test.....	62
Figura 2.21: Animazione di tutti gli ordini.....	63
Figura 2.22: FFT con alta risoluzione in frequenza.....	63
Figura 2.23: FFT con bassa risoluzione in frequenza.....	63
Figura 2.24: Elaborazione dei segnali di riferimento.....	66
Figura 2.25: Elaborazione degli altri segnali in base a quanto ricavato da quelli di riferimento.....	67
Figura 3.1: Schema costruttivo di un banco prova.....	70
Figura 3.2: Installazione della sospensione e del freno al banco.....	71
Figura 3.3: Accelerometro.....	72
Figura 3.4: Acquisitore.....	72

## *Indice figure*

---

Figura 3.5: Funzionamento di un accelerometro a taglio.....	73
Figura 3.6: Vibrometro.....	74
Figura 3.7: Funzionamento di un vibrometro.....	74
Figura 3.8: Installazione termocamera.....	76
Figura 3.9: Schema elettrico del ponte di Wheatstone.....	77
Figura 3.10: Rosetta di estensimetri.....	78
Figura 3.11: Schema costruttivo di un torsionmetro.....	79
Figura 3.12: Modello in Patran.....	81
Figura 3.13: Sistema di riferimento al banco.....	82
Figura 3.14: Triangolo superiore.....	83
Figura 3.15: Triangolo inferiore.....	83
Figura 3.16: Braccio laterale.....	84
Figura 3.17: Fusello.....	84
Figura 3.18: Pinza.....	85
Figura 3.19: Modello in Judder Brembo.....	85
Figura 3.20: Pinza con i due trasduttori di pressione installati ai lati.....	87
Figura 4.1: Segnali dell'accelerometro di riferimento per le frenate a 2,5bar.....	89
Figura 4.2: Segnali dell'accelerometro di riferimento per le frenate a 5bar.....	90
Figura 4.3: Grafico andamento temperature.....	92
Figura 5.1: Fotogramma dal video ripreso dopo i preriscaldi.....	95
Figura 5.2: Fotogramma dal video ripreso dopo le frenate a 2,5bar.....	97
Figura 5.3: Disco dopo il test con le due zone più sporche a 180° l'una dall'altra e sfasate di 90° tra i due lati.....	97
Figura 5.4: Schematizzazione di un disco bilobato.....	98
Figura 5.5: FFT della velocità del disco lungo l'asse di rotazione.....	99
Figura 5.6: Due fotogrammi con velocità massima e minima del disco nella direzione assiale a 38,75Hz.....	100
Figura 5.7: Fotogrammi con massimo e minimo della velocità assiale a 76Hz.....	100
Figura 5.8: FFT della velocità radiale del disco.....	101
Figura 5.9: Fotogrammi della massima e minima velocità di deformazione radiale del disco a 76Hz.....	101
Figura 5.10: FFT della velocità assiale delle pastiglie.....	102
Figura 5.11: Fotogrammi del massimo e minimo presi dall'animazione dello spostamento assiale delle pastiglie al 4° ordine.....	103
Figura 5.12: Pinza con le quattro massette evidenziate.....	103
Figura 5.13: Andamento pressioni nei due lati della pinza.....	104
Figura 5.14: Grafico dell'andamento della pressione del fluido frenante alla pompa.....	105
Figura 5.15: Grafico dell'andamento della coppia frenante.....	106
Figura 5.16: FFT delle velocità della pinza in direzione assiale.....	107
Figura 5.17: Fotogrammi della velocità massima e minima della pinza al 4° ordine.....	107
Figura 5.18: Fotogrammi della velocità massima e minima della pinza al 2° e 6°	



## *Indice figure*

---

ordine.....	108
Figura 5.19: FFT della velocità della pinza in senso radiale.....	108
Figura 5.20: Fotogrammi di massimo e minimo spostamento del primo modo di vibrare radiale della pinza.....	109
Figura 5.21: Fotogrammi dello spostamento massimo e minimo del secondo modo di vibrare radiale della pinza.....	109
Figura 5.22: Andamento del segnale di riferimento durante la 4° frenata.....	110
Figura 5.23: FFT dell'accelerometro 9 della pinza (asse y).....	110
Figura 5.24: Fotogrammi del massimo e minimo spostamento in senso radiale della pinza in Judder Brembo.....	111
Figura 5.25: Fotogrammi dello spostamento radiale della pinza secondo il 4° ordine in Judder Brembo.....	112
Figura 5.26: Fotogrammi degli spostamenti assiali della pinza in Judder Brembo.....	112
Figura 5.27: FFT degli spostamenti assiali della pinza calcolata da Judder Brembo.....	113
Figura 5.28: FFT degli spostamenti radiali del fusello.....	114
Figura 5.29: Fotogrammi del massimo e minimo spostamento del fusello e di parte del triangolo superiore.....	114
Figura 5.30: FFT dell'accelerometro 9 del fusello.....	115
Figura 5.31: Fotogrammi presi dal video degli spostamenti del fusello.....	116
Figura 5.32: Elasticità dell'attacco radiale della pinza.....	116
Figura 5.33: Spaccato di una giunzione con inserti in gomma.....	118
Figura 5.34: FFT del segnale dell'accelerometro 18 del triangolo inferiore.....	119
Figura 5.35: Fotogrammi dello spostamento massimo e minimo del triangolo inferiore secondo Judder Brembo.....	119
Figura 5.36: FFT del segnale dell'accelerometro 11 del triangolo inferiore.....	120
Figura 5.37: Silent-block con la parte in teflon colorata di giallo.....	121
Figura 5.38: FFT del segnale dell'accelerometro di riferimento.....	122
Figura 5.39: Fotogrammi dello spostamento massimo e minimo del triangolo superiore.....	123
Figura 5.40: FFT del segnale dell'accelerometro 2 del braccio laterale.....	123
Figura 5.41: Fotogrammi provenienti dall'animazione del braccio laterale.....	124
Figura 5.42: Movimenti dell'assemblato con primo piano sulla pinza e il fusello.....	125
Figura 5.43: Movimenti del fusello e del triangolo superiore.....	125
Figura 5.44: Movimenti di fusello e triangolo inferiore.....	126



## **Indice tabelle**

Tabella 2.1: Bottoni presenti nell'interfaccia principale.....	36
Tabella 3.1: Procedura Motorway.....	80
Tabella 4.1: Temperature all'inizio e alla fine delle frenate.....	91
Tabella 5.1: Picchi raggiunti dagli accelerometri del fusello.....	117



## **INTRODUZIONE**

L'automobile è ormai un bene sempre più irrinunciabile e, nei Paesi industrializzati, ogni famiglia ne ha minimo una. All'inizio della sua commercializzazione era uno status symbol, perché solo le persone più abbienti potevano permettersela, mentre ora è un fenomeno di massa.

Al giorno d'oggi le auto sono un concentrato di tecnologia perché si cerca di migliorare sempre di più il prodotto modificandone alcune caratteristiche. Si pensi a quanto si è fatto, e si continua a fare, per ridurre l'impatto ambientale e la sicurezza, oppure per migliorare sempre più il comfort di viaggio.

Questo lavoro di tesi si basa proprio su quest'ultimo aspetto e, più marginalmente, sulla sicurezza. Il judder è un fenomeno che interessa l'impianto frenante e risulta molto spiacevole, oltre che pericoloso. Le forti vibrazioni emesse sono fastidiose e chi guida potrebbe spaventarsi pensando che ci sia qualche serio problema sull'auto.

Il Laboratorio Comfort di Brembo S.p.A, luogo dove è stato redatto questo elaborato e dove sono stati svolti tutti i test in esso riportati, ha proprio il compito di studiare questi fenomeni. Si va dal fischio alla vibrazione vera e propria durante la frenata.

Lo scopo principale è scrivere un software che sia in grado di riprodurre, con un'animazione, il movimento di un sistema meccanico durante un fenomeno vibratorio. I dati in ingresso proverranno dal campo. L'utente potrà anche analizzare in profondità i dati attraverso spettrogrammi e spettri, oltre che esportare i risultati su un foglio di calcolo.

Il programma può essere usato per tutti i fenomeni che sviluppano una vibrazione registrabile con gli accelerometri. Il judder è uno di questi.

Mentre nella prima parte dell'elaborato si parlerà di più della stesura degli script di Matlab costituenti il programma, nella seconda ci si concentrerà sul test al banco e sui risultati prodotti. Sarà descritta la prova con una sospensione che presenta questo problema e, oltre a caratterizzare le vibrazioni in tutta la struttura con accelerometri, verrà usato anche un vibrometro laser e una termocamera per studiare più da vicino il fenomeno.

### **Parole chiave**

Deformata operativa, analisi agli ordini, judder, sistema frenante, vibrazioni, elaborazione dati

## **INTRODUCTION**

Car is a good more and more necessary and, in industrialized States, every families have minimum one of it. In the beginning of its commercialization, it was a status symbol, because only richer people could permit it, but now it's a mass phenomenon.

Today cars are a concentrate of technology because the research of improvements is continue and some characteristics are modified continuously. It is enough to think about what has been done, and what is kept to be done, to reduce the environment impact and security, or to improve travels' comfort.

This thesis is based on this last aspect and, marginally, on security. Judder is a phenomenon that interests brake systems and it's very unpleasant and dangerous. Strong vibrations emitted from it are annoying, and who drive can get frightened thinking that there would be a serious problem on his car.

The Comfort Laboratory in Brembo S.p.A, the place where this work has been written and all test executed, has the task to study these phenomenons. They go from whistles to true vibrations during braking.

Main purpose is to write a software that can reproduce, with an animation, the movement of an entire mechanical system during a vibratory phenomenon. Input data will come from the ground. User, besides deeply analyzing data with spectrograms and spectrums, will export results on a spreadsheet.

The software can be used for all phenomenons that develop a vibration recordable from accelerometers. Judder is one of them.

While on the first part of the work we will discuss more of Matlab scripts writing, in the second we will concentrate on bench tests and on produced results. A test with a suspension with this problem will be described and, besides characterizing vibrations on the entire structure with accelerometers, a laser vibrometer and an infrared camera will be used to study deeply the phenomenon.

### **Keywords**

Operational deformation shape, order analysis, judder, brake system, vibrations, data processing

# 1 FENOMENI VIBRATORI DEI FRENI

## 1.1 Funzionamento dell'impianto frenante

Prima di entrare nel vivo del discorso, sarebbe opportuno riprendere i concetti fondamentali che sono alla base dell'impianto frenante.

*Freno: qualsiasi dispositivo capace di contrastare il movimento di un corpo [1]*

Questa è la definizione di freno data dal Devoto-Oli. In questo caso il corpo è un mezzo automobilistico, auto o veicolo commerciale, e il freno agisce sulla rotazione delle ruote.

Il principio fisico che ne permette il funzionamento è l'attrito: quando due corpi in movimento a velocità diversa entrano in contatto si crea una forza trasversale che cerca di farli muovere alla stessa velocità. Questa forza è proporzionale a quella che garantisce il contatto tra i due corpi.

$$F = \mu * N \quad (1.1)$$

L'equazione (1.1) si riferisce all'attrito coulombiano, cioè c'è un rapporto fisso tra forza longitudinale e trasversale rappresentato dal coefficiente d'attrito  $\mu$ . In prima approssimazione un freno sfrutta questa legge e si può risalire al coefficiente conoscendo i due materiali a contatto. Nella realtà il  $\mu$  è in continua evoluzione durante tutta la frenata, perché la temperatura e vari altri processi che si vengono a creare hanno una certa influenza su di esso.

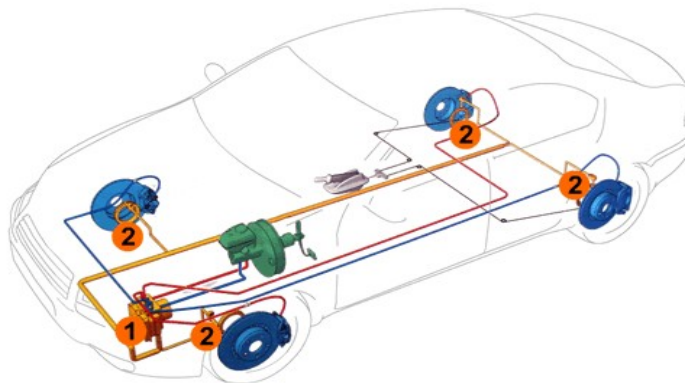


Figura 1.1: Impianto frenante

Ultimamente stanno avendo un discreto successo i freni carboceramici sulle auto sportive. La loro particolarità è la leggerezza che consente di ridurre notevolmente le masse non sospese perché utilizzano dischi costituiti da una matrice di ceramica e carbonio invece della ghisa. In questo modo cambia anche il principio di frenata: invece dell'attrito vengono sfruttati i legami tra il carbonio del disco e quello delle pastiglie che si formano e rompono in continuazione assorbendo energia.

Come si vede dalla figura 1.1, il classico impianto frenante per autovetture è composto da 4 freni (indicati con il numero 2) e da una pompa con servofreno che mette in pressione il fluido.

Il numero 1 indica l'impianto ABS, cioè il sistema che evita il bloccaggio delle ruote durante la frenata. Tutte le auto moderne lo comprendono come equipaggiamento di serie perché contribuisce notevolmente alla sicurezza del veicolo.

Esso è costituito da una centralina di controllo, una pompa del fluido frenante e da delle elettrovalvole di controllo del flusso di esso verso i freni.

In caso di suolo scivoloso o frenata troppo violenta che provoca il bloccaggio di una o più ruote, il sistema entra in funzione riducendo la pressione del fluido grazie alla pompa elettrica che si oppone alla forza impressa dal guidatore.

Il bloccaggio di una o più ruote è molto pericoloso perché annulla la forza laterale generabile dal pneumatico a contatto con il terreno. In questo modo il guidatore può sterzare senza riuscire a far cambiare traiettoria all'auto.

Il primo effetto benefico è, quindi, la possibilità di sterzare in qualunque condizione, anche in caso di frenata eccessiva dettata dal panico di una manovra di emergenza.

Il secondo effetto benefico portato dal sistema è la riduzione degli spazi di frenata. L'attrito è di due tipi, statico e dinamico, e ognuno ha una sua  $\mu$ : la  $\mu_s$  e la  $\mu_d$ . Il primo tipo si ha quando i due corpi si muovono alla stessa velocità, mentre il secondo quando ciò non è vero. Nel freno, ad esempio, si ha sempre attrito dinamico (anche se a livello microscopico ciò non è totalmente vero perché ci sarebbe un susseguirsi continuo di statico/dinamico), tranne nel caso di bloccaggio della ruota. Per quest'ultima, invece, accade esattamente il contrario: il punto di contatto con il terreno è il centro di istantanea rotazione, quindi non c'è strisciamento (in realtà c'è ma molto piccolo). L'effetto benefico deriva dal fatto che il coefficiente d'attrito statico è più alto del dinamico, quindi una ruota che non scivola sul terreno è in grado di trasmettere più forza.

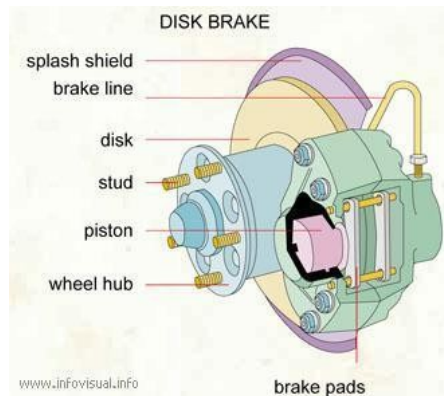
Tornando ai freni per autovetture, sono diffusi due tipi: a disco e a tamburo.

### **1.1.1 Il freno a disco**

Esso è costituito, come dice il nome, da un disco su cui viene applicata la pressione di due pastiglie, cioè due blocchi di materiale d'attrito. Quest'ultime sono mosse da dei pistoncini attuati da un fluido in pressione. La pinza è il nome



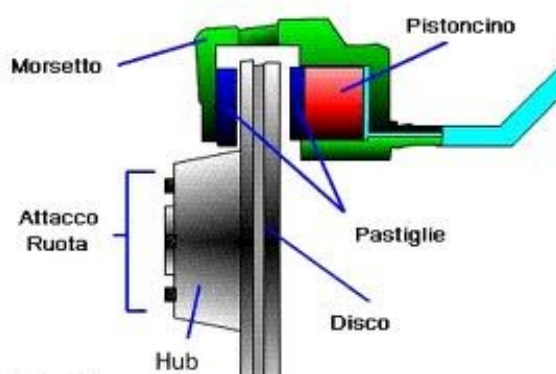
dell'organo meccanico che contiene pistoni e pastiglie e che deve resistere alle forze di reazione del fluido e del contatto tra pastiglia e disco.



*Figura 1.2: Freno a disco*

A seconda della conformazione della pinza si possono riconoscere ulteriori due tipi di freno:

- *Pinza fissa*: (presentata in figura 1.2) entrambe le pastiglie sono mosse da uno o più pistoni, quindi quest'ultimi sono da entrambi i lati della pinza che è fissata al portamozzo;
- *Pinza flottante*: solo la pastiglia da un lato è mossa dal pistone, mentre quella dall'altro da tutto il resto della pinza che subisce la forza generata



*Figura 1.3: Freno a disco con pinza flottante*

dalla pressione sul cilindro (figura 1.3).

Tra il cilindro e il pistone c'è una guarnizione che ha un compito molto importante: oltre a evitare perdite d'olio, garantisce il ritorno del pistone al termine della frenata. Nel freno a disco, infatti, non è prevista una molla o un

sistema di ritorno del pistone, ma solo un mezzo per farlo fuoriuscire e premere la pastiglia contro il disco.

La guarnizione, durante la frenata, si deforma per seguire il pistone (lo spostamento è di circa 1mm) per poi richiamarlo tornando alla sua forma originaria (rollback).

Un altro effetto sgradito che la guarnizione risolve con la sua forza di contatto è l'eccessivo rientro del pistone in seguito alla pressione esercitata dalla pastiglia.

Quando l'auto affronta una curva può capitare che quest'ultima si spinga contro di esso per effetto della forza centrifuga. Un suo rientro non provoca problemi immediati, ma alla prima frenata: il pistone dovrà fuoriuscire molto di più per recuperare il gioco accumulato consumando una notevole quantità d'olio. Come si vedrà successivamente, questo comporta un affondamento del pedale del freno e una possibile compromissione della sicurezza nella guida dell'auto.

Quando il freno non è attivo, la pastiglia ha un certo gioco tra pistone e disco.

Per evitare che si muova provocando rumori sgradevoli, si utilizzano delle molle che la tengono accostata ai pistoni.

Nelle pinze flottanti c'è anche una molla che riporta la pinza stessa in posizione, in modo da separare dal disco la pastiglia non collegata al pistone. Questo tipo di pinze è più economico ma ha due talloni d'Achille: spesso capita che il ritorno della pinza non sia garantito per l'usura o sporcizia della pista su cui si muove e che il materiale d'attrito si consumi in maniera non uniforme per via delle deformazioni. Il primo difetto provoca surriscaldamenti della pastiglia sempre a contatto.

Anche il disco merita una descrizione e classificazione. È il componente sottoposto allo stress maggiore perché compresso dalle pastiglie, sottoposto a momento torcente per la coppia frenante e scaldato fino a temperature molto alte (600-700°C).

Una classificazione può essere fatta in base al materiale e all'assemblaggio.

- *Disco in ghisa*: è il più semplice e costituito da un solo piatto chiuso tra le due pastiglie.
- *Disco autoventilante*: ha due piatti e tra di essi ci sono delle colonne che consentono il passaggio dell'aria di raffreddamento. In questo modo l'aria viene pompata all'interno del disco e aumenta la superficie di scambio termico, riducendo le temperature di esercizio.
- *Disco co-fuso*: il suo scopo è la riduzione del peso. La parte centrale, collegata al portamozzo, è in alluminio, mentre i piatti sempre in ghisa. A collegare le due parti sono i cosiddetti pioli, dei cilindri d'acciaio attorno cui vengono colati la ghisa e l'alluminio. Quest'ultimo materiale è utilizzabile solo per la parte interna perché è sottoposta a sforzi e temperature inferiori.
- *Disco flottante*: simile al co-fuso, ma con un incastro come collegamento tra parte interna ed esterna. In questo modo sono consentiti dei piccoli

movimenti relativi lungo l'asse del disco che permettono di assecondare gli spostamenti delle pastiglie.

- *Disco carboceramico*: è usato sugli omonimi freni e sono costituiti dalla parte centrale in alluminio e quella esterna in un composito ceramica/carbonio. Molto più leggeri di tutti gli altri tipi e resistenti a temperature più alte. Hanno una durata stimata di 600.000km e per sapere il loro grado di consumo vanno pesati: durante l'utilizzo non si consuma la parte superficiale, ma il materiale composito si impoverisce di carbonio. Il loro costo è enormemente più alto di tutti gli altri.
- *Disco in carbonio*: utilizzato in Formula 1 ed è costituito solamente da carbonio. Resiste a temperature altissime, ma è inutilizzabile sulle auto da strada per via del suo buon funzionamento solo a caldo.

L'ultimo componente, che è in comune con i freni a tamburo nella struttura ma non nella forma, sono le pastiglie (figura 1.4). Esse sono costituite da materiale d'attrito, che si consuma durante la frenata, poggiate su una piastrina d'acciaio. Quest'ultima è molto importante perché i pistoni spingono la pastiglia solo in alcuni punti, generando disparità nella pressione sull'interfaccia pastiglia/disco. La rigidità della piastrina garantisce una distribuzione di forze più omogenea. È di vitale importanza evitare che il materiale d'attrito si consumi totalmente, facendo venire in contatto la piastrina con il disco: la prima, avendo durezza maggiore, inciderà e consumerà subito la superficie del secondo, mettendolo fuori uso dopo poche frenate.



*Figura 1.4: Pastiglie per freni a disco*

Anche le pastiglie sono interessate dalla notevole quantità di calore sprigionata durante la frenata, ma ne soffrono ancora di più. Mentre il disco è in movimento e spesso è autoventilante per aumentare ulteriormente il calore disperso, le pastiglie sono ferme e hanno difficoltà a raffreddarsi. La presenza di impianti frenanti con pinze molto grandi è la conseguenza di questo problema: più è grande la pastiglia e più superficie di scambio termico avrà a disposizione.

Chiaramente, se la pastiglia è grande, anche la pinza dovrà essere tale per disporre i pistoni nelle posizioni corrette.

### **1.1.2 Il freno a tamburo**

Il freno a tamburo (figura 1.5) non va a rallentare o bloccare un disco solidale alla ruota, ma lavora su una campana collegata ad essa. All'interno ha due pastiglie che sono collegate da un lato a un perno e dall'altro a un pistone che le fa spostare verso l'esterno.

Il richiamo delle pastiglie nei momenti di assenza di frenata è gestita da delle molle.

Spesso è presente un sistema di recupero del gioco che sposta verso l'esterno la posizione di riposo delle pastiglie mano a mano che il materiale d'attrito si consuma. Lo scopo, anche questa volta, è evitare l'allungamento della corsa del pedale.



*Figura 1.5: Freno a tamburo*

Sono utilizzati per impianti che richiedono poca potenza frenante, come i freni posteriori delle auto. Oltre a risultare meno potenti, hanno anche il problema di far più fatica, rispetto ai freni a disco, a raffreddarsi, provocando pericolosi aumenti degli spazi di frenata.

La ricerca del raffreddamento dell'impianto è data, oltre che da problemi sui materiali, dal calo del coefficiente d'attrito con l'aumentare della temperatura.

Un freno surriscaldato tenderà a frenare sempre meno, per questo che si consiglia sempre di utilizzare il freno motore nelle discese: un surriscaldamento provocherebbe un aumento di velocità e l'impossibilità di rallentare il mezzo.

### 1.1.3 La pompa del freno

Il fluido utilizzato per attuare i pistoni dei freni a disco o a tamburo va messo in pressione: la pompa è l'organo meccanico che ha questo compito. L'attuatore, di solito, è il guidatore che preme un pedale o, nel caso dei motocicli, una leva del manubrio.

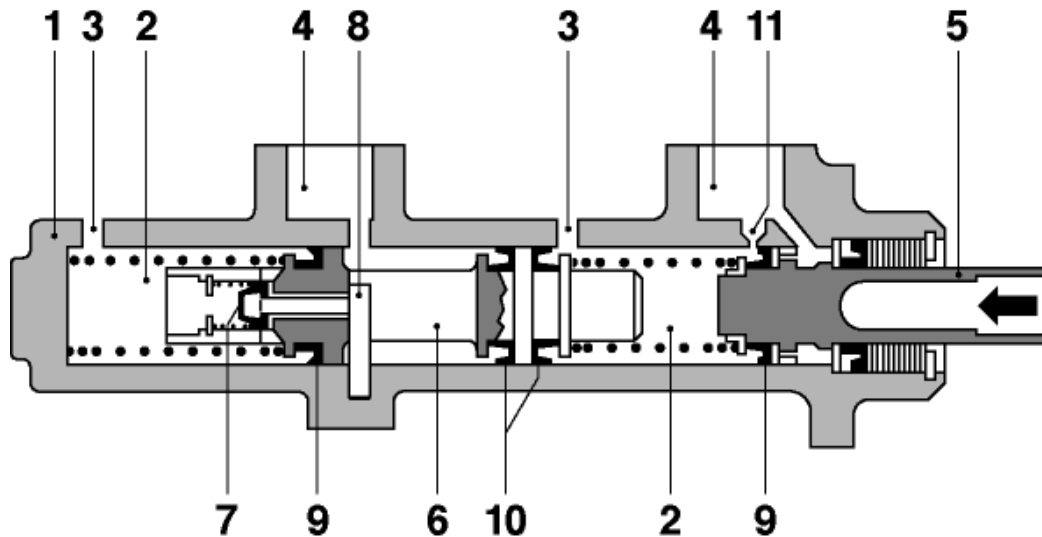


Figura 1.6: Pompa tandem per impianti frenanti

Essa non è altro che un cilindro cavo riempito di fluido messo sotto pressione da un pistone legato al pedale. Sulle auto è presente anche il servofreno, cioè un sistema che riduce lo sforzo da parte del guidatore per premere il pedale sfruttando aria in depressione proveniente dal motore.

La pompa in figura 1.6 è chiamata pompa tandem perché ha due camere per il fluido (indicate con 2): la prima è collegata a un impianto e la seconda ad un altro. Nelle auto, per motivi di sicurezza, sono sempre presenti due impianti in modo da riuscire a fermare il mezzo anche se uno dei due è fuori uso. Il sistema più usato è quello a X, cioè sono collegate insieme la ruota anteriore sinistra con la posteriore destra e la posteriore sinistra con l'anteriore destra: in questo modo c'è sempre una ruota a sinistra e una destra che può frenare il veicolo. Se frenassero solo le ruote da un lato si avrebbero pericolose imbarcate verso di esso ogniqualvolta il guidatore si appresti a frenare.

Il fluido utilizzato è un olio resistente alle alte temperature: la sua proprietà principale è non generare vapori che porterebbero ad un allungamento della corsa del pedale. L'olio, essendo liquido, è pressoché incompressibile, quindi la quantità pompata sarà circa identica a quella necessaria per spostare i pistoni. Se ci fosse anche aria o vapore nel condotto, servirebbe molto più fluido perché una parte andrebbe persa nella compressione delle sacche di gas. La pompa, essendo

alternativa, può fornire solo una certa quantità di fluido con una singola pressione del pedale: se essa fosse insufficiente, si arriva ad allungare la corsa o, al limite, a non frenare.

Il fluido è classificato in base alla massima temperatura a cui può resistere: un DOT4, per esempio, resiste fino a 230°C. È fondamentale non fare inumidire il fluido, pena l'abbassamento della temperatura limite. Dato che l'umidità, con il tempo, riesce comunque a penetrare, ogni 4 o 5 anni è consigliata la sostituzione del fluido.

Il rapporto di leva presente tra punto d'applicazione della forza sul pedale e sulla pompa e il torchio idraulico garantiscono una moltiplicazione della forza impressa.

$$p = \frac{F}{A} \rightarrow \frac{F_p}{A_p} = \frac{F_f}{A_f} \rightarrow F_f = F_p \frac{A_f}{A_p} \quad (1.2)$$

A partire dall'equazione della forza in base alla pressione (1.2), si capisce come l'area possa avere una notevole influenza. Se l'area del pistone della pompa ( $A_p$ ) è inferiore a quella del freno ( $A_f$ ) si otterrà una forza frenante ( $F_f$ ) superiore a quella impressa sulla pompa ( $F_p$ ). L'effetto secondario, e negativo, è che il pistone della pompa si dovrà spostare di più rispetto a quello del freno per mantenere l'equilibrio dei volumi di fluido. Per questo motivo l'assorbimento, cioè la quantità necessaria per accostare le pastiglie al disco, è un parametro molto stringente quando si progetta un impianto frenante, pena l'eccessiva corsa del pedale.

## 1.2 Le vibrazioni del freno a disco

In questa trattazione ci si concentrerà sul freno a disco, data la sua maggiore diffusione rispetto a quello a tamburo.

Un freno a disco, durante il suo funzionamento, può generare delle vibrazioni a varie frequenze. Spesso il fenomeno è accompagnato dall'emissione di rumori o fischi e, quando le frequenze sono molto basse, si possono avvertire anche vibrazioni strutturali.

Prima di addentrarsi nell'argomento, è necessario riprendere qualche concetto riguardante la dinamica dei sistemi meccanici e, soprattutto, l'analisi modale. Ogni corpo o sistema meccanico è dotato di frequenze proprie e, se le sollecitazioni hanno pulsazione pari ad esse, si provoca un aumento di energia continuo che può raggiungere livelli troppo elevati.

$$m \ddot{x} + k x = F_0 e^{i\omega t} \quad (1.3)$$

## Capitolo 1 - FENOMENI VIBRATORI DEI FRENI

---

Questa è l'equazione di moto di un sistema meccanico non smorzato sottoposto a una forza oscillante di ampiezza  $X_f$  e frequenza  $\omega$ . Considerando il sistema libero, si può risalire alla frequenza propria.

$$(-m\omega^2 + k) X_0 e^{i\omega t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (1.4)$$

Se si fa il rapporto tra l'ampiezza del sistema meccanico e l'ampiezza della sollecitazione con una frequenza pari a quella propria, si ottiene:

$$\frac{X_0}{F_0} = \frac{1}{k - m\omega_0^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{X_0}{F_0} = \frac{1}{0} = \infty \quad (1.5)$$

L'ampiezza di oscillazione, quindi, va a infinito, provocando spesso dei danni. Nella realtà tutti i sistemi sono più o meno smorzati: ogni materiale ha un suo coefficiente di smorzamento interno che assorbe l'energia. Se ciò non fosse sufficiente si possono aggiungere smorzatori supplementari, come gli ammortizzatori delle sospensioni automobilistiche.

$$\frac{X_0}{F_0} = \frac{1}{k + ir\omega_0 - m\omega_0^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{X_0}{F_0} = \frac{1}{ir\omega_0} \quad (1.6)$$

Come si vede dall'equazione 1.6, l'ampiezza dipenderà dal coefficiente di smorzamento e più esso sarà alto e più la prima sarà contenuta.

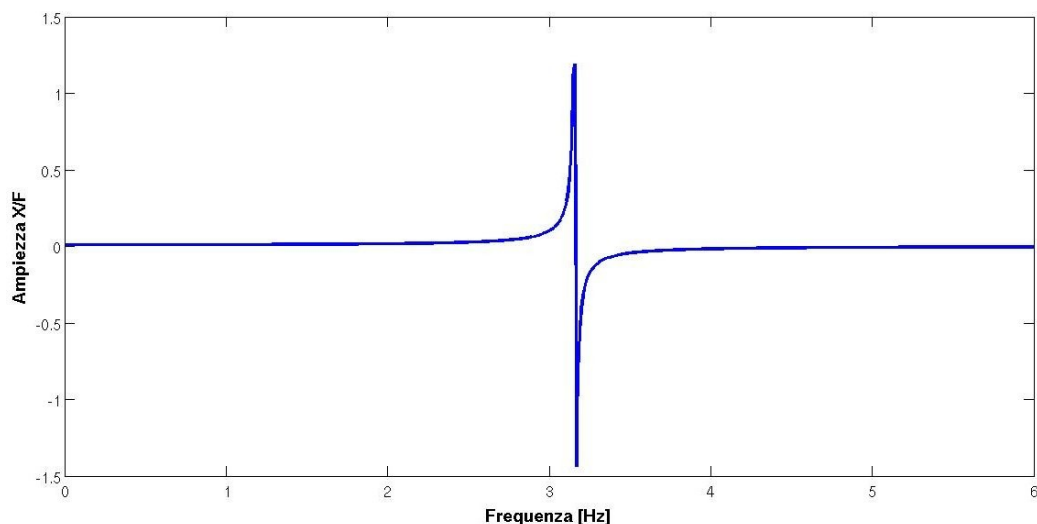


Figura 1.7: Ampiezza oscillazione a varie frequenze

In figura 1.7 è riportato l'andamento del rapporto tra l'ampiezza di oscillazione del sistema e la forza a frequenza variabile. Si nota come la risposta sia molto bassa per tutte le frequenze (corrisponde a  $F/k$ ) per poi aumentare improvvisamente alla risonanza. Se non ci fosse uno smorzamento, il rapporto arriverebbe all'infinito sempre con la stessa intensità di forza.

L'altro concetto importante è il modo di vibrare: ogni sistema meccanico ha tanti modi di vibrare quanti sono i gradi di libertà e ognuno ha una frequenza propria.

Se la frequenza della sollecitazione, quindi, ha una frequenza pari ad esse, il sistema si muoverà rispetto a quel modo e con ampiezze molto più alte.

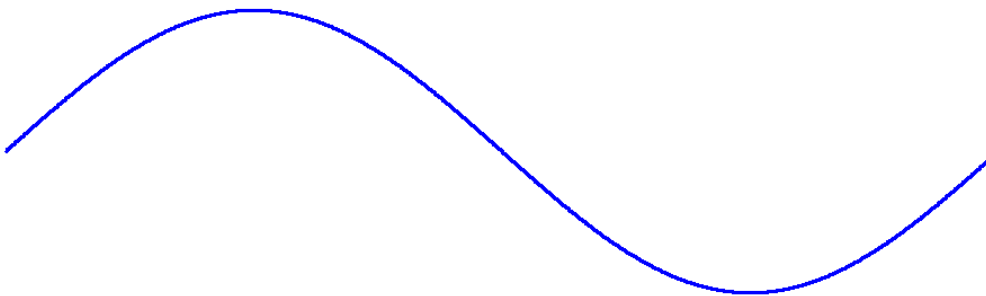
Se il componente è deformabile, i modi di vibrare diventano infiniti.

Un esempio: un tubo d'acciaio che viene fatto oscillare.



*Figura 1.8: Tubo oscillante al 1° modo di vibrare*

Il primo modo di vibrare corrisponderà alla figura 1.8.



*Figura 1.9: Tubo oscillante al 2° modo di vibrare*

Al 2° modo di vibrare compare un nodo centrale attorno cui gira tutto il resto del tubo. Tutti i successivi modi prevederanno la nascita di un nodo ulteriore che divideranno in parti uguali il pezzo.



I freni, essendo sistemi meccanici deformabili, hanno infiniti modi di vibrare e i fischi avvengono quando la frequenza di sollecitazione è pari a quella propria di uno di essi. Ma non sempre è così: come si vedrà tra poco, il judder ha cause diverse.

Tornando, appunto, ai freni, come riportato dall'articolo di Jacobsson [2], la casistica di fenomeni legati alle loro vibrazioni è divisibile in tre gruppi: judder, groan o altri rumori legati all'attrito e i fischi.

### **1.2.1 Judder**

Avviene a frequenze molto basse (massimo 500Hz) e, soprattutto, quest'ultime seguono la velocità di rotazione (al calare di essa diminuisce anche la frequenza). È causato dalla deformazione del disco.

Essendo l'argomento principale di questa trattazione, verrà esposto in maniera più approfondita in seguito.

### **1.2.2 Groan, grunt, grind e moan**

Vanno da 100Hz a 1000Hz, sono indipendenti dalla velocità del veicolo e sono causati da alcune caratteristiche del coefficiente d'attrito, soprattutto la differenza tra attrito statico e dinamico. Le caratteristiche d'impianto vanno da 60 a 120°C con decelerazioni da 1,5 a 6m/s<sup>2</sup>. È importante sottolineare come questi fenomeni si manifestino a basse velocità, tipicamente tra 10 e 30km/h. Lo scuotimento trasversale della pinza sembra essere la causa e si potrebbe ottenere una variazione di frequenza modificandone la forma, quindi la massa o la rigidità.

Il problema è recente perché, per questioni ambientali, è stato rimosso l'asbesto cambiando l'abrasività del materiale d'attrito.

### **1.2.3 Fischi**

Anch'essi indipendenti dalla velocità di rotazione del disco, presenti a frequenze più alte e legati ai modi di vibrare del gruppo disco, pinza e sospensione.

Per studiare i fischi e cercare di risolverli si ricorre al calcolo modale: vengono calcolate le frequenze proprie di tutti i componenti e, se alcune di esse sono vicine a quelle del disco, si genera una risonanza e, quindi, il fischio. La soluzione è spostare le frequenze agendo su massa o rigidità, quindi modificando la forma o il materiale di alcuni componenti.

Il disco è comunque il componente più importante. La divisione tra fischio a bassa od alta frequenza è circa a 5kHz.

Per l'alta frequenza si possono anche applicare isolatori o modificare lo smorzamento del sistema, ma quest'ultimo varia con la temperatura, quindi bisogna progettare a una temperatura di riferimento.

Un sistema meccanico che vibra alla sua frequenza propria può rimanere stabile oppure destabilizzarsi. A decidere quale dei due comportamenti seguirà sono i poli (cioè i valori che annullano la funzione di trasferimento del sistema): se

entrambi hanno parte reale negativa il sistema sarà stabile, se almeno uno ha parte reale positiva si va nell'instabilità.

La generazione del fischio è l'espressione dell'instabilità perché le vibrazioni si amplificano fino a trasmettersi anche all'aria. Se disco e pinza, per esempio, avessero stesse frequenze proprie, quindi a rischio di propagazione di vibrazione, ma i poli fossero negativi, non avrei alcun fischio.

Di conseguenza un altro metodo per evitare l'emissione di fischi è cercare di generare poli negativi. Il coefficiente d'attrito e il modulo elastico del materiale del disco li influenzano direttamente, quindi si può agire su di essi, per quanto possibile. Nel primo caso si può modificare le caratteristiche del materiale d'attrito, nel secondo il materiale del disco (nel caso della ghisa, basta cambiare la concentrazione di carbonio e degli additivi).

Il coefficiente d'attrito ha un limite che fa da spartiacque tra i due comportamenti: sotto di esso si hanno due poli complessi coniugati con parte reale nulla, mentre oltre diventano reali e con segno opposto. Ciò spiega anche perché i fischi a bassa frequenza tendano a scomparire con l'aumentare della temperatura: più il disco e le pastiglie sono caldi e più il coefficiente d'attrito cala, riportando i poli a non avere parte reale positiva.

Il modulo elastico ha un funzionamento diverso, perché ha due valori limite che determinano un range di valori da evitare. Fuori dal range si hanno ancora poli complessi coniugati con parte reale nulla, ma al suo interno sono reali con segno opposto.

### **1.3 Il judder**

Il judder ha due differenze principali rispetto ai fischi: non ha una frequenza fissa dettata dalle risonanze e dipende dalle variazioni di spessore del disco. Durante una frenata con questo fenomeno si notano forti vibrazioni su telaio, volante e pedale del freno con una frequenza in costante calo perché legata alla velocità del disco.

Il rapporto tra la frequenza del judder e la rotazione del disco costituisce il concetto di ordine: se la prima, per esempio, è di 80Hz e la ruota gira a 20Hz, si avrà un ordine 4 perché la prima frequenza è il quadruplo della prima.

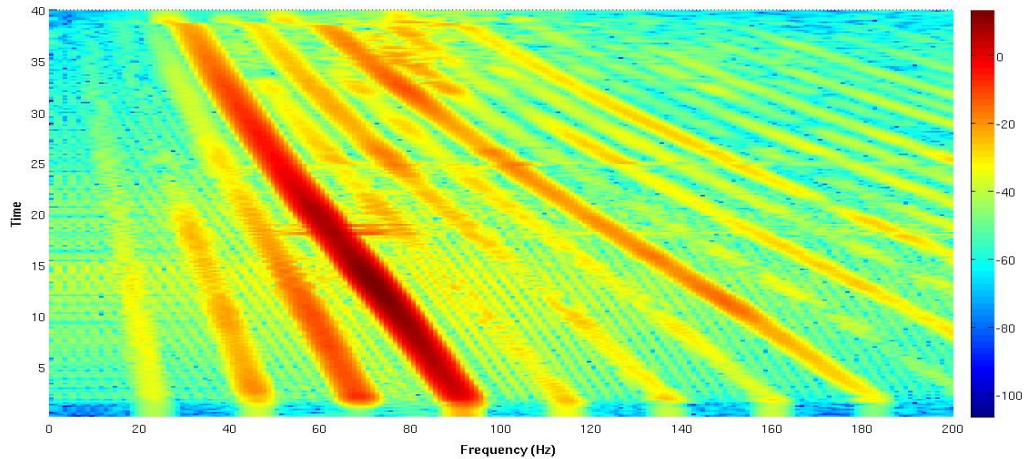


Figura 1.10: Spettrogramma di un fenomeno judder

La figura 1.10 mostra lo spettrogramma del segnale di un accelerometro applicato al portamozzo di una sospensione durante il fenomeno vibratorio. In esso si notano varie righe equispaziate in cui l'energia si concentra (la scala di colore si basa sulla densità di potenza spettrale): ognuna di esse corrisponde ad un ordine. In questo caso il 4° ordine risulta essere quello più sollecitato, dato il suo colore rosso scuro. Il 1°, cioè la riga più sbiadita che parte da poco più di 20Hz, è la velocità di rotazione del disco. L'inclinazione è data dal rallentamento del disco durante la frenata (l'asse delle ordinate è il tempo).

Si può fare una distinzione in base all'ordine e alla sua causa:

- *Basso ordine (1-5)*: la causa è la variazione di forma del disco che provoca anche aree con temperature diverse sulla superficie. Il fenomeno si autoalimenta perché le zone più calde tendono a dilatarsi di più, aumentando ulteriormente le sollecitazioni e il calore generato.
- *Alto ordine (6-20)*: alle variazioni di forma si aggiungono i cosiddetti *hot spots*, cioè i punti in cui la temperatura è molto più alta rispetto al resto del disco. Qui la deformazione è particolarmente pronunciata e il loro numero stabilisce l'ordine.

Considerando la massima velocità raggiungibile da un'auto e l'ordine massimo del judder con basso ordine, la frequenza di 100Hz può fare da spartiacque tra le due categorie riportate.

Oltre a generare vibrazioni strutturali avvertibili su telaio e volante, causa anche oscillazioni nella pressione del fluido freni che si ripercuotono sul pedale del freno (*pedal feeling*).

Di seguito saranno discusse cause e possibili soluzioni del judder, tenendo conto dei vari fenomeni che avvengono prima e durante la frenata, oltre dei componenti dell'impianto frenante.

### **1.3.1 Il disco e le variazioni di forma**

Il disco è il componente che influisce più di tutti sul judder, anche perché la sua deformazione è la vera causa.

Le sue variazioni di forma sono il motore del fenomeno. Esse possono essere causate da problemi di fabbricazione o montaggio, oppure dalla deformazione per le alte temperature raggiunte.

Alla prima categoria appartengono il run-out e le differenze di spessore.

- *Run-out*: il disco non è equilibrato attorno al proprio asse per motivi riconducibili a problemi di fabbricazione o tolleranze di montaggio sul portamozzo;
- *Differenze di spessore*: non tutta la superficie ha il medesimo spessore per problemi di produzione o fenomeni insorti durante la frenata.

Per esempio, la Ford Scorpio [3] prevede, a freddo, un run-out massimo di 0,1mm e una differenza di spessore di 0,01mm. Di solito quest'ultimo limite va da 0,005 a 0,01mm perché a un pilota esperto bastano 0,015mm per avvertire vibrazioni in frenata.

Le differenze di spessore possono essere causate da motivi di origine transitoria oppure definitivi. Nella prima famiglia sono compresi la corrosione (maggiore sulla parte di disco non coperta dalle pastiglie) e tutti i fenomeni di dilatazione provocati da differente temperatura superficiale. In quest'ultimo caso si ha una vibrazione che peggiora con l'aumentare delle frenate e della temperatura raggiunta. Le differenze definitive sono legate al materiale in relazione alla temperatura raggiunta: un forte surriscaldamento può provocare una modificazione nello stato del materiale del disco.

La scelta del tipo di disco, pieno o ventilato, e il suo materiale influenzano direttamente le deformazioni. Un disco deve pesare poco, lavorare a temperature basse e non dilatarsi molto quando è caldo. Purtroppo, come spesso capita nell'ingegneria, queste caratteristiche sono in contrasto tra loro.

I due tipi di dischi più diffusi sono quelli pieni e quelli autoventilati: i primi hanno grande inerzia termica e lavorano a bassa temperatura, ma sono pesanti, i secondi sono leggeri ma si scaldano subito e di più, anche se si raffreddano più in fretta. Per cercare di ridurre i pesi si possono usare compositi a base alluminio, ma la loro limitata capacità termica impone il montaggio su auto più leggere di 1000kg e la loro maggiore dilatazione provoca problemi di deformazione. Solo i dischi carboceramici, costituiti da una matrice di carbonio rinforzata con fibre di carbonio e silicio, riescono a coniugare leggerezza, scarsa dilatazione e resistenza ad alta temperatura (riducendo l'importanza dell'inerzia termica), ma sono molto costosi e utilizzati solo sulle auto più sportive.

Ma la dilatazione dei dischi freno ha anche un altro difetto: non è costante su tutta la superficie perché non lo è neanche la temperatura. Quest'ultima, si distribuisce in bande concentriche sempre più calde mano a mano che ci si

avvicina al bordo esterno. La maggiore velocità tangenziale con l'aumentare del raggio è la causa di questa distribuzione.

Il disco può, quindi, flettere oppure diventare ondulato. In condizioni normali, succede di avere una differenza di temperatura di 250°C tra fascia interna ed esterna, e ciò porta ad ulteriori 0,1mm di run-out per la flessione.

La suddivisione in bande a temperatura sempre maggiore avviene quando sia pastiglie sia disco sono in perfette condizioni e la pressione di frenata è costante su tutta l'interfaccia tra i due. Ma quando questo non avviene possono succedere due cose: o una banda diventa più calda delle altre oppure si forma una zona più calda, chiamata *hot spot*. Se la pastiglia o il disco hanno una zona a spessore maggiore, cioè dove la pressione si concentra, si formerà una banda a temperatura maggiore. Anche una cattiva ripartizione della pressione di frenata sulla pastiglia può generare questo fenomeno. La rigidità della pastiglia ha un effetto determinante, perché più è rigida e più è facile che si verifichi.

Gli hot spot possono avere temperature superiori di 300-600°C rispetto al resto del disco e arrivare a 700-800°C. In queste condizioni può verificarsi una modificazione del materiale base che va a cambiare la densità, e quindi il volume della zona più calda.

Anche la velocità del disco influenza la formazione degli hot spot perché più è alta e più se ne formano. Quando sono troppi si può arrivare alla rottura del disco.

Per scatenare la generazione di hot spot bisogna fornire abbastanza energia al sistema, e questo è possibile solo ad alte velocità. 100Km/h sono il limite prefissato, quindi è bene che ogni test per il judder caldo preveda il raggiungimento di velocità superiori ad esso.

### **1.3.2 Le pastiglie, la distribuzione di pressione e il coefficiente d'attrito**

La scelta della giusta miscela di materiali per le pastiglie è molto difficile da fare perché influenza direttamente il comportamento di tutto l'impianto frenante sotto molti punti di vista.

I più importanti sono il coefficiente d'attrito, la rigidità e la sua variazione all'aumentare della pressione. Una rigidità che variasse linearmente sarebbe l'ideale perché aumenterebbe le tolleranze sulla variazione di spessore grazie alla sua maggiore adattabilità alla superficie del disco. Ma, dall'altro lato, riduce il piacere di guida rendendo il pedale del freno più "spugnoso". Sulle auto di serie si montano, di solito, pastiglie con rigidità crescente non linearmente rispetto alla pressione, andando a favorire fenomeni come il judder.

Il brake by wire sembra dare buoni risultati da questo punto di vista, perché consente di dare una risposta sul pedale differente rispetto a quella rilevata dal resto dell'impianto.

Per quanto riguarda l'attrito, non ci sono particolari proprietà che possono scatenare il judder. L'unica cosa universalmente riconosciuta è l'effetto benefico di un basso coefficiente d'attrito: per ottenere la stessa decelerazione, rispetto a

un coefficiente più alto, è necessario aumentare la pressione dell'olio con relativo miglioramento delle distribuzioni di temperatura e pressione sulla pastiglia.

Anche la distribuzione di pressione sull'interfaccia pastiglia/disco ha il suo effetto. Mentre nei sistemi di calcolo essa viene considerata costante, nella realtà essa varia continuamente. Le variazioni di spessore, d'usura, di temperatura e il run-out la influenzano direttamente. Ciò provoca una notevole differenza tra quello che viene calcolato e quello che accade nella realtà, perché le pressioni e gli stress raggiunti sono molto superiori a quelli delle simulazioni.

### **1.3.3 Usura differenziale**

L'usura della superficie del disco e delle pastiglie può non essere uguale in tutti i punti. In questi casi le principali indiziate sono le pastiglie che mantengono il contatto con il disco in alcuni punti quando l'utente non sta frenando.

Per contrastare questo fenomeno si cerca di aumentare il cosiddetto rollback, cioè si fa indietreggiare di più il pistone al rilascio del pedale del freno.

In seguito a fenomeni del genere, il disco presenta zone più consumate e più calde, ma è possibile recuperare una condizione di equilibrio in seguito a delle frenate impegnative che vanno a ripulirne la superficie. Per questo motivo un utente normale potrà subire il fenomeno molto di più di uno sportivo: mentre il primo esegue meno frenate e con poca decelerazione, il secondo ricorre molto all'uso del freno e cerca di portarlo al limite.

### **1.3.4 Superfici a contatto non costanti**

Durante la frenata la superficie delle pastiglie e quella del disco entrano in contatto, ma non è detto che siano sempre nelle stesse condizioni. Esse sono sempre ricoperte da uno strato di prodotti dell'attrito, cioè polvere di metallo ossidata a contatto con l'ossigeno dell'aria.

Questo strato fa da diretto tramite tra dischi e pastiglie, quindi ha un effetto molto importante. In casi estremi possono anche verificarsi eventi molto spiacevoli: se l'utente preme il freno su una vettura ferma con i freni molto caldi può far incollare le pastiglie ai dischi. Se le temperature superassero i 500°C si potrebbe avere la fusione del materiale d'attrito sulla superficie del disco.

È chiaro che, in entrambi i casi, si andrebbe ad alterare l'interfaccia pastiglia/disco provocando una variazione dello spessore di quest'ultimo nella zona interessata.

### **1.3.5 Sospensione**

La sospensione non è direttamente interessata dal fenomeno del judder inteso come variazione di forma del disco e di pressione di frenata, ma è comunque coinvolta nell'amplificazione delle vibrazioni generate.

Durante il judder si registrano forti vibrazioni secondo la direzione longitudinale dell'auto e l'aumento di rigidità del silent block appartenente al braccio

inferiore può portare delle miglierie. In questo modo si andrebbero ad aumentare le frequenze proprie del sistema, allontanandole da quelle generate dal judder.

Un irrigidimento dei silent block del braccetto dello sterzo, sempre per lo stesso motivo, potrebbe ridurre le vibrazioni sullo sterzo.

Calcolare le frequenze proprie di una sospensione è molto complicato perché sono presenti molte non linearità che variano con l'applicazione della coppia frenante. Come citato da Jacobsson [2], un veicolo sperimentale che aveva una sospensione con frequenza propria di 13,8Hz e un coefficiente di smorzamento di 0,09, durante la frenata la prima saliva a 18Hz e il secondo calava a 0,07. Ne consegue che non basta analizzare la sospensione a riposo, ma bisogna fare un'analisi estesa alla frenata in corso.

### **1.3.6 Variazioni nel tempo**

Un altro fattore che influenza pesantemente il judder è il tempo, inteso come durata di frenata e di pausa tra una e l'altra.

Il motivo principale dell'importanza di questo fattore è l'evoluzione della differenza di spessore durante la frenata. La presenza di punti di contatto a pressione più alta e bande a temperatura differente sono i responsabili di essa. Proprio durante i test al banco eseguiti in Brembo per la stesura di questa tesi, è emerso quanto il tempo sia importante per il judder. La crescita della temperatura provoca un aumento di differenza di spessore del disco, quindi un effetto judder molto più forte. Frenate più impegnative e riduzione dell'intervallo tra una e l'altra fanno crescere notevolmente la temperatura dell'impianto, aiutando il fenomeno a manifestarsi.





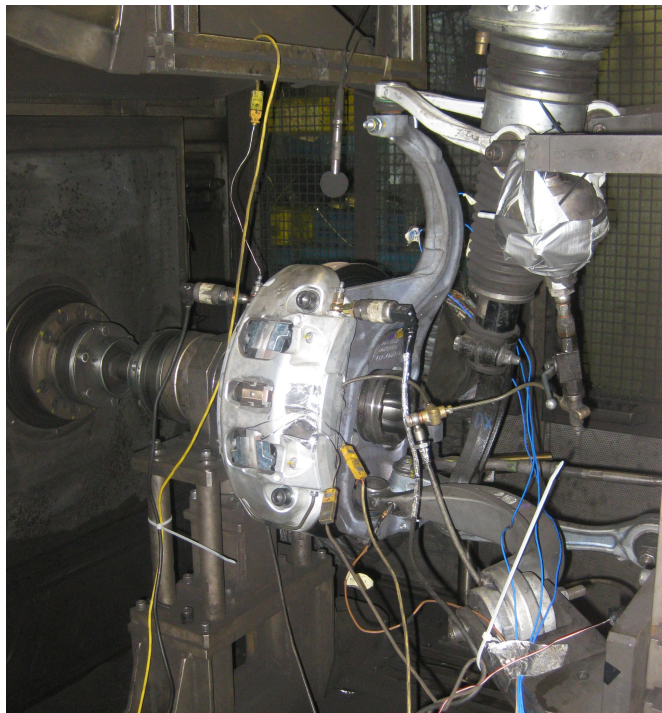
## **2 JUDDER BREMBO**

Scopo di questo elaborato è lo studio del fenomeno del judder con l'aiuto di un programma scritto in linguaggio Matlab. Durante i test al banco, l'assieme sospensione/freno verrà strumentato con degli accelerometri e il loro segnale sarà registrato su un file .mat. A partire da quest'ultimi il programma ricostruirà gli spostamenti dell'assieme e consentirà di suddividere il contributo di ciascun ordine.

Questo capitolo entrerà più nel dettaglio della parte informatica dell'elaborato, cioè la scrittura del programma “Judder Brembo”.

### **2.1 Considerazioni preliminari**

Prima di scrivere un programma per computer, è necessario decidere nello specifico cosa debba fare e in che modo. In questo modo la struttura del programma sarà dedicata a svolgere i propri compiti nel metodo più semplice e veloce.



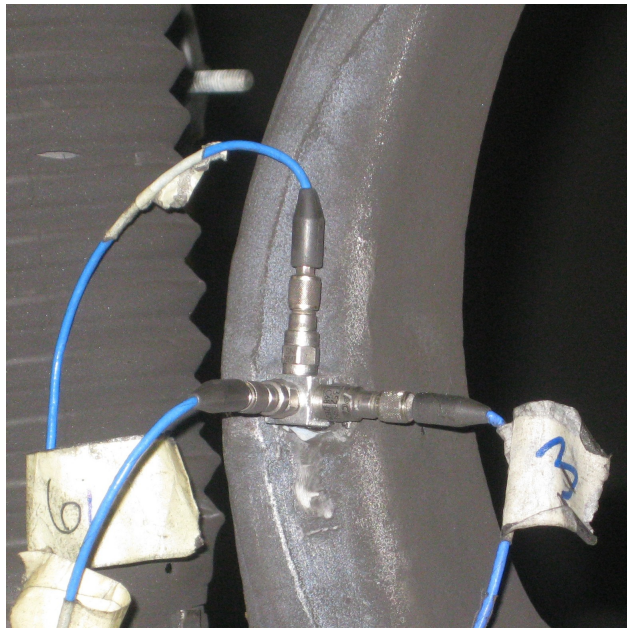
*Figura 2.1: Test al banco*

Il punto di partenza è il banco prova. Quali componenti vengono testati? Come vengono eseguite le prove? Che tipo di dati si ottengono in uscita?

In figura 2.1 è riportata una prova al banco: si monta una sospensione con l'impianto frenante e si mette in rotazione il disco alla velocità opportuna. Per simulare la presenza del veicolo, la sospensione è caricata con lo stesso peso che dovrebbe sopportare se fosse montata veramente sull'auto.

I test effettuati per il judder prevedono il raggiungimento di una certa velocità e poi la discesa, usando il freno, a una inferiore. Durante ogni frenata il motore elettrico del banco viene disattivato e a simulare l'inerzia del veicolo sono dei volani che ruotano alla stessa velocità del disco. Ogni banco ha vari volani a disposizione e le combinazioni disponibili consentono di simulare al meglio l'inerzia del mezzo effettivamente testato.

La strumentazione presente consente di registrare temperature di disco e pastiglie, velocità di rotazione, accelerazioni dei componenti e pressione del fluido frenante alla pompa e ai due lati della pinza.



*Figura 2.2: Accelerometri sul fusello*

Gli accelerometri sono gli strumenti dedicati alla registrazione delle accelerazioni. In figura 2.2 ne è riportato un gruppo di tre collegato al fusello della sospensione. Si nota come siano disposti in posizione ortogonale l'uno rispetto all'altro: in questo modo registrano le sollecitazioni lungo le direzioni delle tre coordinate.

Gli accelerometri sono collegati al componente utilizzando una basetta (che può essere singola oppure a 5 posti come quella in figura 2.2) incollata con una colla epossidica o cianoacrilica.

Il numero e la posizione degli accelerometri è deciso dall'esperienza: se l'esperimento è già stato eseguito e si ha idea di quali siano le posizioni più sollecitate, si cercherà di strumentare quest'ultime a scapito di altre. Se è la prima volta saranno necessari molti più accelerometri.

È proprio il numero di quest'ultimi a porre una limitazione: spesso capita che non ce ne siano abbastanza a disposizione, quindi è necessario dividere l'esperimento in più parti. In ognuna si provvederà a ripetere la frenata, o il ciclo di frenate, spostando gli accelerometri disponibili nelle varie posizioni. Dato che è impossibile che la sollecitazione generata sia identica tutte le volte, un accelerometro viene lasciato fisso e considerato come “*accelerometro di riferimento*”. È proprio il rapporto tra i vari “*segnali di riferimento*” corrispondenti a permettere di riconoscere le differenze in ampiezza e nel tempo tra le varie ripetizioni.

Ogni accelerometro, o gruppo di essi, sarà attaccato a un certo componente della sospensione. Quest'ultima può essere vista come un insieme di pezzi meccanici di cui si conoscono gli spostamenti di alcune loro zone. Più zone saranno caratterizzate e più accelerometri o ripetizioni saranno necessarie, ma si avranno più dati e l'analisi sarà più particolareggiata.

Il tutto va unito alla velocità del disco: con essa si può fare un'analisi agli ordini, cioè in relazione al rapporto tra la frequenza della sollecitazione e quella di rotazione del disco.

Tutti questi dati sono raccolti da un apposito registratore e possono essere esportati in un file .mat per Matlab.

Riassumendo, per scrivere il programma è necessario tenere conto delle seguenti cose:

- La sospensione è costituita da una serie di componenti e i dati raccolti riguardano alcuni punti di essi;
- Ogni test è costituito da più ripetizioni per acquisire più dati possibile con la strumentazione a disposizione;
- Ogni ripetizione avrà un set di segnali (accelerazioni, pressioni, temperature e velocità in un unico file .mat) e uno di loro sarà il riferimento;
- Ogni set avrà una certa differenza nel tempo e nell'ampiezza, quindi sarà necessario spostare i segnali nel tempo e modificarne l'ampiezza in base all'analisi dei segnali di riferimento;
- A partire dal segnale della velocità si può ricavare l'andamento delle sollecitazioni in relazione all'ordine in ogni istante di tempo;

Il programma da scrivere in Matlab, dovrà compiere questi studi sui segnali tenendo conto della loro struttura e della geometria dell'assieme.

## 2.2 L'interfaccia

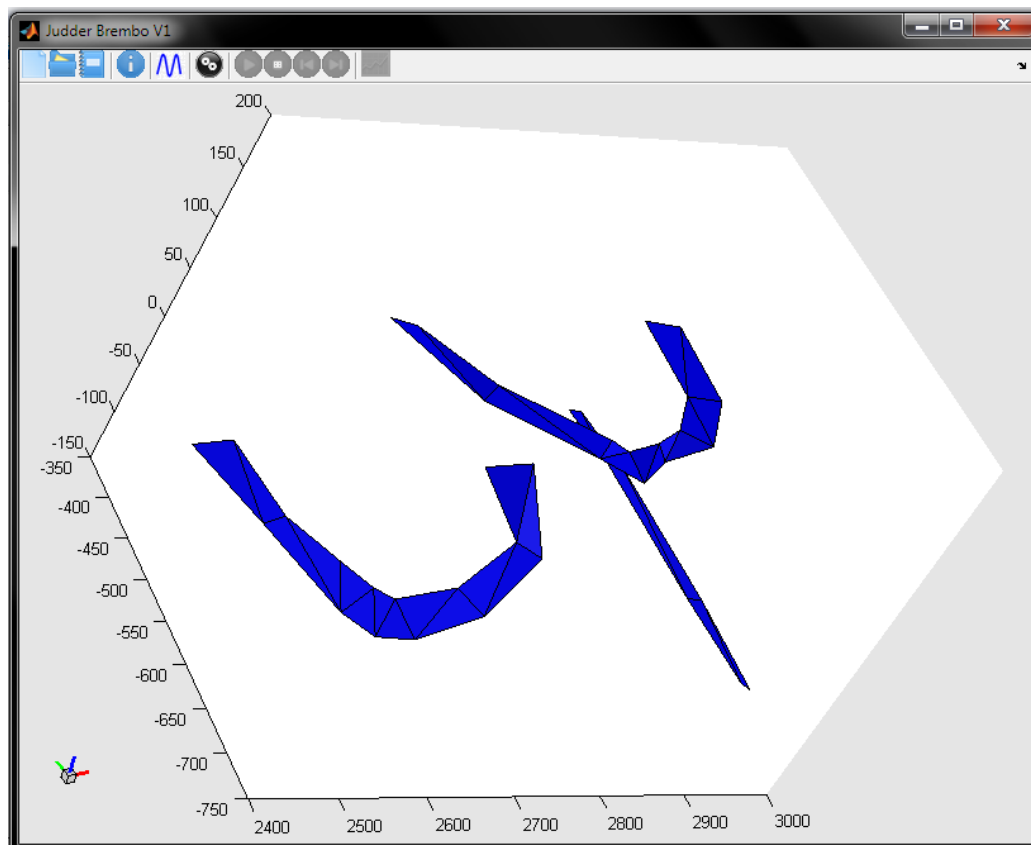



Figura 2.3: Interfaccia del programma con un assieme già caricato

L'interfaccia del programma si presenta come nella figura 2.3: uno spazio tridimensionale con all'interno il disegno stilizzato della parte che si vuole rappresentare e sopra una barra con le opzioni disponibili. In basso a sinistra è presente anche una "bussola" con i tre assi di riferimento.

Ogni bottone della barra è collegato a una funzione del programma. Essi si attivano o disattivano a seconda se è possibile utilizzare o meno quella data funzione, in modo da ridurre gli errori causati dall'attivazione al momento sbagliato di una certa funzione.








Nella seguente tabella sono presentati i vari bottoni.

Tabella 2.1: Bottoni presenti nell'interfaccia principale

	<p><i>Crea nuovo componente</i> Ogni assieme è costituito da una serie di componenti e, con questo</p>
---	--

## Capitolo 2 - JUDDER BREMBO

---

	<p>tasto, è possibile inserirne uno nuovo. Alla fine si potrà salvarlo su un file .txt.</p>
	<p><i>Inserisci nuovo componente</i> Se il componente è già stato disegnato e salvato su file, può essere importato senza disegnarlo di nuovo.</p>
	<p><i>Carica l'intero assieme</i> Se è già stato creato un assieme, compresi i dati degli accelerometri, è possibile importarlo per iniziare subito la fase di elaborazione. Questa volta il file sarà un .mat.</p>
	<p><i>Impostazioni visualizzazione</i> Da qui l'utente sceglie quali componenti vedere nella simulazione, se lo ritiene necessario può anche nasconderli, cancellarne alcuni o regolare l'amplificazione dell'ampiezza.</p>
	<p><i>Impostazione accelerometri</i> Una volta disegnato il componente, è possibile indicare la posizione degli accelerometri su di esso e i segnali ad essi collegati.</p>
	<p><i>Elabora segnali</i> Lancia l'elaborazione dei segnali (spostamento nel tempo, scalatura,...) secondo le impostazioni date dall'utente.</p>
	<p><i>Play</i> Avvia l'animazione, chiedendo prima all'utente alcune impostazioni per regolare velocità, periodo da simulare, ...</p>
	<p><i>Stop</i> Ferma l'animazione.</p>



*Indietro e avanti di uno step*

Permettono di andare avanti o indietro di un solo step dell'animazione.



*Analisi dati*

Da qui l'utente può visualizzare le FFT dei segnali per valutare quale sia meglio simulare e ottenere dati numerici esportabili su un foglio di calcolo.

## 2.3 Gestione componenti

Il primo passo è inserire i componenti per formare un assieme e indicare dove sono posizionati gli accelerometri. I primi 5 bottoni sono dedicati a quest'attività.

### 2.3.1 Inserimento di un nuovo componente

Più che considerare il componente reale, quindi un oggetto tridimensionale, ci si riferisce a una sua stilizzazione con una mesh opportuna.

Ogni mesh è formata da una serie di punti uniti per formare degli elementi.

I primi sono la base: ognuno è caratterizzato da una terna di coordinate cartesiane che ne stabilisce la posizione nello spazio. Per ricavarla è sufficiente utilizzare qualsiasi programma di disegno o calcolo FEM come Catia, Abaqus o Patran. L'importante è che si tenga lo stesso sistema di riferimento per ogni componente, altrimenti risulterà un assieme deformato. L'unità di misura utilizzata per le posizioni, ma anche per tutto il resto del programma, è il millimetro.

Una volta trovata la nuvola di punti che descrive lo schema del pezzo, si passa alla creazione degli elementi della mesh.

Nella letteratura del calcolo FEM ne esistono di vari tipi e sono catalogati per numero di punti o per altre proprietà di interesse nel campo delle simulazioni.

Un esempio proveniente dal calcolo FEM degli sforzi: un elemento triangolare può avere 3 o 6 nodi e le differenze sono nella maggiore velocità di convergenza e, nel secondo caso, nella possibilità di riprodurre la flessione.

Mentre nel calcolo FEM gli elementi sono la base del calcolo della soluzione perché al loro interno le equazioni di congruenze sono sempre rispettate, in questo caso hanno più una valenza grafica e concettuale. Non c'è bisogno di

calcolare gli spostamenti all'interno di un assieme virtuale, ma di analizzare i dati provenienti da un assieme reale e testato al banco.

In figura 2.3, dove era riportato un esempio di interfaccia base, è rappresentata una sospensione a quadrilatero con parte superiore, inferiore e tirante dello sterzo sul lato. Come si può notare essi non sono altro che una superficie che rappresenta la sezione del singolo componente.

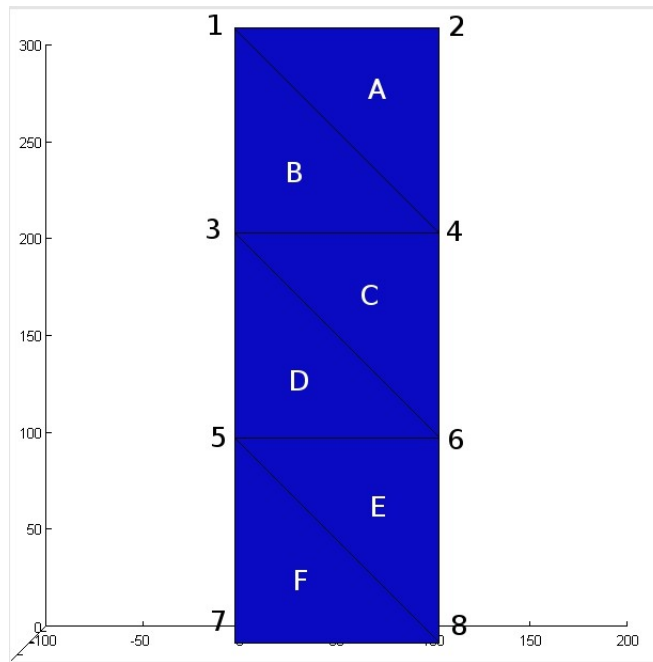


Figura 2.4: Schema di un componente

In figura 2.4 è riportato un componente che può avere qualsiasi forma, dalla piastra al cilindro, ma con sezione rettangolare. Esso costituito da 8 punti uniti in 6 elementi triangolari (indicati con le lettere).

Considerando solo la sezione mediana di un componente si possono compiere errori per eccessiva schematizzazione, quindi è necessario porre attenzione.

Una sospensione d'auto è costituita prevalentemente da elementi tubolari, come i bracci, di diametro il più possibile ridotto per questioni di peso, quindi l'errore non dovrebbe mai essere eccessivo. Ma parti come la pinza o il portamozzo possono portare qualche problema, quindi è necessario valutare volta per volta come disporre i punti.



*Figura 2.5: Interfaccia per l'inserimento di nuovi componenti*

Quando l'utente preme il tasto per inserire un nuovo componente, compare la finestra presentata in figura 2.5. Nella prima tabella si inseriscono le coordinate dei punti mentre nella seconda gli elementi. Ogni riga della prima corrisponde a un punto (numerato secondo la coordinata presente all'estrema sinistra) e nella seconda è sufficiente inserire il numero dei punti che formano un certo elemento.

Al termine dell'inserimento dei dati necessari, l'utente può salvare il componente in modo da non doverlo reinserire di nuovo in futuro. Dato che il formato di salvataggio è testo semplice, l'utente può anche creare il proprio file manualmente con qualsiasi gestore di testi.

Il file avrà la seguente struttura:

Coordinate punti e elementi

```
0 300 0
100 300 0
0 200 0
100 200 0
0 100 0
```



```
100 100 0
0 0 0
100 0 0
Elemen
1 2 4
1 3 4
3 4 6
3 5 6
5 6 8
5 7 8
Fine
```

Il file inizia con “Coordinate punti e elementi” e poi va inserita la matrice con le coordinate (sempre x, y e z in questo ordine). Successivamente si scrive la parola “Elemen” e poi la matrice degli elementi. Con “Fine” il file termina. Al termine del salvataggio comparirà di nuovo la finestra principale aggiornata con il nuovo componente inserito.

### 2.3.2 Apertura di un componente esistente

Con la procedura appena illustrata, l'utente ha un file con all'interno il disegno di un componente.

Se si volesse aprire uno di questi file per inserirlo in un altro assemblato, esso può essere tranquillamente riaperto senza ripetere la procedura di inserimento dati. Basta cliccare sull'apposito bottone per visualizzare la finestra di scelta dei file sul computer e scegliere quale caricare. Esso si aggiungerà ai componenti già presenti nell'assieme.

### 2.3.3 Apertura di un assieme

Questa funzione consente di caricare l'intero assieme senza dover svolgere quest'operazione per i singoli componenti.

A differenza di prima, il file da scegliere è un .mat. Al suo interno contiene tutti i dati necessari a definire i componenti inseriti, la posizione degli accelerometri e i file che contengono i rispettivi segnali. Avendo già tutto il necessario, l'utente può passare direttamente all'elaborazione dei dati senza reinserire tutto da capo. La creazione di questi file avviene dopo l'impostazione degli accelerometri, come verrà ripreso in seguito.

### 2.3.4 Opzioni della visualizzazione dei componenti

Dopo aver inserito i componenti, l'utente potrebbe volerne cancellare alcuni o nasconderli per motivi legati all'animazione. Questa funzione si occupa proprio di questi aspetti.

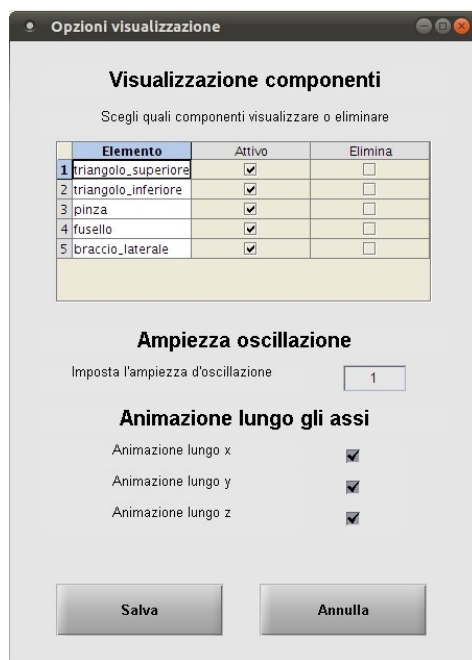


Figura 2.6: Finestra delle opzioni di visualizzazione

Alla pressione del pulsante, appare la finestra riportata in figura 2.6. Essa è divisa in due parti: la prima riguarda i componenti, la seconda l'animazione. Nella prima parte c'è una tabella con l'elenco dei pezzi inseriti e due colonne con delle caselle di spunta riferite ad essi. Nella prima colonna è possibile scegliere se visualizzare o meno il componente a cui fa riferimento senza rimuoverlo dall'assieme. Nella seconda, in caso di selezione, esso verrà completamente cancellato e sarà necessario reinserirlo se lo si vuole visualizzare di nuovo. La seconda parte contiene l'impostazione delle ampiezze di oscillazione e dell'animazione lungo i tre assi cartesiani.

Dato che le prime sono molto contenute, tutti i programmi di simulazione danno la possibilità di amplificarle. In questo modo è più facile comprendere i movimenti della struttura. Per impostare il valore voluto, basta inserire un numero nell'apposita casella di testo.

Per gestire l'animazione lungo i tre assi cartesiani, è sufficiente selezionare l'apposita casella con un segno di spunta. Questa funzione è utile quando un componente è sottoposto a varie accelerazioni di intensità differente: quella maggiore tenderà a nascondere le altre complicando lo studio dell'assieme. Al termine è sufficiente premere Salva per apportare le modifiche volute.

## 2.4 Gestione degli accelerometri e dei loro segnali

Una volta modellato l'assieme, si può procedere ad indicare dove sono collocati gli accelerometri e i loro segnali per elaborare l'animazione.

Ogni punto della mesh che rappresenta il componente è dotato di 3 gradi di libertà corrispondenti ai 3 assi cartesiani. Per caratterizzare lo spostamento di ognuno di loro è necessario un accelerometro, quindi ogni punto avrebbe bisogno di 3 segnali. Dal punto di vista pratico, cioè dell'allestimento del banco, si fa come in figura 2.2: si montano 3 accelerometri su una basetta, ognuno in direzione ortogonale a quell'altro.

Dato che i punti della mesh sono più fitti rispetto alle posizioni degli accelerometri, non è possibile assegnare un gruppo di segnali a ogni punto, ma è preferibile assegnarlo a un elemento o più.

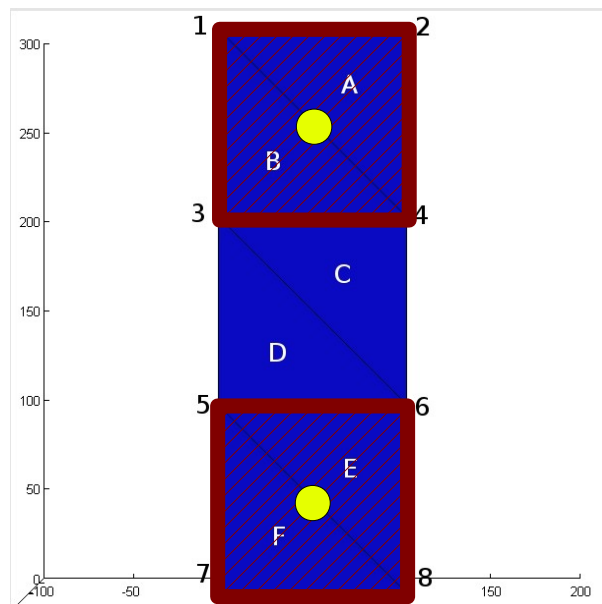


Figura 2.7: Componente con due accelerometri

In figura 2.7 è rappresentato lo stesso componente della 2.2, ma con l'aggiunta dei due gruppi di accelerometri, indicati con punti gialli. I punti degli elementi A e B sono collegati al primo gruppo, mentre quelli di E e F al secondo. C e D non sono collegati ad alcun accelerometro, ma i loro punti sono in comune con gli altri elementi che, invece, lo sono. In questo modo essi si muoveranno “ereditando” gli spostamenti degli elementi confinanti. Se anche quest'ultimi fossero scollegati, nella simulazione rimarranno fermi per assenza di segnali di accelerazione.

È bene, per avere una simulazione veritiera, che ogni elemento senza accelerometri condivida dei punti con quelli che, invece, ce l'hanno. In questo modo ogni elemento sarà in movimento.



Figura 2.8: Finestra per l'inserimento delle posizioni degli accelerometri

In figura 2.8 è riportata la finestra per inserire tutti i dati riguardanti la posizione degli accelerometri. Dalla tabella a sinistra l'utente può selezionare il componente su cui lavorare, mentre, in quella di destra, inserisce le posizioni.

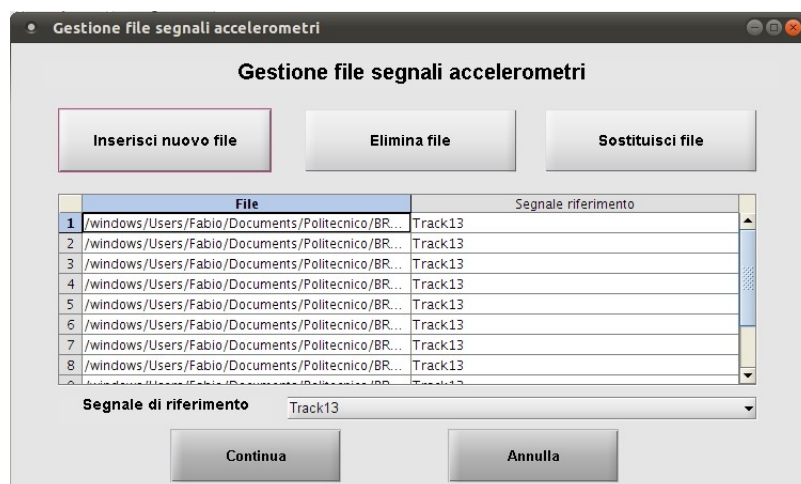


Figura 2.9: Finestra per gestire i file dei set

Come detto prima, ogni accelerometro interessa 4 punti della mesh, e l'utente è invitato ad inserire proprio loro nelle prime 4 colonne.

L'ultima a destra riporta dei menù a discesa da cui si può selezionare la direzione. Le tre direzioni hanno anche due versi, positivo e negativo, a seconda di come è stato posizionato l'accelerometro. Quest'ultimo ha il senso positivo rivolto dal lato in cui esce il cavo e va accordato con il sistema di riferimento principale dell'assemblato.

Al termine dell'inserimento delle posizioni e direzioni, l'utente può premere "Continua" per passare all'indicazione dei file che contengono i segnali.

In figura 2.9 è riportata la finestra per inserire i file con i segnali.

Come spiegato negli scorsi paragrafi, quando non si hanno a disposizione abbastanza accelerometri si ricorre alla registrazione di più set di segnali. Di conseguenza il programma dovrà trattare vari file .mat con all'interno i singoli segnali.

Con i tre tasti in alto, l'utente può inserire o rimuovere i file, che appariranno nella tabella al centro. Quando si compie la prima operazione, comparirà la finestra per l'apertura di file propria del sistema operativo utilizzato.

Dato che ogni set avrà delle differenze a livello di ampiezza e durata del fenomeno, per ognuno di essi è necessario indicare un segnale di riferimento su cui saranno effettuare tutte le operazioni di elaborazione dati spiegate nel paragrafo 2.5. Alla selezione di un file nella tabella, sarà possibile sceglierne il riferimento dal menù a tendina nella parte inferiore della finestra.

Il tasto "Elimina file" cancella il file dall'elenco. Questa funzione ha anche un ruolo secondario: può essere usata per cambiare l'ordine dei set. Dato che il primo decide la lunghezza del segnale ed è il riferimento per la scalatura, si potrebbe anche cambiarlo con un altro a seconda del volere dell'utente.

Quest'operazione si può compiere su un modello con già tutti gli accelerometri impostati, in modo da non doverlo rifare da capo. Prima di proseguire, però, è necessario reinserire il set cancellato in fondo, altrimenti si creerà un errore durante l'elaborazione dei segnali.

L'ultimo tasto permette di sostituire un file con un altro che abbia gli stessi nomi dei segnali. Quest'opzione è utile quando i file vengono spostati o quando si vuole fare vari modelli per varie frenate. Le prove, come si vedrà nel prossimo capitolo, sono costituite da 8 frenate e a ognuna corrisponde un file .mat. Di solito si analizzano la 4° e la 8°: con questa funzione si inseriscono tutti i dati necessari per la 4°, si salva il modello e poi si modificano solo i nomi dei file per la 8° senza dover reinserire tutto.

Al termine delle operazioni, l'utente può proseguire premendo "Continua": comparirà quanto presentato in figura 2.10. Se si preme Annulla, si torna alla selezione della posizione degli accelerometri.

Nella nuova finestra ci sono due tabelle: quella in alto contiene l'elenco dei componenti e quella centrale i rispettivi accelerometri. Per ognuno di

quest'ultimi va indicato un file e un segnale contenuto in esso attraverso i due menù a discesa nella parte in basso della finestra.

Con i due tasti in fondo, l'utente può terminare l'inserimento dati oppure tornare alla definizione dei file dei segnali. Se si va avanti, verrà richiesto dove salvare il file .mat con i dati relativi a punti, elementi ed accelerometri. Grazie ad esso si potrà caricare, in un secondo tempo, l'assieme già definito e pronto per l'analisi e l'animazione.

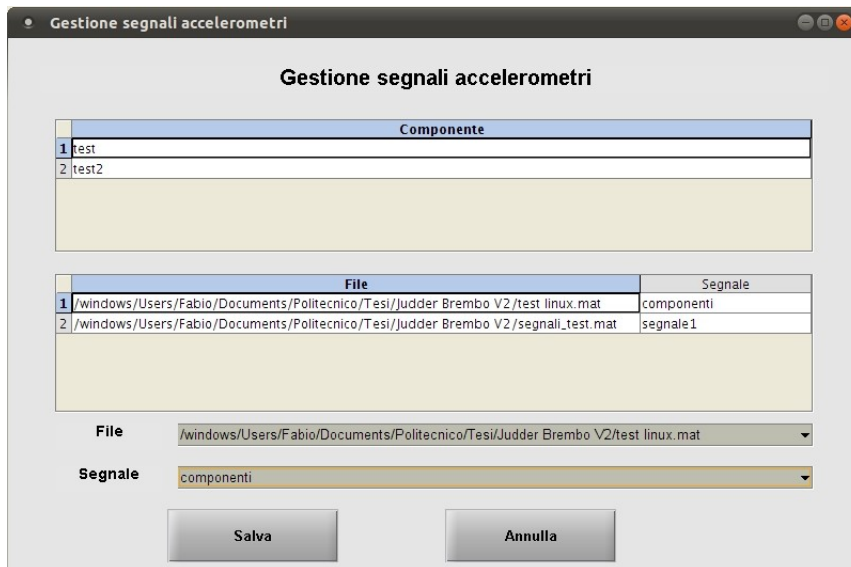


Figura 2.10: Finestra per assegnare un segnale ad ogni accelerometro

## 2.5 Elaborazione dati

Questa è la parte più importante del programma perché consente di combinare dati provenienti da test effettuati in tempi differenti e di passare da un segnale di accelerazione a uno spostamento.

La procedura ideata è la seguente:

1. Annullamento delle differenze nel dominio del tempo attraverso la crosscorrelazione e modifica di durata;
2. Suddivisione del tempo in periodi (*slice*) da analizzare separatamente per studiare l'evoluzione del fenomeno;
3. Applicare la Trasformata di Fourier (*Fast Fourier Transform* o *FFT*) ad ogni slice per ottenere lo spettro;
4. Utilizzare quest'ultimo per ricostruire gli spostamenti.

### 2.5.1 Correzione dei ritardi: la crosscorrelazione

Ogni registrazione di un segnale ha un inizio e una fine che devono essere collocati, nel tempo, prima e dopo la manifestazione del fenomeno di interesse. Il metodo più semplice è compiere tutto a mano: il registratore viene acceso o spento quando l'utente che segue l'esperimento lo ritiene necessario.

Se si confrontano varie registrazioni dello stesso fenomeno effettuate in tempi differenti con questo metodo, si troveranno degli errori grossolani. È normale che ogni utente abbia una sensibilità e anche dei riflessi diversi nel gestire la registrazione, anticipando o ritardando ogni volta l'inizio e la fine.

Per ridurre questi errori, e automatizzare il sistema, si usa il *trigger*: uno dei segnali viene monitorato di continuo e, quando raggiunge un determinato valore, la registrazione inizia. La strumentazione utilizzata consente di impostare vari parametri:

- Valore soglia: quando la quantità rilevata è sopra di esso, la registrazione è attiva;
- Tempo sopra valore soglia: durata della permanenza sopra il limite;
- Pre-trigger: nella registrazione è incluso anche un certo periodo di tempo prima dello scatto del trigger;
- Post-trigger: c'è anche un periodo successivo alla fine del trigger.

È ovvio che il segnale trigger va scelto con molta attenzione: esso deve essere strettamente correlato al fenomeno che si vuole registrare e deve far rimanere attivo il trigger per tutto il tempo necessario.

I segnali provenienti dagli accelerometri non sono adatti: essendo una vibrazione la base di tutto, l'accelerazione sarà un'onda che non rimarrà stabilmente sopra il valore di soglia (nel dominio del tempo). L'ideale è la pressione del fluido freni perché permette al freno di entrare in azione, e fare judder, e le oscillazioni non sono intorno allo zero, ma intorno a un valore finito. Basta impostare un valore soglia abbastanza basso per registrare tutto il fenomeno evitando i tempi tra una frenata e l'altra (in cui la pressione è nulla). Come detto all'inizio del discorso, il trigger permette di ridurre gli errori nell'inizio e fine registrazione, ma non di annullarli. Buona parte della colpa di ciò è della risposta del sistema: essa non sarà sempre uguale in tutte le ripetizioni, ma ci saranno delle piccole differenze. Se fossero abbastanza grandi da influire sul trigger, avrò dei segnali in anticipo o ritardo sugli altri.

Per capire la gravità del problema si può fare un esempio: ogni segnale, nel passo successivo, verrà suddiviso in slice e di ognuna verrà fatta la FFT per fare i confronti. Con una risoluzione in frequenza di 1Hz sono richieste delle slice di 1s (può avanti sarà spiegato perché) e, durante lo sviluppo del programma, sono stati rilevati ritardi fino a 0,6s. In termini assoluti l'errore è minimo, ma, confrontato alla durata della slice, esso corrisponde al 60% dei dati utilizzati: si arriva quasi a confrontare una slice con quella successiva o precedente in cui il

fenomeno è a uno stadio differente. L'errore non è affatto trascurabile anche se è stato usato un trigger.

Di conseguenza, è necessario un sistema di post-elaborazione dati per correggere l'errore o, comunque, ridurlo il più possibile.

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (2.1)$$

La correlazione tra segnali prevede la sovrapposizione di uno sull'altro applicando un certo ritardo tra i due (equazione 2.1). Da essa derivano altri due strumenti utilizzati nell'elaborazione dei segnali:

- *autocorrelazione*: correlazione di un solo segnale su se stesso e sfruttata per trovare i periodi se quest'ultimo presenta dei disturbi;
- *crosscorrelazione*: i segnali sono differenti e trova il ritardo tra di essi, quindi è adatta a correggere l'errore evidenziato nel paragrafo precedente.

L'equazione 2.1 è riferita a un segnale continuo nel tempo, ma quello registrato dal banco è discreto con una risoluzione nel tempo pari alla frequenza di acquisizione. L'equazione 2.2 non è altro che la 2.1 adattata a un segnale discreto.

$$R_{XY}(k + \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} x(i)y(i+k) \quad (2.2)$$

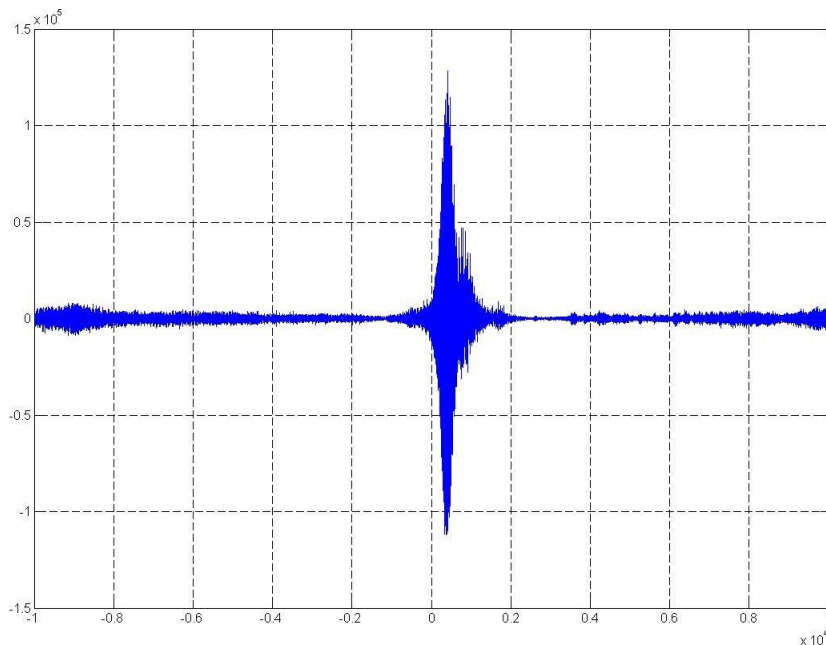


Figura 2.11: Crosscorrelazione di due segnali



La figura 2.11 riporta il grafico di una crosscorrelazione di due segnali presi dal banco prova: sull'asse delle x è riportata la  $k$ , cioè il ritardo tra primo e secondo segnale applicato durante il calcolo. Esso va da  $-N$  a  $N$ , dove  $N$  è il numero delle rilevazioni. Si nota come il risultato abbia un picco in un punto vicino al valore mediano delle  $k$ .

Per risalire al ritardo tra i due segnali, si misura la distanza tra valore mediano e picco. Per trovare il primo basta conoscere la lunghezza dei due segnali: la crosscorrelazione ha un numero di dati pari al doppio di quelli del segnale più lungo meno uno. Per il secondo basta trovare il valore massimo. Il risultato ottenuto sarà espresso in numero di dati, quindi, moltiplicando per la risoluzione nel tempo (dipendente dalla frequenza di acquisizione), si trova il ritardo in secondi.

I segnali registrati dal banco, dopo alcune prove, hanno denotato un ritardo compreso tra  $\pm 0,6s$ , risultato totalmente comprensibile.

Una volta a conoscenza della correzione necessaria, il programma provvede ad applicarla: il secondo segnale del confronto sarà ritardato o anticipato della quantità giusta. In entrambi i casi compariranno delle parti all'inizio o alla fine, di dimensioni pari a quanto indicato dalla crosscorrelazione, di cui non si hanno dati: esse verranno riempite con dei valori nulli.

Quest'operazione non viene eseguita su tutti i segnali, ma soltanto su quelli di riferimento perché avranno un andamento simile. Tutti gli altri segnali verranno anticipati o ritardati del valore derivante dal riferimento del loro set. Si ricorda che il segnale di riferimento è quello dell'accelerometro fisso, cioè quello che non viene mai spostato tra un set e l'altro.

Tra i vari set di segnali esiste una gerarchia: il primo set è quello con cui verranno confrontati tutti gli altri. I suoi segnali non saranno mai modificati, mentre gli altri sì.

Anche la lunghezza del segnale è stabilita dal primo set: quelli più lunghi saranno tagliati e a quelli più corti saranno aggiunti dei valori nulli alla fine. Ovviamente quest'operazione sarà eseguita dopo l'applicazione della crosscorrelazione, in modo da lavorare su dati già corretti nel tempo.

Adesso i dati sono pronti per essere divisi in slice di tempo e per applicare la Trasformata di Fourier.

### 2.5.2 Divisione in slice e FFT

La Trasformata di Fourier (FFT dall'inglese Fast Fourier Transform) permette di ricavare lo spettro del segnale, passando dal dominio del tempo a quello delle frequenze. Invece di avere un valore di accelerazione per ogni frazione di secondo, si avranno un'ampiezza e una fase per ogni frequenza.

Grazie a Fourier, un segnale complesso come quello registrabile dal banco, può essere scomposto in una serie di sinusoidali che, una volta sommate, permettono di tornare al segnale di origine. Ciò è estremamente utile, perché anche la ricostruzione degli spostamenti si baserà su questo principio.

$$X_q = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-i \frac{2\pi}{N} k q} \quad q=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2.3)$$

L'equazione 2.3 riporta la formula di calcolo della Trasformata di Fourier per un segnale discreto. I dati in ingresso ( $x_k$ ) sono di tipo complesso o reale (quest'ultimo è il caso del segnale degli accelerometri), quelli in uscita complessi.

La Trasformata Veloce di Fourier, vera traduzione di FFT, non è altro che un algoritmo più veloce ad effettuare il calcolo. Mentre l'equazione della Trasformata richiede  $N^2$  operazioni, una FFT con l'algoritmo di Cooley-Tukey (il più utilizzato) si accontenta di  $N \cdot \log(N)$ . Quest'ultimo si basa sullo spezzare ricorsivamente una Trasformata in altre più piccole tali che  $N=N_1 \cdot N_2$ , con  $N_1$  ed  $N_2$  indicanti il numero di dati elaborati da ciascuna.

Il risultato della FFT dipende da due parametri: dalla risoluzione in frequenza e dalla frequenza di campionamento.

$$Durata [s] = \frac{1}{\Delta f} \quad (2.4)$$

La durata necessaria del segnale è dettata dalla risoluzione in frequenza, come indicato dall'equazione 2.3. La frequenza di campionamento, invece, stabilisce la frequenza massima raggiungibile. Quest'ultima sarà pari alla metà della prima grazie al teorema di Nyquist che permette di evitare l'aliasing.

Per spiegare quest'ultimo spiacevole fenomeno, è necessario conoscere come avviene la digitalizzazione e registrazione di un segnale: il computer rileva un valore un certo numero di volte al secondo (frequenza di campionamento). Se, per esempio, la frequenza di un'ipotetica sinusoidale fosse identica ad esso, otterrei una serie di valori identici falsandomi la registrazione. Questo è l'effetto dell'aliasing. Se si aumentasse la frequenza di acquisizione, si andrebbe a ridurre il problema.

Nyquist dice che se il campionamento è più del doppio della frequenza massima del segnale, eliminerò questo fenomeno.

Altro problema molto sentito nell'elaborazione dei segnali è il leakage: per rilevare correttamente frequenza e ampiezza di un'onda è necessario registrare periodi interi, cosa impossibile da fare dato che la lunghezza di quest'ultimi è sconosciuta a priori. Le parti di periodo rimanenti sono la causa delle inesattezze.

Dato che è impossibile eliminarle, si può solo ridurre gli effetti.

Moltiplicando la slice di tempo per una finestra come quella di Hamming (in figura 2.12) si possono ridurre gli effetti delle parti di periodo residue. Si nota come la parte centrale sia moltiplicata per l'unità, quindi lasciata invariata, mentre i lati arrivano fino a meno di 0,1.

L'applicazione della finestra, però, va a modificare le ampiezze risultanti della FFT. Per ritornare all'ampiezza originaria è sufficiente moltiplicare tutto lo spettro ottenuto con Fourier per 1,8537. Questo numero si ottiene facendo la FFT con Hamming di un segnale periodico semplice (una sinusoidale) tagliato esattamente alla fine del periodo: il numero sarà il rapporto tra l'ampiezza

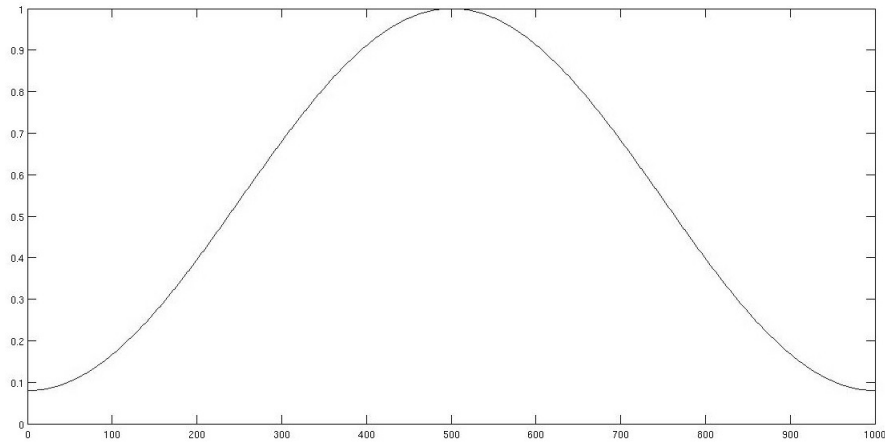


Figura 2.12: Finestra di Hamming

risultante e quella effettiva.

In figura 2.13 sono riportate due FFT di un segnale costituito dalla somma di due sinusoidali di ampiezza 2 e frequenza 3 e 6Hz. Esso è stato tagliato in un punto non corrispondente alla fine di un periodo generando leakage: con la finestrata rettangolare, cioè il taglio semplice, si nota come le ampiezze siano

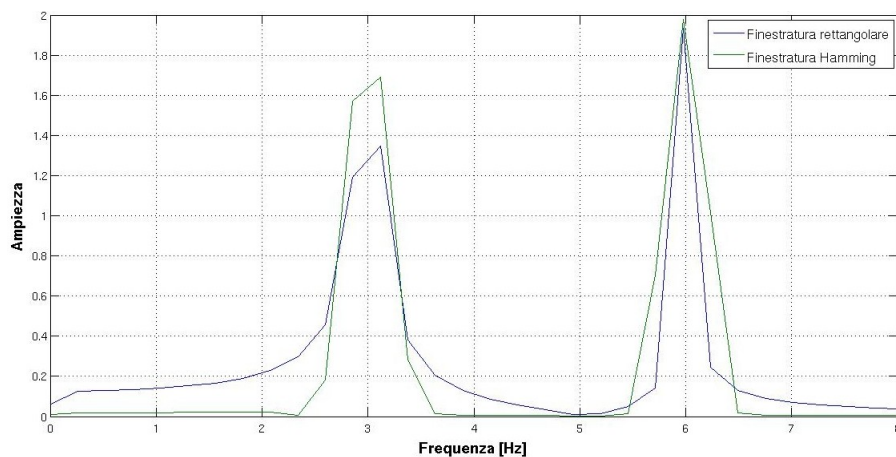


Figura 2.13: Confronto tra finestrata rettangolare e Hamming

più piccole rispetto a quanto rilevato con la Hamming. Anche quest'ultima genera un errore, ma più contenuto.

L'errore non riguarda solo le ampiezze, ma anche le frequenze.

La divisione in slice è eseguita per monitorare l'evoluzione del fenomeno con il passare del tempo.

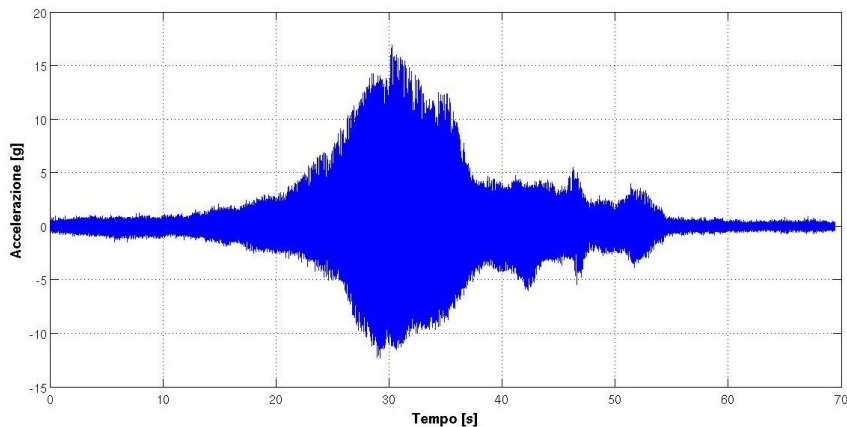


Figura 2.14: Accelerazioni registrate durante un fenomeno di judder

Come si vede chiaramente in figura 2.14, il judder non è stabile, ma raggiunge un picco nella parte centrale della frenata. Dividendo in slice il segnale, si può fare l'FFT di ognuna e ricostruire gli spostamenti avvenuti in quel periodo di tempo.

Dato che la risoluzione in frequenza allunga il segnale necessario, riducendo le slice, è possibile utilizzare l'overlap: invece di dividere in periodi di tempi consecutivi, si dà la possibilità di sovrapposizione. Un overlap del 50%, per esempio, dimezza l'intervallo di tempo tra l'inizio di una slice e l'altra perché metà periodo è in condivisione.

L'utente può impostare tutti questi parametri liberamente: dalla finestra dell'elaborazione dati può scegliere la risoluzione in frequenza e l'overlap, mentre da quella della riproduzione, il periodo temporale di cui fare l'animazione. Quest'ultima sarà presentata tra poco.

### 2.5.3 Scalatura dei segnali

Il fenomeno del judder non è mai costante tra una ripetizione e l'altra, ma può avere delle differenze più o meno accentuate nell'intensità e nella durata.

L'accelerometro di riferimento, dato che non si sposta mai tra un set e l'altro, fornisce la possibilità di trovarle.

Precedentemente, il suo segnale è stato utilizzato per rifasare il segnale nel tempo, ma è di fondamentale importanza anche per modificare le ampiezze e le fasi trovate dalle FFT.

$$C_a(f) = \frac{A_{rif1}(f)}{A_{rif2}(f)} \quad C_\phi(f) = \phi_1(f) - \phi_2(f) \quad (2.5)$$

Le due equazioni al punto 2.5 consentono di trovare i due coefficienti rappresentanti i rapporti di ampiezza e fase tra i due segnali di riferimento. Essi sono calcolati frequenza per frequenza.

$$A_2(f) = \frac{A_1(f)}{C_a(f)} \quad \phi_2(f) = \phi_1(f) - C_\phi(f) \quad (2.6)$$

Le 2.6 sono semplicemente le 2.5 con esplicitati i valori di ampiezza e fase del segnale. Esse sono da applicare ai segnali contenuti nel secondo set di dati che si sta considerando.

Ricapitolando: si ricavano le due serie coefficienti  $C_a(f)$  e  $C_\phi(f)$  confrontando il segnale di riferimento del primo set di dati con quello del set in elaborazione, poi essi vengono applicati con le 2.6 ai segnali di quest'ultimo set. Tutto questo non va fatto sull'intero segnale ma slice per slice, in modo eguagliare anche la durata del fenomeno.

Al termine si avranno dei set di segnali registrati durante prove in cui il judder si è presentato con le medesime modalità. Ancora una volta il primo set fa da riferimento a tutti gli altri.

#### 2.5.4 Ricostruzione degli spostamenti in base all'ordine

Grazie alle operazioni precedenti, i segnali degli accelerometri presenti nei vari set sono stati rifasati nel tempo, portati alla stessa lunghezza, divisi in slice, di ognuna è stata fatta la FFT che poi è stata scalata. Adesso si è pronti a risalire agli spostamenti dell'assieme.

La FFT, come spiegato in precedenza, divide i segnali periodici composti nelle sinusoidali che li compongono: di ognuna si avrà ampiezza, frequenza e fase.

Per ricostruire gli spostamenti non si farà altro che considerare le sinusoidali più importanti e farle passare da accelerazioni a spostamenti.

Quest'ultimo passaggio può essere effettuato risolvendo degli integrali, perché l'accelerazione non è altro che la derivata seconda dello spostamento.

$$\begin{aligned} a &= A \sin(2\pi f t + \phi) \\ v &= \int a = -\frac{A}{2\pi f} \cos(2\pi f t + \phi) \\ s &= \int v = -\frac{A}{(2\pi f)^2} \sin(2\pi f t + \phi) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Grazie agli integrali svolti nelle 2.7, il segnale in accelerazione è stato trasformato in spostamento. Dato che gli accelerometri registrano in g, esso andrà moltiplicato per  $9,81\text{m/s}^2$  e per 1000 per avere i millimetri, cioè l'unità di misura utilizzata per il disegno 3D.

Il prossimo passo è la scelta delle sinusoidali più significative per la ricostruzione dello spostamento. Per far ciò ci si riconduce all'ordine della sollecitazione.

Il judder si presenta come una vibrazione con frequenza dipendente da quella di rotazione del disco. Tra di esse c'è lo stesso rapporto che c'è tra le armoniche, cioè la prima è multiplo della seconda.

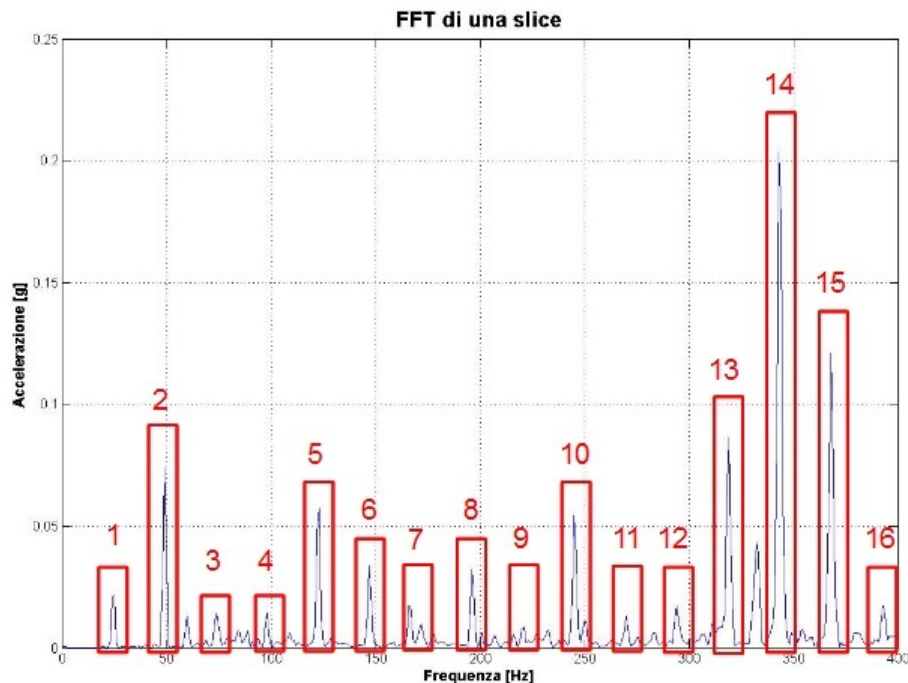


Figura 2.15: Ordini nella FFT di una slice di tempo

In figura 2.15 sono evidenziate le frequenze più eccitate e si può vedere come siano equispaziate e dipendenti dal 1° ordine, cioè da quello della ruota. Dato che quest'ultima rallenta durante la frenata, tutti i picchi si ridurranno di frequenza con il passare del tempo.

In teoria, l'ideale sarebbe prendere tutte le frequenze presenti nella FFT ma, con una risoluzione pari a 1Hz e 2kHz di campionamento, sarebbero 1024, richiedendo una potenza di calcolo non indifferente. Va considerato che questi calcoli vanno eseguiti per ogni frame dell'animazione e, per non vedere le immagini a scatti, sono come minimo 25.

Considerando solo le frequenze degli ordini, quindi, si commetterà un errore, ma comunque molto piccolo perché in esse si registrano le ampiezze maggiori. Rimanendo in accordo con la definizione di judder, conviene considerare solo i primi 20 ordini, perché quelli superiori non fanno più parte di questo fenomeno. Ovviamente non è detto che la frequenza di un ordine sia un multiplo perfetto di quella della ruota, ma può essere leggermente inferiore o superiore. Sempre in figura 2.15, si può notare come il picco del 7° ordine abbia una frequenza leggermente inferiore. Per aggirare questo problema, il programma seleziona il picco più alto in un range di frequenze intorno a quella scelta. Le dimensioni di esso sono uguali alla velocità della ruota: se quest'ultima girasse a 20Hz, il range sarebbe  $\pm 10\text{Hz}$ .

Una volta scelte le frequenze, si provvede a sommare ogni sinusoidale ricostruita a partire dai dati della FFT.

Con questo sistema di calcolo è possibile anche considerare un solo ordine e l'utente può selezionare questa e tutte le altre opzioni dall'interfaccia di gestione dell'animazione presentata nella prossima sezione.

### **2.5.5 Finestra di lancio dell'elaborazione**



*Figura 2.16: Finestra impostazioni elaborazione dati*

Per lanciare tutte le operazioni sui segnali appena spiegate, l'utente deve premere l'apposito tasto sull'interfaccia principale. Di seguito comparirà la finestra di pagina 2.16 in cui può impostare tutti i parametri necessari. Mentre risoluzione in frequenza e overlap appartengono direttamente alla FFT e alla divisione in slice, le altre opzioni riguardano la velocità: essa sarà contenuta in un file, che può essere benissimo quello di un set già utilizzato. Con l'apposito tasto, l'utente può selezionare il file e poi il segnale dal menù a tendina sottostante.

Il raggio ruota serve per passare dai giri al minuto, unità di misura del segnale registrato dal banco, ai km/h. Attenzione all'unità di misura richiesta, perché è l'unico caso in cui va inserito un valore in metri.

Al termine l'utente non deve fare altro che premere “Prepara i dati” per continuare. Comparirà un avviso di elaborazione in corso perché la procedura potrebbe essere lunga, specie se ci sono tanti segnali a disposizione.

## 2.6 Gestione dell'animazione

In questa sezione verrà presentato come l'utente può controllare l'animazione e i suoi parametri di gestione.

I comandi base sono quelli classici per la gestione di filmati: play, stop, avanti e indietro di un fotogramma. Essi si attivano solo dopo l'esecuzione delle operazioni sui segnali perché, altrimenti, non sarebbero disponibili dati da rappresentare.

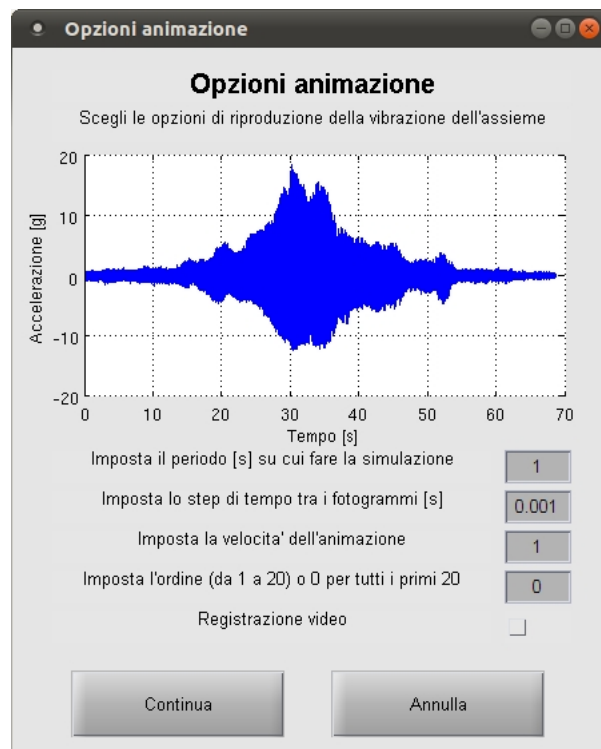


Figura 2.17: Finestra opzioni dell'animazione

Alla pressione del tasto play compare l'interfaccia di figura 2.17, in cui l'utente può regolare varie opzioni. Esse sono:



- *Imposta il periodo su cui fare la simulazione*: dato che il judder ha un'evoluzione nel tempo, anche la deformata si modificherà di conseguenza. Il grafico presentato nella parte alta dell'interfaccia riporta il primo segnale di riferimento, per consentire all'utente di scegliere quale sia il periodo più adatto da riprodurre. Il valore da inserire è in secondi e il programma risalirà automaticamente alla slice corrispondente.
- *Imposta lo step di tempo tra i fotogrammi*: tra un fotogramma e l'altro è calcolata la posizione dei componenti dopo un certo periodo di tempo, impostato da questo parametro. Dal punto di vista matematico è l'incremento della variabile  $t$  nelle equazioni 2.7 a ogni passo.
- *Imposta la velocità dell'assieme*: indica quanto tempo far passare tra un fotogramma e l'altro. Il risultato sarà  $1/n$ , dove  $n$  è il numero appena impostato. Può essere impostato qualsiasi valore, ma è necessario ricordare che più frame per secondo ci saranno e più potente dovrà essere il computer utilizzato. Sopra un certo numero, la simulazione continuerà, ma non ci saranno differenze di velocità. Per quanto riguarda il video, esso corrisponderà al numero di frame per secondo qualunque sia la potenza della macchina.
- *Imposta l'ordine*: indica l'ordine da simulare. Se viene impostato a 0 saranno simulati tutti gli ordini, altrimenti solo quello inserito.
- *Registrazione video*: mettere la spunta nell'apposita casella se si vuole registrare il video. In caso sia richiesto, prima di andare all'animazione, comparirà una finestra di dialogo in cui inserire il nome del file e la cartella di salvataggio. Il formato video è un .avi non compresso, quindi potrebbe occupare molto spazio.

Premendo su “Continua”, si tornerà nella finestra principale e l'animazione mostrerà i movimenti dell'assemblato. È possibile regolare zoom e posizione della telecamera durante di essa, in modo da vederla da vari punti di vista. Con il tasto “Stop” è possibile fermare l'animazione in qualsiasi momento. Se si è scelto anche di registrare il filmato, anche quest'ultima attività sarà interrotta. Con i tasti “Indietro di uno step” e “Avanti di uno step” è possibile muoversi tra i frame. Durante la riproduzione essi saranno disattivati, per tornare operativi dopo aver premuto stop.

## 2.7 Visualizzazione risultati

Per calcolare gli spostamenti dell'assieme, il programma deve compiere delle analisi dati molto utili anche allo studio del fenomeno sotto esame. L'animazione consente di capire in che modo si spostano i componenti, ma un grafico potrebbe aiutare a capire molte altre cose e a quantificare esattamente alcuni aspetti.

Lo studio del judder prevede, per esempio, la ricerca dell'ordine maggiormente eccitato, quindi sarebbe utile far vedere uno spettrogramma o una FFT.

Per questo motivo l'ultimo tasto sulla sinistra permette di visualizzare e salvare tutti i dati ricavati.

Alla pressione del pulsante, appare la finestra di figura 2.18: da essa è possibile vedere i segnali in ingresso, le loro FFT e gli spettrogrammi. Dal primo menù a discesa in alto a sinistra si seleziona il tipo di grafico.

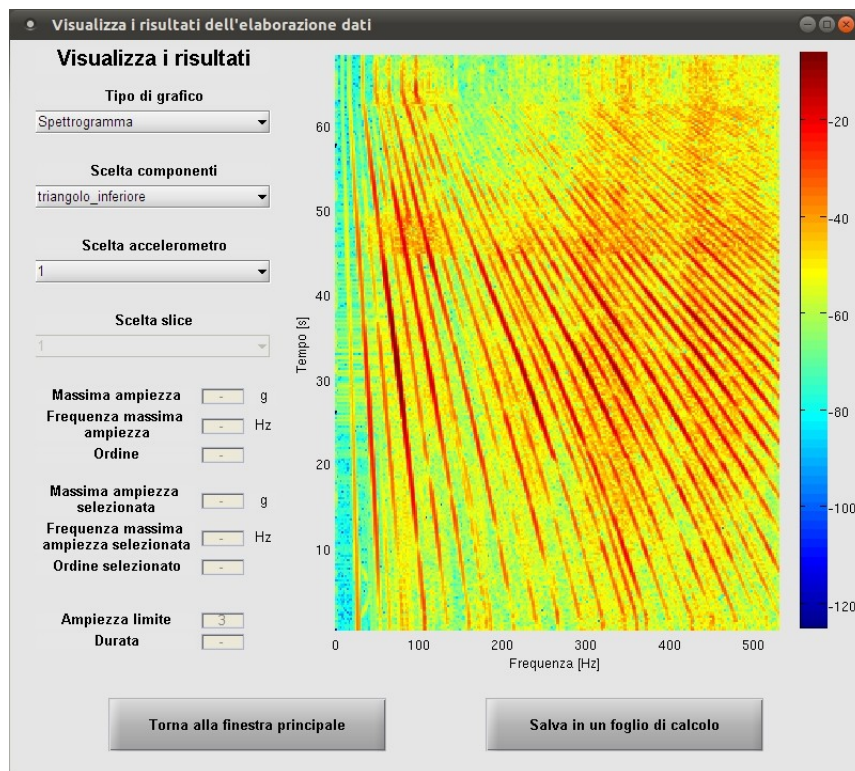


Figura 2.18: Finestra visualizzazione dati

### 2.7.1 Spettrogramma

Il primo grafico disponibile è lo spettrogramma. Esso, riportato nella figura 2.18 e 1.10, traccia l'andamento dell'energia a varie frequenze e periodi di tempo grazie alla densità di potenza spettrale.

Il primo passo è il calcolo della FFT con l'equazione 2.3. Dato che l'energia corrisponde al quadrato dell'ampiezza, le ampiezze trovate vengono moltiplicate per il loro complesso coniugato.

$$S_{AA}(f) = A(f) A^*(f) \quad (2.8)$$

È il cosiddetto autospettro, riportato nell'espressione 2.8. Il risultato sarà una funzione pari con energia, espressa da un numero reale, sia sulle frequenze positive sia sulle negative. Dato che non ha senso di parlare di energia su quest'ultime, l'energia viene riportata su quelle positive semplicemente raddoppiandone il valore.

$$PSD_{AA}(f) = \frac{S_{AA}(f)}{\Delta f} \quad (2.9)$$

La densità di potenza spettrale, o PSD dall'inglese *Power Spectral Density*, è presentata nell'espressione 2.9. L'energia precedentemente calcolata con l'autospettro è rapportata alla dimensione dell'intervallo tra una frequenza e l'altra.

Sul lato del grafico è presente la legenda per far corrispondere a ogni colore del grafico un valore. La PSD viene rappresentata in decibel, secondo l'espressione 2.10.

$$dB = 10 \log_{10} PSD \quad (2.10)$$

Uno spettrogramma dei dati derivanti dal judder ha l'aspetto di figura 2.18: si notano delle righe più scure rappresentanti concentrazioni di energia. Ognuna di esse è un ordine e, in questo caso, il 4° appare essere il più sollecitato. Sull'asse delle x ci sono le frequenze, mentre sulle y il tempo. Le linee appaiono inclinate perché la frenata è in corso e la velocità del disco sta calando.

Sul lato sinistro della finestra è possibile selezionare il componente e l'accelerometro desiderati.

### 2.7.2 Spettri

I risultati delle FFT sono molto importanti per avere un riscontro matematico riguardo quanto visto con l'animazione e lo spettrogramma.

In figura 2.19 è presentato un esempio di trasformata di Fourier di un segnale. Anche in questo caso si notano i vari ordini, ognuno ha un picco, e che il 4° è il maggiore.

Quando si richiede di visualizzare le FFT, si attiva il menù di scelta delle slice. Per aiutare l'utente ad avere un riscontro matematico, sulla sinistra sono presenti i dati sui picchi divisi in due gruppi: massimo assoluto e massimo selezionato dall'utente. Nel primo c'è il massimo presente nella slice, riportato con ampiezza, frequenza e ordine corrispondente. Esso viene calcolato alla selezione del segnale voluto. Il secondo gruppo riporta i dati di un picco selezionato dall'utente: basta cliccare in un punto del grafico per avere i dati del massimo più vicino. Esso sarà anche indicato con un cerchietto rosso. Sempre in figura 2.19, è stato selezionato il 6° ordine e sono apparsi tutti i suoi dati nell'apposita area.

Nella sezione in fondo può essere calcolata la durata del fenomeno: si imposta un valore limite e il programma ricaverà il tempo in cui l'ampiezza è stata superiore ad esso. Esso verrà calcolato al cambio o del segnale o del valore limite.

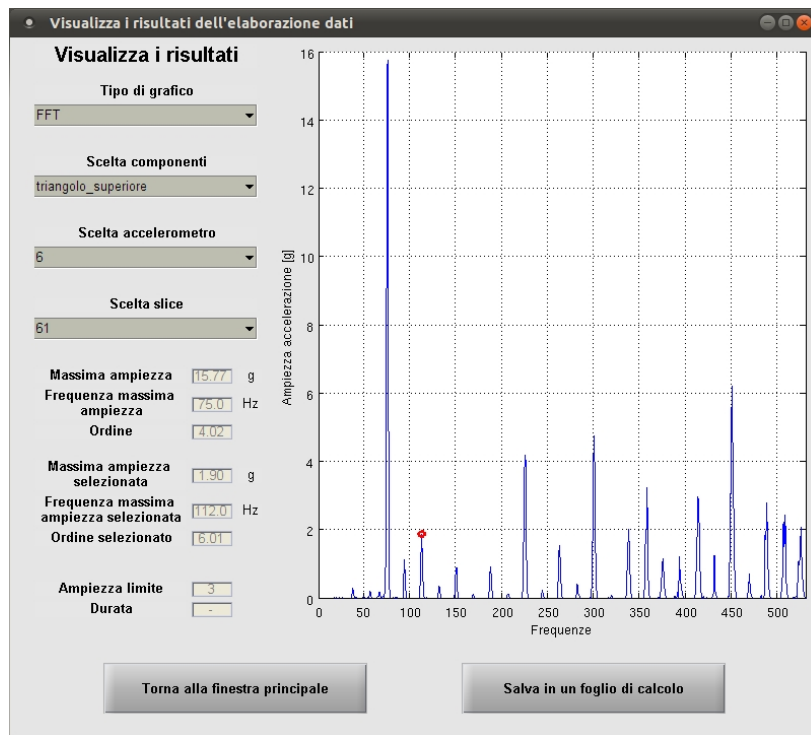


Figura 2.19: Visualizza FFT

Questa funzione è molto importante perché, durante lo svolgimento degli esperimenti, capita spesso che una soluzione non porti grandi variazioni di ampiezza, ma riduca la durata del fenomeno.

### 2.7.3 Segnali

L'ultima funzione riguarda la visione dei segnali. Essa non compie operazioni matematiche, ma permette di vedere i segnali registrati.

Ancora una volta, il menù sulla sinistra consente di selezionare il componente e i segnali dei relativi accelerometri.

### 2.7.4 Esportazione in un foglio di calcolo

Spesso capita che sia necessario seguire l'andamento di un certo ordine nel tempo. I grafici delle FFT consentono di farlo per via grafica e la ricerca dei massimi consente di visualizzare i valori precisi di tutti i picchi. Un metodo per raggruppare tutti i dati necessari in un foglio di calcolo sarebbe di grande aiuto.

Grazie a quest'ultimo l'utente può fare grafici personalizzati o qualsiasi altra cosa ritenga necessario.

Premendo il tasto "Salva in un foglio di calcolo", il programma chiederà prima su quanti ordini fare la ricerca, poi dove andare a salvare i fogli di calcolo corrispondenti.

Ogni file creato corrisponde a un componente e i suoi fogli corrisponderanno ai segnali. All'interno di quest'ultimi si trovano due tabelle:

1. *Tabella dei massimi*: per ogni slice viene riportato il massimo picco raggiunto. Le colonne sono:
  1. Numero della slice;
  2. Ampiezza massima raggiunta, in g;
  3. Frequenza dell'ampiezza massima, in Hz;
  4. Ordine del picco;
  5. Velocità, in km/h;
  6. Velocità, in Hz.
2. *Tabella degli ordini*: per ogni slice vengono rilevati i picchi corrispondenti a un certo ordine. La prima colonna è il numero di slice, poi si alternano ampiezze e relative frequenze per ogni ordine richiesto.

## **2.8 Test del programma**

Prima di utilizzare l'applicazione appena scritta per gestire i dati provenienti dal banco, è necessario fare un piccolo test di verifica. Per far ciò è meglio disegnare un componente molto semplice e generare con Matlab dei segnali appositi. In questo modo si è esattamente a conoscenza della risposta che il programma darà, se funzionerà bene.

### **2.8.1 Dati di partenza**

Come detto in precedenza, i componenti inseriti devono essere molto semplici per prevederne gli spostamenti senza problemi.

In figura 2.20 sono raffigurati i due componenti dell'esperimento: due piastrine composte da 6 elementi ciascuna collegati a due accelerometri lungo l'asse z. Per l'accelerometro A è stato generato un segnale sinusoidale con frequenza 1Hz e ampiezza 1g, mentre per B la somma tra quest'ultimo e un'altra sinusoidale a 4Hz. Il segnale di riferimento è quello di A.

Ci si aspetta che le due estremità si muovano solo lungo z con ampiezza di 248mm, secondo quanto previsto dalle equazioni 2.7. La seconda avrà anche un movimento relativo rispetto alla prima, a frequenza maggiore e ampiezza 15mm. Gli accelerometri C e D hanno gli stessi segnali di A e B, ma con ampiezze raddoppiate. Il primo è quello di riferimento. È stata fatta questa scelta per verificare il buon funzionamento della scalatura: se C è il doppio di A è come se il fenomeno fosse avvenuto con intensità doppia, quindi è da dimezzare per

tornare al pari del primo. Se tutto funzionasse bene, le due piastrine dovrebbero muoversi nello stesso modo.

Il segnale di velocità indicato è di 1Hz fisso durante tutto il periodo di tempo, in modo da poter riconoscere la prima sinusoidale come 1° ordine e la seconda come 4° ordine.

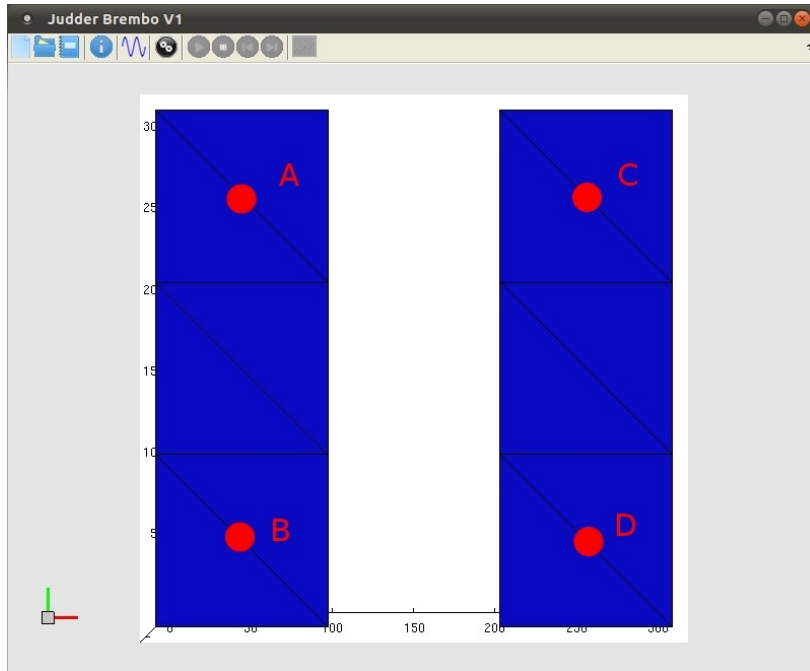


Figura 2.20: Piastrine per il test

Dopo aver lanciato il calcolo di tutto il necessario per l'animazione, si possono fare tre considerazioni:

1. il programma funziona bene;
2. è necessario porre attenzione alla scelta della risoluzione in frequenza;
3. influenza del leakage.

### 2.8.2 Buon funzionamento del programma

Analizzando le FFT risulta che gli accelerometri A e C hanno un segnale composto solamente da un'onda a 1Hz con ampiezza 1g, mentre B e D anche da un'altra a 4Hz e 1g.

Essi corrispondono a quanto inserito come dato di partenza e C e D sono stati scalati ai valori corretti.

Anche l'animazione di tutti gli ordini ha dato i risultati sperati: le due piastrine si muovono nello spazio solo lungo z e parallelamente una all'altra. Le parti gestite da B e D, giustamente, hanno anche un movimento aggiuntivo dato dalla sinusoidale a 4Hz. La figura 2.21 riporta un fotogramma preso dall'animazione.

## Capitolo 2 - JUDDER BREMBO

Se si preferisce vedere solo l'effetto del 1° o del 4°, si ha un'altra conferma del buon funzionamento. Nel primo caso le piastrine sono sempre piatte, non c'è più la seconda parte che ha un moto differente per le due sinusoidali. Con solo il 4° ordine si fermano anche le traslazioni e rimane solo la flessione. Alla selezione di qualsiasi altro ordine, le piastrine rimangono ferme.

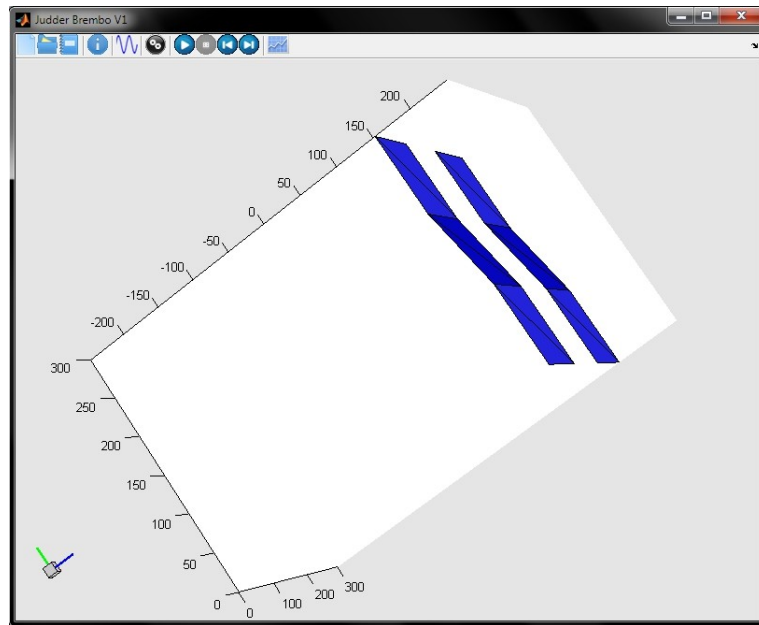


Figura 2.21: Animazione di tutti gli ordini

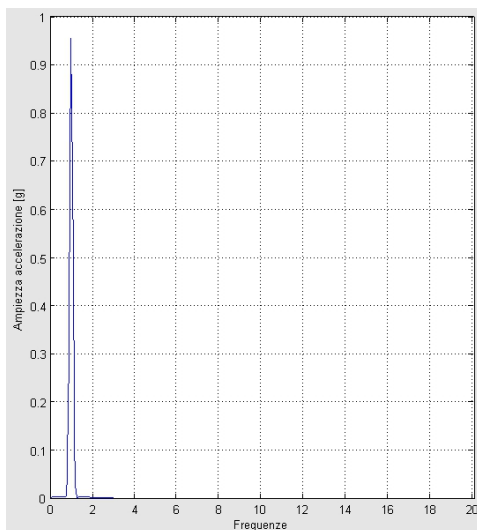


Figura 2.22: FFT con alta risoluzione in frequenza

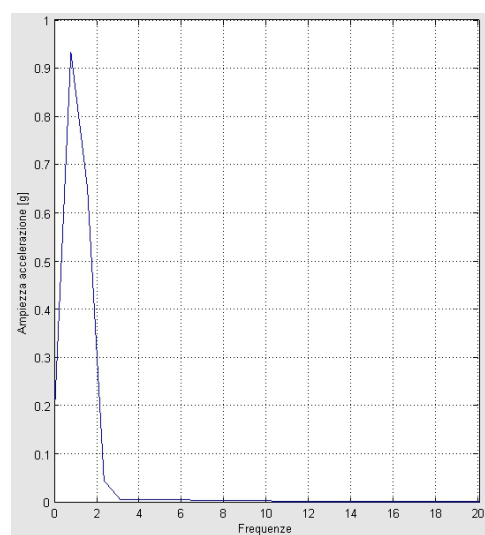


Figura 2.23: FFT con bassa risoluzione in frequenza

### 2.8.3 Risoluzione in frequenza

Questo sotto-paragrafo e il prossimo sono dedicati, più che altro, agli errori che si possono commettere durante l'impostazione delle opzioni di elaborazione dei dati.

La risoluzione in frequenza è molto importante perché crea errori anche molto grossolani. Essa non deve essere casuale, ma deve essere correlata alle frequenze che sono in gioco.

In figura 2.22 è riportata la FFT del segnale di A e C con una risoluzione di 0,1Hz (quella usata per le animazioni): è segnalato, correttamente, un picco a 1Hz e tutto il resto è nullo. In figura 2.23 la risoluzione è passata a 1Hz, provocando una scarsa precisione nella rilevazione. Solo oltre i 3Hz si ha un annullamento dell'ampiezza. Il segnale di B e D, addirittura, vede sollecitazioni fino a 5Hz.

È chiaro che un'analisi agli ordini, in queste condizioni, sarebbe completamente falsata: si otterrebbero valori significativi di accelerazione fino al 5° ordine, anche se in realtà non è così. Le simulazioni del 2° ordine, per esempio, vedono le due piastrine che si muovono parallelamente lungo z, cosa che non accade con un'alta risoluzione in frequenza.

Quest'ultima, quindi, deve essere correlata alla frequenza massima raggiunta e alla differenza tra un ordine l'altro, dipendenti entrambi dalla velocità di rotazione del disco. Nel caso di bassa risoluzione si aveva una coincidenza con la velocità del disco, cosa assolutamente da evitare. Con 0.1Hz, il rapporto si è abbassato di un fattore 10.

Il rovescio della medaglia, però, è la maggiore durata della slice di tempo.

Mentre con 1Hz basta 1s, con 0,1Hz ne sono necessari ben 10: per un fenomeno di judder sarebbero veramente troppi data la sua evoluzione nel tempo.

Come spesso succede, ci si trova davanti a un trade-off in cui si contrappongono precisione e controllo dell'evoluzione del segnale. Considerando che il judder avviene a velocità elevate e che richiede slice piccole nel tempo, è consigliabile utilizzare una risoluzione di 1-2Hz.

### 2.8.4 Influenza del leakage

Il leakage, come sarà noto, è la presenza di frazioni di periodo nel segnale.

Quando viene eseguita la divisione in slice è normale che si formino perché non si è a conoscenza a priori dell'esatto contenuto del segnale.

Metodi come l'applicazione di una finestatura come la Hamming riduce il problema, ma non lo annulla.

Guardando la figura 2.22 si noterà come il picco non arrivi esattamente a 1, come previsto dal segnale elaborato, ma si fermi a un valore inferiore. In quel caso è a 0,96g, a cui corrisponde uno spostamento di 238mm.

Questo piccolo errore (4%) nella stima dell'ampiezza ha ridotto di 10mm lo spostamento del componente.



La frequenza ha un effetto ancora più pesante perché, come indicato nell'equazione 2.7, deve essere elevata al quadrato.

Se si riduce la risoluzione fino a 1Hz, ottenendo la FFT di figura 2.23, il picco va a 0,93g e 0,8Hz: lo spostamento corrispondente sarà di 361mm, ben il 45% in più del valore giusto. A questo c'è da aggiungere una differenza di comportamento per la frequenza differente.

Tutto questo serve a dimostrare che è consigliabile tenere a mente questi concetti durante la scelta dei parametri di simulazione e che potrebbe essere necessario fare prima qualche prova. Un errore che sovrastima del 45% lo spostamento genera un'animazione completamente errata del modello.

## 2.9 Schema riassuntivo dell'elaborazione dati

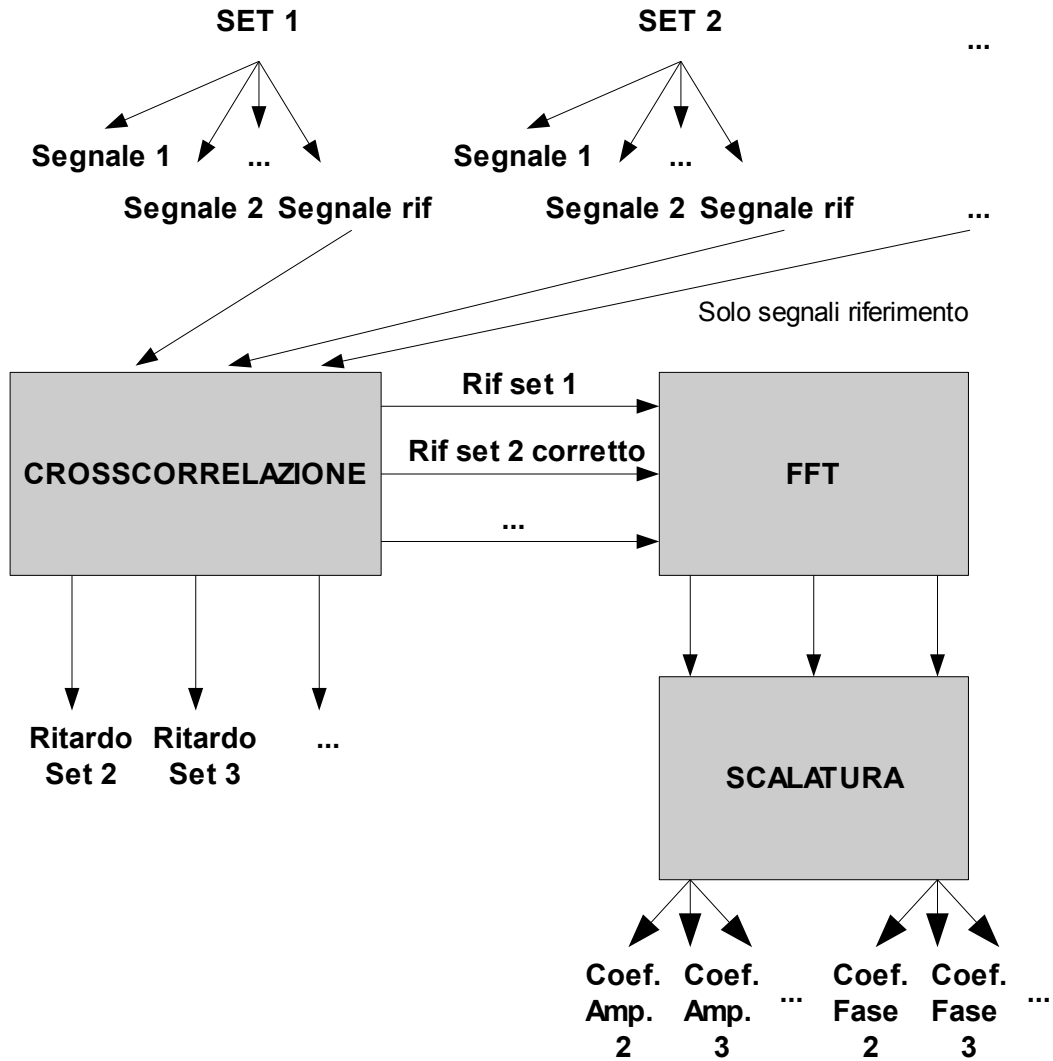


Figura 2.24: Elaborazione dei segnali di riferimento

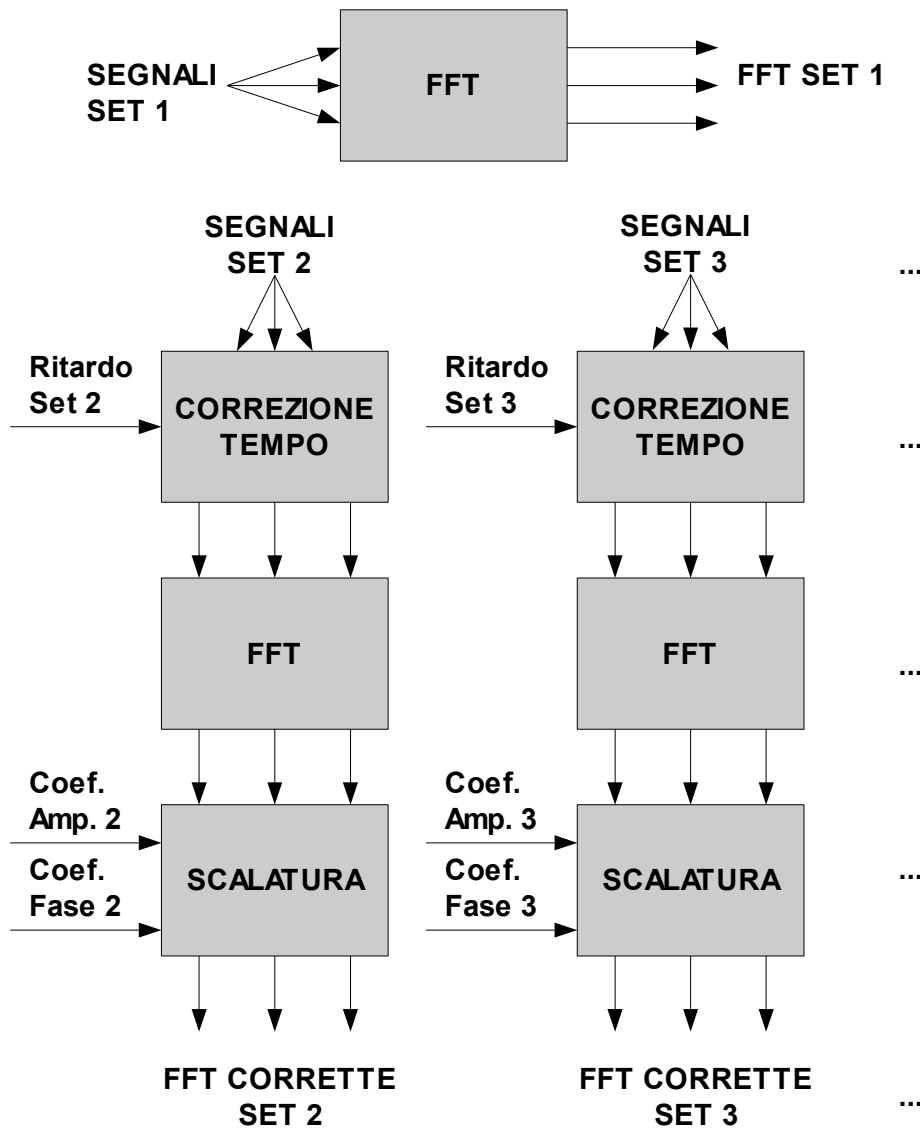


Figura 2.25: Elaborazione degli altri segnali in base a quanto ricavato da quelli di riferimento

Questi due schemi (immagini 2.24 e 2.25), riportano il funzionamento del processo di elaborazione dati. Si parte confrontando i segnali di riferimento e le differenze rilevate si ripercuotono su tutti gli altri.



## 3 TEST AL BANCO

Ora che l'applicazione Judder Brembo è stata scritta e testata, si può passare alla raccolta dati.

Per ricostruire gli spostamenti dei componenti meccanici non si useranno solamente gli accelerometri, ma anche un vibrometro laser. In questo modo si potrà avere un confronto e registrare dati molto difficili da ottenere, come la deformazione del disco.

Sempre per studiare quest'ultimo componente, ci si avvarrà dell'aiuto di una termocamera. Grazie ad essa si otterranno le distribuzioni di temperatura sulla superficie esterna.

Per lo studio della pinza e del fenomeno del judder in generale, ci si avvarrà di tre sensori di pressione: due sulla pinza, uno per lato, e un altro sulla pompa del fluido frenante.

Sempre per lo studio del fenomeno, è stato collocato un torsionmetro sull'albero di trasmissione del banco per rilevare la coppia frenante.

### 3.1 Il banco e l'assieme freno/sospensione

Quando viene rilevato un problema su qualsiasi sistema meccanico, è necessario riuscire a riprodurre la procedura che lo porta ad emergere. Nel caso dell'impianto frenante, bisogna rilevare i dati relativi all'automobile interessata, pressione del fluido frenante, condizioni di utilizzo,... Una volta ottenuto tutto il necessario si può riprodurre il fenomeno o con l'auto o con un banco che la simuli.

Il primo metodo è molto complesso e costoso: è necessario avere un'automobile sempre a disposizione con un operatore che ripete la stessa procedura fino a quando non si trova una soluzione. Se la prova è ad alta velocità, come nel caso del judder, c'è anche la complicazione che il test deve essere in pista o, al massimo, su un banco a rulli. Se il problema riguarda i fischi, invece, si pone il problema delle condizioni atmosferiche perché, come visto nel primo capitolo, la temperatura e l'umidità hanno molta importanza.

Il banco è una scelta decisamente più pratica ed economica. È fondamentale, però, riuscire a riprodurre tutte le condizioni registrate in realtà, altrimenti si otterrebbe una prova falsata.

Esisterebbe anche una terza via, che è il calcolo numerico. Grazie agli elementi finiti, con le opportune condizioni al contorno, è possibile riprodurre il fenomeno, però non sempre è così. Per prima cosa è necessaria una verifica a banco per validare il modello. Poi ci sono casi come il judder in cui, purtroppo, non è ancora possibile effettuare una simulazione realistica. Ci sono molti aspetti che sfuggono e, probabilmente, sono proprio loro alla base del fenomeno.

Il calcolo numerico da risultati molto più soddisfacenti, invece, nel campo dello studio dei fischi. Dato che essi sono causati dalle frequenze di risonanza dei vari componenti del gruppo sospensione/pinza/disco, si può fare un'analisi modale di essi e testare le modifiche senza fare test fisici. Anche in questo caso, però, è necessario un test di convalida finale.

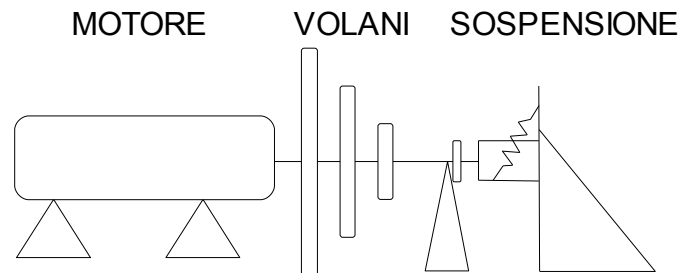


Figura 3.1: Schema costruttivo di un banco prova

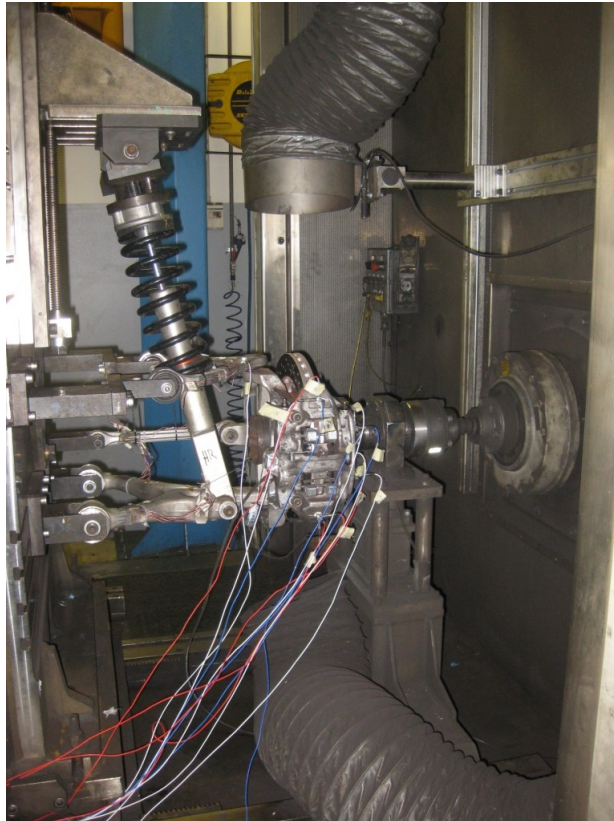
Il banco, presentato in figura 3.1, deve avere una caratteristica principale: riprodurre il più possibile le condizioni in strada. Dato che è tutto il gruppo della sospensione a generare i fischi, nei test essa viene montata per intero. Lo schienale a cui si appoggia riproduce gli attacchi del telaio dell'auto di provenienza e l'ammortizzatore è compresso per simularne il peso. Il mozzo, a differenza della realtà, è messo in rotazione dall'esterno, e non da un semiasse rivolto verso l'interno.

La velocità è controllata da un motore elettrico che mette in rotazione il sistema e simula la forza d'inerzia del veicolo. Durante la frenata, infatti, l'impianto deve riuscire a trasformare tutta l'energia potenziale del veicolo in termica e, come sarà noto, la prima è proporzionale alla massa del mezzo.

Per aiutare il motore in quest'ultimo compito ci sono anche dei volani: ogni banco ne ha 3 di dimensioni differenti che vengono resi solidali o meno all'albero di trasmissione a seconda dell'inerzia voluta. Quando non sono collegati, girano su cuscinetti. In questo modo, il motore elettrico deve riprodurre solo una parte dell'inerzia.

Il fluido frenate è messo in pressione da un pompa uguale a quella montata in vettura: essa è collegata ad un motore elettrico che muove lo stelo attuatore. Altro parametro molto importante che viene considerato è il clima: alcuni banchi sono collegati ad un impianto di climatizzazione per effettuare test a varie temperature e livelli di umidità. Per le prove judder non serve, ma per i fischi sì, data l'influenza delle condizioni atmosferiche sul coefficiente d'attrito.

In figura 3.2 è visibile la sospensione e la sua installazione sul banco. Essa proviene dal retrotreno di un'auto sportiva a trazione posteriore: è a quadrilateri con un braccetto laterale. È sinistra, quindi la pinza è collocata davanti al semiasse.



*Figura 3.2: Installazione della sospensione e del freno al banco*

Il freno utilizzato ha un disco flottante autoventilato da 360 mm, forato e baffato. Quest'ultime due lavorazioni sono effettuate per aiutare il raffreddamento, la liberazione di gas durante la frenata e per ravvivare le pastiglie, cioè eliminare un possibile strato superficiale d'ossidi o vetrificato che potrebbe diminuire le prestazioni. Dato che si tratta di un'auto sportiva, è importante che il freno sia sempre al massimo dell'efficienza.

Essendo un disco flottante, la parte esterna (fascia) possono avere un movimento relativo rispetto all'attacco sul mozzo (campana). La prima è in ghisa, mentre la seconda in alluminio. Come spiegato in precedenza nel capitolo 1, tutto ciò consente di ridurre il peso del freno e, di conseguenza, le masse non sospese. La pinza, invece, è di tipo fisso e con 4 pistoni, 2 da 36mm e 2 da 34mm. Quelli più grandi sono collocati nel lato ingresso disco.

All'interno del banco è presente anche un sistema di ventilazione per soffiare aria sul sistema e aspirare la polvere di materiale d'attrito generata durante la frenata.

Per gestire il test si farà riferimento alla temperatura della pastiglia, grazie alla termocoppia inserita in essa.

## **3.2 Il sistema di acquisizione dati**

In questa sezione saranno elencati, spiegandone brevemente il funzionamento, i sistemi impiegati per acquisire i dati.

### **3.2.1 Accelerometri**

Come suggerisce il nome, essi sono utilizzati per registrare le accelerazioni del punto su cui sono poggiati (figura 3.3). Nel paragrafo 2.1 si è già parlato di loro e di come vengono collegati alla struttura da analizzare: sono avvitati a gruppi di tre su una basetta che poi viene incollata.

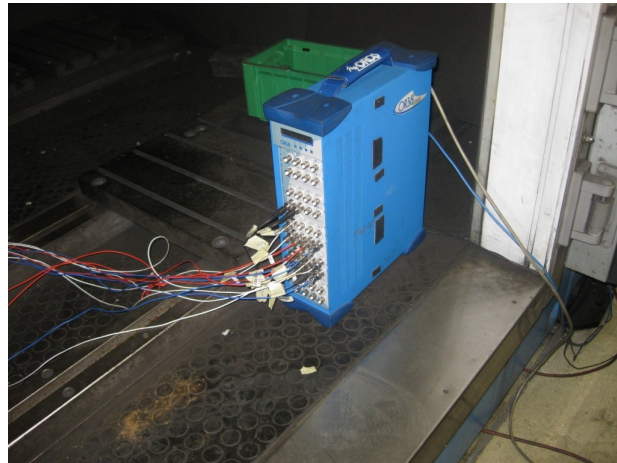
Per l'alimentazione e registrare i loro segnali, si utilizza un acquisitore multicanale (figura 3.4): in questo caso sono stati utilizzati 15 canali.

Gli accelerometri impiegati sono di tipo piezoelettrico, cioè basati sulle proprietà dei cristalli di quarzo o della ceramica. Essi sono in grado di generare una differenza di potenziale elettrico se sottoposti a una forza.

Se sottoponessimo a sforzo un foglio di quarzo, andremmo a modificare l'equilibrio degli ioni positivi e negativi, i quali andranno a posizionarsi ai lati di esso. L'effetto è proporzionale con la forza, quindi la differenza di potenziale aumenterà insieme allo sforzo.



*Figura 3.3:  
Accelerometro*



*Figura 3.4: Acquisitore*



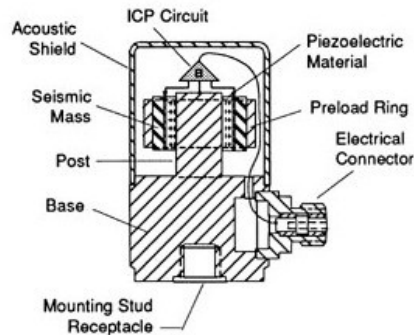


Figura 3.5: Funzionamento di un accelerometro a taglio

Per caricare il quarzo si sfruttano vari metodi basati sulla presenza di una massa inerziale. In figura 3.5 è presentata la struttura di un accelerometro con funzionamento a taglio (*shear accelerometer*): il materiale piezoelettrico fa da tramite tra la massa inerziale e il supporto. Con l'accelerazione, il peso genera una forza che si scarica sul quarzo facendolo caricare elettricamente. Basta collegare due connettori ai lati di esso per poter rilevare la tensione, e quindi l'accelerazione, con un acquisitore.

Le caratteristiche tecniche degli accelerometri usati sono le seguenti [4]:

- Sensitività:  $\sim 10\text{mV/g}$  (è un valore medio, in realtà ognuno ha la propria e rilevata in sede di calibrazione);
- Range di misurazione:  $\pm 500\text{g}$ ;
- Range frequenze:  $1\text{Hz}-10\text{kHz}$ ;
- Risoluzione:  $0,005\text{g}$ ;
- Range temperature:  $-54/+121^\circ\text{C}$ .

I range di misurazione e frequenze sono adatti perché non ci si aspettano più di  $10\text{g}$  in accelerazione e l'acquisitore lavorerà a  $2\text{kHz}$ . La temperatura massima impone attenzione nell'installazione, perché le pastiglie saliranno oltre i  $300^\circ\text{C}$ . Il software dell'acquisitore, come già spiegato nel capitolo 2, registrerà i segnali nel tempo e, per renderli elaborabili da Judder Brembo, saranno esportati in file .mat.

### 3.2.2 Vibrometro laser

A differenza degli accelerometri, il vibrometro (figura 3.6) non va montato sul pezzo da esaminare, ma riesce a compiere una misura a distanza.



Figura 3.6: Vibrometro

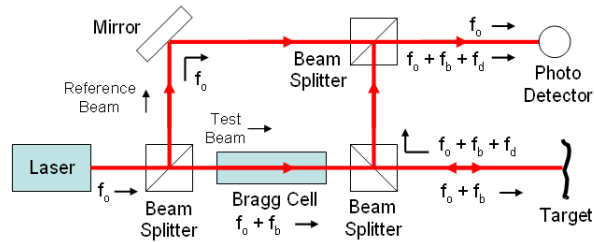


Figura 3.7: Funzionamento di un vibrometro

Esso funziona grazie un raggio laser che colpisce l'oggetto e viene riflesso. La figura 3.7 riporta il funzionamento dello strumento:

- Il generatore laser emette un fascio che viene subito diviso in due parti dal primo specchio: la prima è diretta verso l'oggetto e la seconda servirà da riferimento.
- Il primo fascio colpisce l'oggetto e viene riflesso tornando verso la macchina.
- Un secondo specchio separa il fascio in uscita da quello riflesso, dirigendo quest'ultimo verso il sensore di rilevazione.
- Il fascio riflesso viene confrontato con quello di riferimento per valutare le differenze di riflessione portate dallo spostamento del pezzo da misurare.

Con questo strumento è importante che il componente riesca a riflettere il laser. Di conseguenza quest'ultimo non può avere un'inclinazione maggiore di  $20^\circ$  rispetto alla perpendicolare della superficie e, se l'opacità fosse troppo alta, sarà necessario verniciare il pezzo.

Nei test effettuati non è stata necessaria la verniciatura, però ci si è aiutati con uno specchio per mantenere il raggio il più perpendicolare possibile.

Grazie a questo strumento è stato possibile misurare le vibrazioni di parti inaccessibili dagli accelerometri ed è stato fatto un confronto con l'applicazione Judder Brembo. Con esso sono stati misurati:

- disco, sia radialmente sia assialmente;

- pinza, sia radialmente sia assialmente;
- pastiglie, solo assialmente.

### **3.2.3 Termocamera a raggi infrarossi**

Le termocamere sono sensibili alla temperatura dell'oggetto che stanno inquadrando.

Secondo la teoria delle onde elettromagnetiche, quest'ultime avrebbero uno spettro molto ampio e, a seconda della lunghezza d'onda, sarebbero divise in gruppi. La luce visibile è uno di questi e va da 400 a 700nm (400-790THz).

Un qualunque corpo sopra lo zero assoluto, emette una radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda appartenente al campo dell'infrarosso. Questo gruppo ha una lunghezza d'onda appena superiore alla luce: da 700nm a 1mm (400THz-300GHz).

Più la temperatura è alta e più lo sarà anche la frequenza. Oltre un certo limite, l'emissione arriverà nel campo della luce visibile, rendendo il materiale incandescente.

Una termocamera sfrutta proprio questo principio: il sensore ottico è sensibile all'infrarosso e rileva il calore emesso da ogni punto. Per visualizzare il risultato si può utilizzare una visione a falsi colori, cioè si associa una scala colorata al range di temperatura.

Il sensore può essere raffreddato o meno e il primo ha maggiore precisione nella rilevazione. Il raffreddamento è affidato a una cella di Peltier: una piastrina di materiale drogato a base di silicio, utilizzato per i transistor, è sottoposta al passaggio di corrente elettrica. A seconda del verso di quest'ultima, una faccia si raffredda e l'altra si scalda.

Sono delle pompe di calore in miniatura e, anche loro, consumano energia per far fluire calore dalla sorgente fredda a quella calda, come previsto dal Secondo Principio della Termodinamica.

A seconda della temperatura da rilevare, esistono in commercio vari sensori: quello usato in questi test è sensibile all'infrarosso lontano, cioè adatto alle temperature ambientali (-40 – 500°C). La termocamera qui utilizzata, per esempio, poteva montare anche il sensore per l'infrarosso a onda corta (vicino), adatto per monitorare forni o combustioni di vario genere (200 – 2000°C) [5].



Figura 3.8: Installazione termocamera

In figura 3.8 è riportata l'installazione al banco: basta semplicemente puntare la camera verso il componente da misurare e inserire nel software la temperatura ambiente e l'emissività. Quest'ultimo parametro indica la tendenza del materiale ad assorbire la radiazione incidente. Se fosse un corpo nero, puramente ideale, l'assorbirebbe tutta e si otterrebbe un'emissività  $\epsilon=1$ . Dato che il metallo non è ideale,  $\epsilon$  sarà inferiore. Un valore troppo elevato rileva tutte le riflessioni, mentre uno basso sottostima la temperatura.

I video generati avranno dimensioni pari a 320x240 e il campionamento sarà a 30Hz (30 frames per secondo).

### 3.2.4 Sensori di pressione e torsionometro

Attraverso questi due strumenti è possibile studiare gli effetti del judder sulla pressione del fluido frenante e sulla coppia resistente.

Sono descritti in un unico paragrafo perché hanno principi di funzionamento molto simili: entrambi si basano sugli estensimetri.

Ogni materiale conduttore possiede una proprietà, chiamata piezoresistività, che prevede una variazione della resistenza al passaggio di corrente a seconda della deformazione meccanica subita (Doebelin [6]).

$$dR = \frac{A(\rho dL + L d\rho) - \rho L dA}{A^2} \quad (3.1)$$

L'espressione 3.1 riporta la variazione di resistenza di un corpo di sezione  $A$ , lunghezza  $l$  e resistività  $\rho$ . Dopo alcuni passaggi matematici, in cui si considera come variano i 3 parametri durante la deformazione con volume costante, si giunge al cosiddetto Gage Factor (espressione 3.2).

$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \quad (3.2)$$

Dalla variazione di resistenza si risale a quella di lunghezza. Ma, di solito, non si ricorre a un solo estensimetro, ma ad un gruppo di essi connessi secondo schemi ben precisi. Uno di questi è il *ponte di Wheatstone* (figura 3.9).

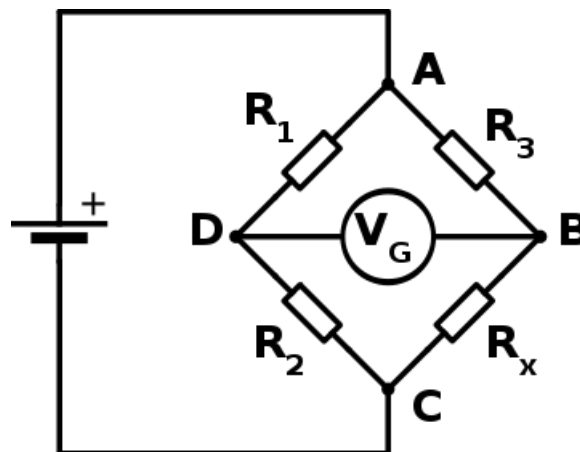


Figura 3.9: Schema elettrico del ponte di Wheatstone

Le quattro resistenze (estensimetri) sono incollate sulla superficie di cui si vuole misurare la deformazione secondo questo schema. Se il sistema è equilibrato, cioè la resistenza sui due circuiti in parallelo è la medesima, il voltmetro  $V_g$  leggerà una tensione nulla ai suoi capi. Se un estensimetro viene deformato,  $V_g$  leggerà un valore proporzionale all'entità del fenomeno.

Un altro tipo di circuito è la *rosetta*: non è altro che un talloncino contenente tre estensimetri con differenti angolazioni (figura 3.10). Sono utilizzate quando non si è a conoscenza a priori della direzione dello sforzo da misurare.

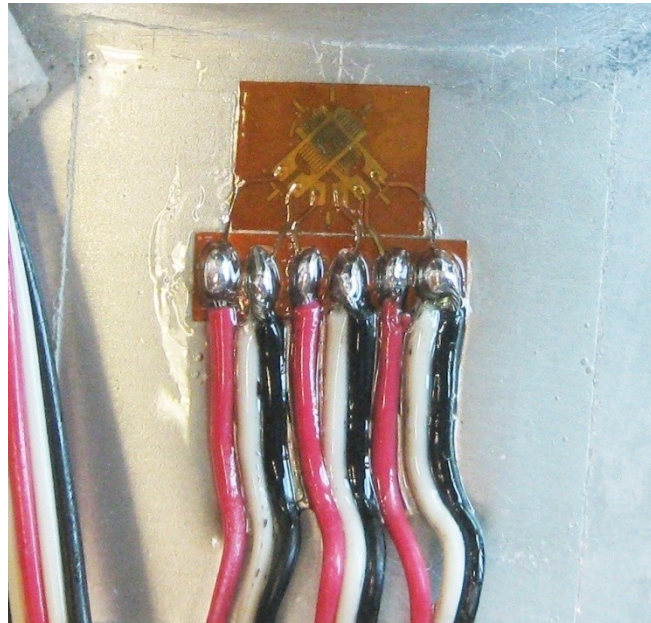


Figura 3.10: Rosetta di estensimetri

Ora che si è in grado di associare una variazione di tensione a una deformazione, si può passare da quest'ultima alla forza che l'ha generata. Dato che l'estensimetro è fissato al pezzo da testare, l'allungamento di entrambi sarà il medesimo. Da esso, se si è a conoscenza del materiale in questione, è possibile risalire allo sforzo che sta subendo.

Sia il trasduttore di pressione sia la cella di carico sfruttano questo principio: al loro interno hanno estensimetri fissati a un materiale conosciuto che viene sollecitato dal fluido frenante o dall'albero di trasmissione.

I trasduttori, al loro interno, presentano una membrana a contatto con il fluido frenante che flette in presenza di pressione. Nel lato interno sono collocati gli estensimetri che rilevano questa deformazione e tutto il resto dell'elettronica. Come riportato sul Doebelin [6], di solito, in questi strumenti, si utilizza un ponte di Wheatstone: due sensori sono collocati al centro della membrana, dove si concentrano gli sforzi tangenziali, e gli altri vicino al bordo per rilevare i radiali.

Per queste rilevazioni sono stati usati tre sensori LB652 della DSEurope con le seguenti caratteristiche:

- Valore massimo misurabile: 10bar;
- Risoluzione: 0,05bar (0,5% del massimo);
- Campionamento: 1kHz, impostato dall'acquisitore.

Il torsionometro sfrutta gli estensimetri in maniera differente: essi rilevano la torsione di un albero interno di materiale conosciuto (Doebelin [6]). Chiaramente, più la coppia applicata è alta e più esso si deformerà.

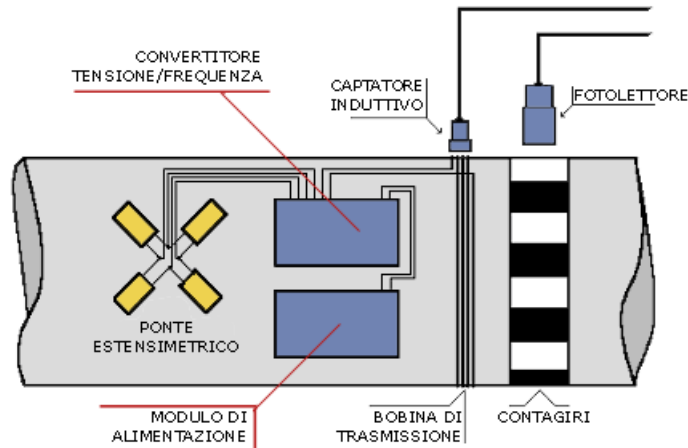


Figura 3.11: Schema costruttivo di un torsionometro

In figura 3.11 è riportato uno schema del funzionamento di questo strumento: non è altro che una cella di carico sensibile alla coppia con l'aggiunta di un contagiri. In questo modo riesce a misurare la potenza (coppia\*velocità). Data l'assenza di contatti striscianti e la necessità di alimentare e raccogliere dati del sistema di acquisizione, tra il rotore e lo statore c'è un captatore induttivo che crea un campo magnetico atto a svolgere questi due compiti.

Il punto di rilevazione è tra il freno e i volani.

Le caratteristiche tecniche del torsionometro utilizzato, chiamato T10F e prodotto dalla HBM, sono le seguenti [8]:

- Massimo valore misurabile: 5kNm;
- Risoluzione: 10Nm (0,2% del valore massimo);
- Massima frequenza di campionamento: 200Hz.

### 3.3 La procedura

Una volta decisa e descritta la strumentazione, si passa alla scelta della procedura più adatta ad evidenziare il segnale.

Il judder, per definizione, è un fenomeno che avviene ad alta velocità e ad impianto caldo. Per farlo manifestare è stato studiato il ciclo *Motorway* presentato nella seguente tabella (3.1).

Tabella 3.1: Procedura Motorway

Passo	Velocità iniziale [km/h]	Velocità finale [km/h]	Pressione [bar]
1	Preriscaldamento fino a 250°C con frenate di 30s a 10bar e 80km/h		
2	200	60	2,5
	Pausa di 20s a 200km/h		
3	200	60	2,5
	Pausa di 20s a 200km/h		
4	200	60	2,5
	Pausa di 20s a 200km/h		
5	200	60	2,5
	Raffreddamento fino a 250°C a 5km/h		
2	200	60	5
	Pausa di 20s a 200km/h		
3	200	60	5
	Pausa di 20s a 200km/h		
4	200	60	5
	Pausa di 20s a 200km/h		
5	200	60	5

Il ciclo originale, in realtà, prevedeva una temperatura di partenza di 200°C e 40s di pausa tra una frenata e l'altra, ma si è rivelato inadatto per due motivi:

- la pausa era troppo lunga e il freno si raffreddava troppo;
- un altro impianto ha evidenziato la comparsa del fenomeno solo sopra i 230°C, quindi era necessaria qualche frenata per farlo manifestare.

La procedura di preriscaldamento prevede il raggiungimento di una temperatura leggermente superiore al limite e una successiva pausa per farla stabilizzare (tende a salire ancora un po'). In questo periodo il disco viene rallentato fino a 20km/h per poter fare il video con la termocamera. Se la velocità fosse più alta, non sarebbe possibile riconoscere delle zone più calde di altre per il basso campionamento dello strumento utilizzato (30Hz).

Anche alla fine delle 4 frenate a 2,5bar c'è un periodo di pausa a bassa velocità, solo che qui scenderà fino a 5km/h.

Per le rilevazioni con il vibrometro laser non si sfrutta più un processo automatico, ma si passa in controllo manuale. Dato che il judder ha una certa



evoluzione nel tempo (parte basso, poi diventa più intenso e, infine, ritorna più debole), conviene effettuare la rilevazione nel punto più intenso.

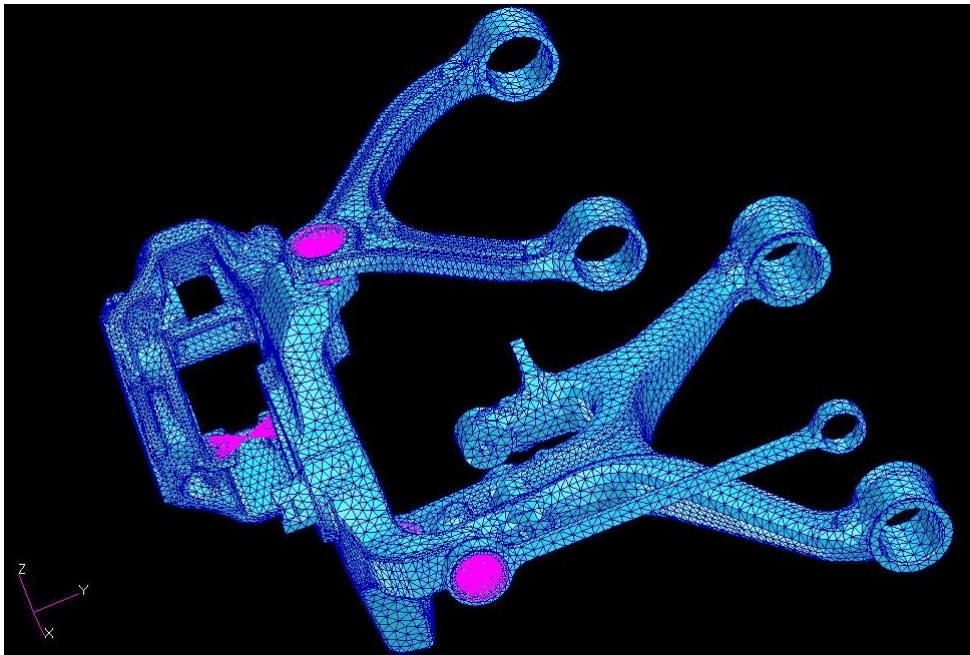
Durante le prove con gli accelerometri si è rilevato che il picco si raggiunge a 1150giri/minuto. La procedura con il vibrometro, quindi, prevederà il mantenimento di questa velocità con il fluido frenante a 2,5bar.

Le frenate a 5bar non sono considerate con il vibrometro, perché raggiungono picchi molto più bassi.

### **3.4 Raccolta dati per Judder Brembo**

Come è stato ampiamente spiegato nel capitolo 2, l'applicazione creata per questo elaborato avrà bisogno di:

- posizione dei punti costituenti la mesh di ogni componente;
- posizione degli accelerometri e loro direzioni/versi;
- riferimenti ai file dei segnali.



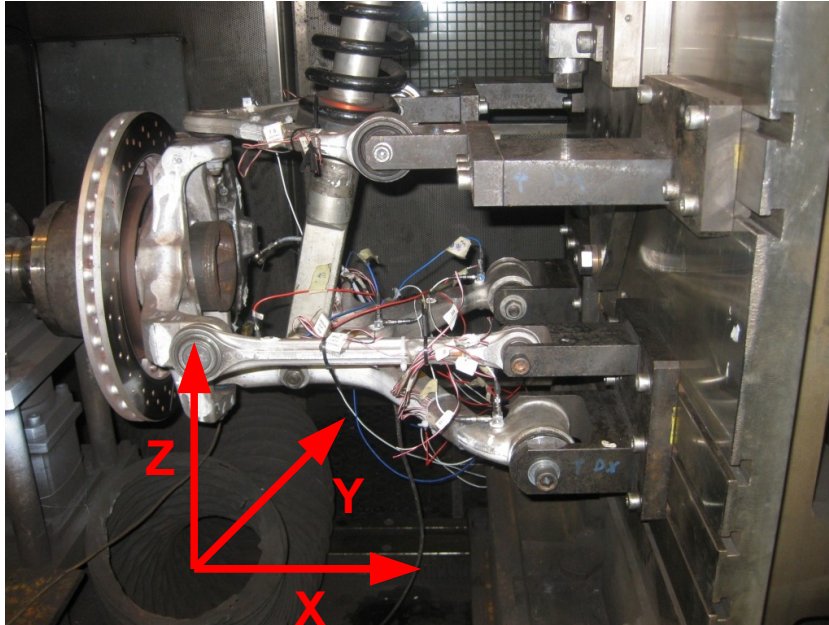
*Figura 3.12: Modello in Patran*

#### **3.4.1 Posizione punti e accelerometri**

Un assieme è costituito da un gruppo di componenti, ognuno con dei punti di cui è necessario specificarne la posizione. Dato che il campo è tridimensionale, ci saranno tre valori (x, y e z) per ognuno di essi.

Questi dati possono essere ricavati da un modello 3D di un software di disegno o calcolo FEM: in questo caso è stato usato Patran (figura 3.12).

Prima di procedere è necessario stabilire un sistema di riferimento e usare sempre quello, altrimenti non ci sarà corrispondenza tra la mesh e le posizioni degli accelerometri.



*Figura 3.13: Sistema di riferimento al banco*

In figura 3.13 è riportato quello utilizzato al banco: le x e le y sono invertite rispetto al modello Patran (in fondo a sinistra di figura 3.13). Dato che le direzioni sono le stesse, per ovviare al problema è sufficiente invertire i due dati provenienti dal FEM e cambiare segno alle x.

L'assieme sospensione è stato diviso in 5 componenti: triangolo superiore, triangolo inferiore, braccio laterale, fusello e pinza. Di ognuno sarà riportato, qui di seguito, la mesh e la posizione dei gruppi di accelerometri.

Il triangolo superiore (figura 3.14) è costituito da 22 elementi e ha 5 punti in cui collocare gli accelerometri (indicati dalle lettere).

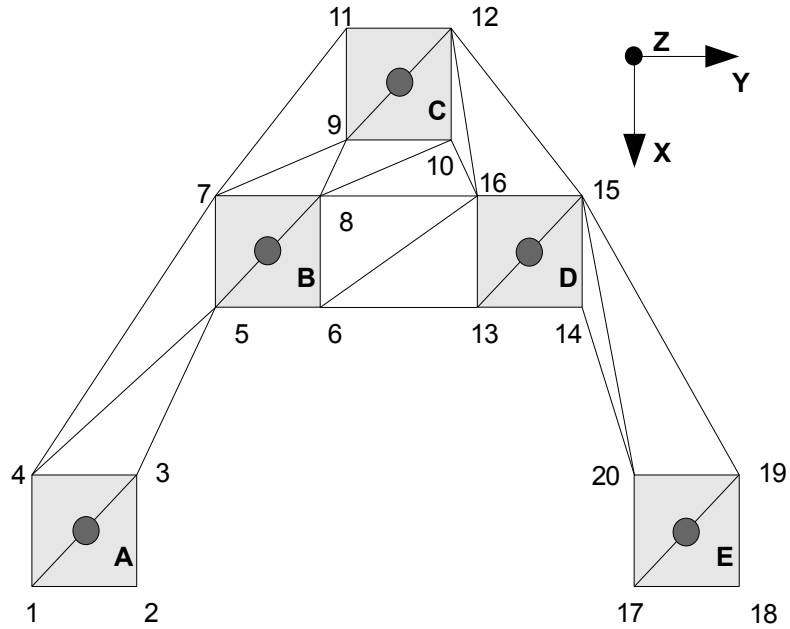


Figura 3.14: Triangolo superiore

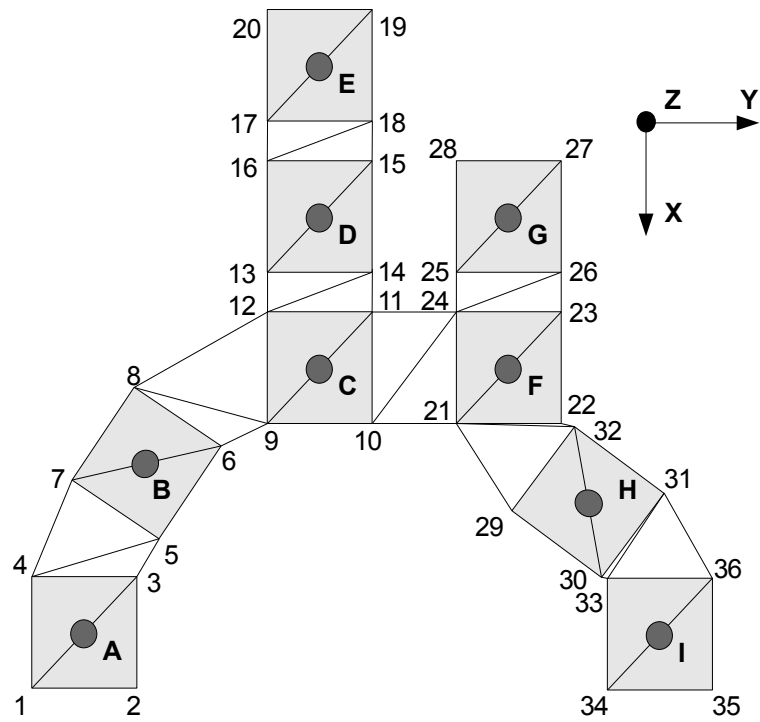


Figura 3.15: Triangolo inferiore

Il triangolo inferiore (3.15) ha questa struttura: 34 elementi e 9 punti per gli accelerometri.

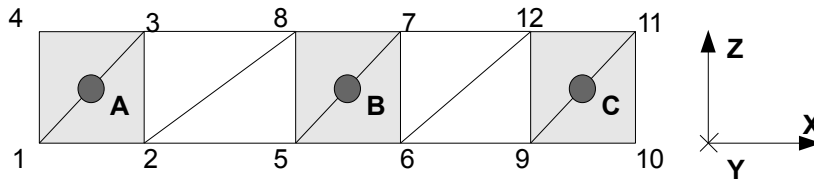


Figura 3.16: Braccio laterale

In figura 3.16 è riportato il braccio laterale con 10 elementi e 3 zone per gli accelerometri.

Il fusello (3.17) è l'elemento più complesso: ha ben 48 elementi e 11 sedi per

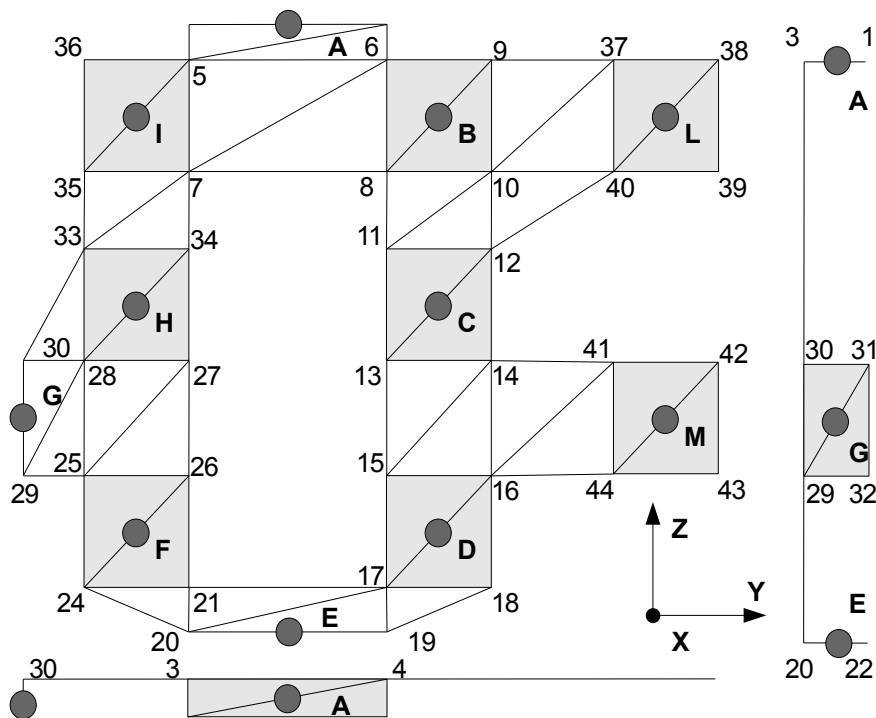


Figura 3.17: Fusello

accelerometri.

La pinza (figura 3.18) appare in vista aperta, quindi i 6 punti laterali sono paralleli all'asse Y. In tutto essi sono 9 e ci sono 38 elementi.

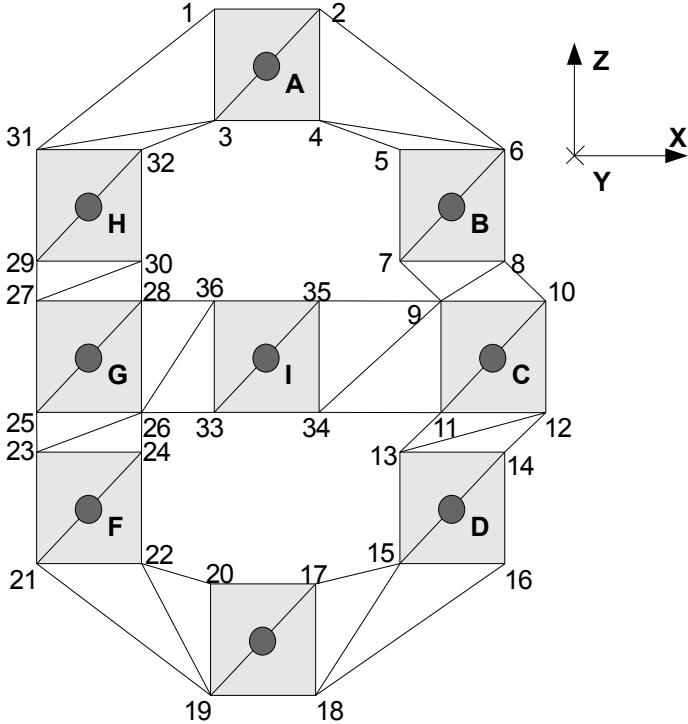


Figura 3.18: Pinza

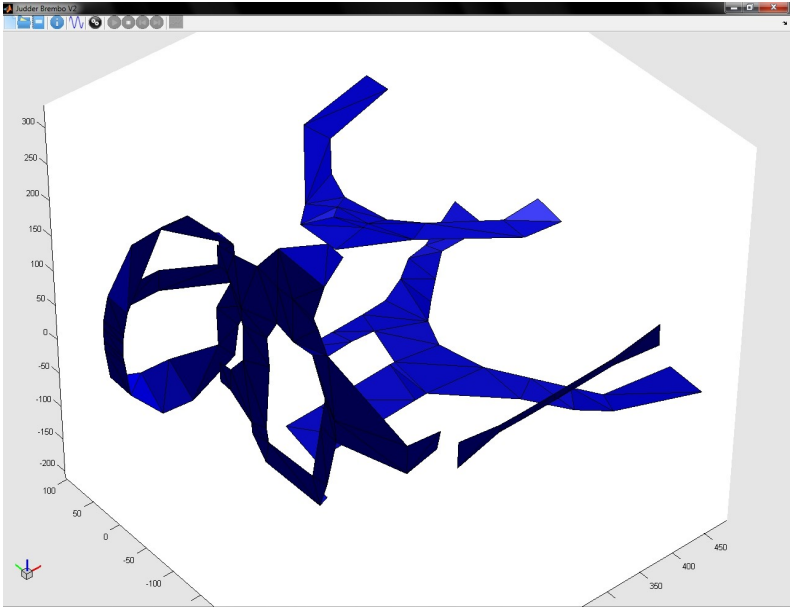


Figura 3.19: Modello in Judder Brembo

Il risultato finale è presentato in figura 3.19.

### **3.4.2 Esecuzione prove**

Per raccogliere dati, sono stati messi a disposizione 13 accelerometri. Visto che su ogni punto ne vanno messi 3, si possono fare 4 gruppi e 1 singolo per il riferimento.

Ad esclusione del braccio laterale, tutti gli altri componenti hanno più di 4 punti da misurare, quindi saranno interessati da più di un set di rilevazioni.

L'accelerometro di riferimento va collocato in una certa posizione e non va mai spostato. Dato che nel segnale ci sarà sempre un po' di rumore, è meglio collocarlo in una zona molto esposta alle vibrazioni, in modo da non renderlo confrontabile con il segnale vero e proprio.

Da prove precedenti risulta che il fenomeno è molto sentito sul triangolo superiore lungo l'asse y: il punto prescelto è, quindi, D.

Nelle prove sono stati registrati 11 set di dati con 8 frenate ciascuno.

## **3.5 Raccolta dati termocamera**

Per utilizzare la videocamera a raggi infrarossi non è necessaria una procedura particolare, come per il vibrometro, ma è sufficiente farla registrare durante la prova.

Lo strumento consente due range di temperatura:

1. -40 – 200°C: più precisa ma adatta solo a temperature vicine a quelle ambientali (utile nell'industria alimentare);
2. 0 – 500°C: la precisione scende un po', però il campo d'utilizzo è pressoché raddoppiato.

In questo caso è necessario impostare il secondo range perché, di sicuro, si supereranno i 300°C. Quando la temperatura supera il range ammesso, il colore si satura e non è più possibile distinguere le zone più calde da quelle più fredde. Altro parametro da impostare è l'emissività: è stato scelto il valore 0,7.

La camera è stata posizionata come riportato in figura 3.8, in modo da inquadrare la superficie del disco.

Le rilevazioni sono state effettuate dopo i preriscaldi e dopo le frenate a 2,5bar.

La situazione è stata monitorata anche dopo quelle a 5bar, ma i risultati coincidono con i preriscaldi.

## **3.6 Raccolta dati vibrometro**

Per la vibrometria è necessaria una prova ad hoc, come spiegato nella sezione 3.3.

I componenti interessati sono stati: pinza, pastiglie, disco e fusello.

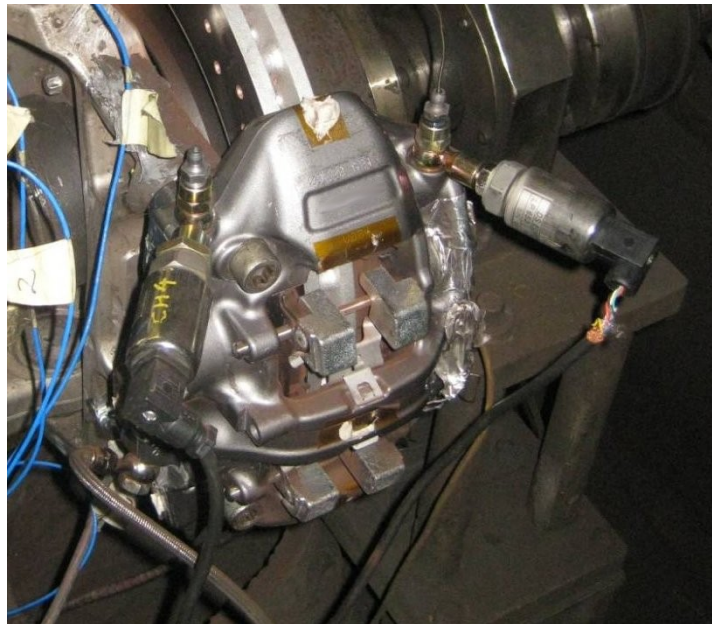
- *Pinza*: rilevazione degli spostamenti assiali del lato senza orecchie (cioè quello rivolto verso la ruota) e di quelli radiali di tutta la parte frontale.
- *Pastiglie*: spostamenti assiali con riferimento al lato senza orecchie.
- *Disco*: spostamenti assiali della cartella rivolta verso la ruota e radiali della parte frontale.
- *Fusello*: solo spostamento radiale con parte del triangolo superiore.

Da questi dati sono state ricavate le FFT e le animazioni dei principali modi di vibrare.

### **3.7 Raccolta dati pressioni e coppie**

I trasduttori di pressione, come già detto in precedenza, sono stati collocati immediatamente a valle della pompa del fluido e ai lati della pinza.

Quest'ultima, infatti, presenta due condotti di spurgo dell'aria sulla parte superiore che si prestano molto bene per questo ruolo (figura 3.20).



*Figura 3.20: Pinza con i due trasduttori di pressione installati ai lati*

In questo modo saranno rilevate le variazioni di pressione ai due lati della pinza e nel resto dell'impianto, cioè quelle che causano le pulsazioni sul pedale del freno.

La cella di carico, invece, è sull'albero di trasmissione e rileverà la coppia frenante esercitata dall'impianto.

Come per la termocamera, non è necessaria una procedura particolare: durante il test saranno registrati i dati dalla strumentazione.



## 4 RISULTATI DELLE PROVE

Nel primo capitolo dei due destinati allo studio dei risultati ottenuti, ci si vuole concentrare sui dati provenienti dal banco e dall'accelerometro di riferimento. In questo modo si potrà scegliere le frenate più gravose e procedere ad un loro studio più approfondito successivamente.

### 4.1 Accelerometro di riferimento

Dato che il judder è un fenomeno vibratorio, i dati degli accelerometri sono la principale discriminante tra una frenata critica e una normale. L'accelerometro di riferimento è stato posizionato in una posizione molto sensibile e quindi il suo segnale può essere usato a tal scopo.

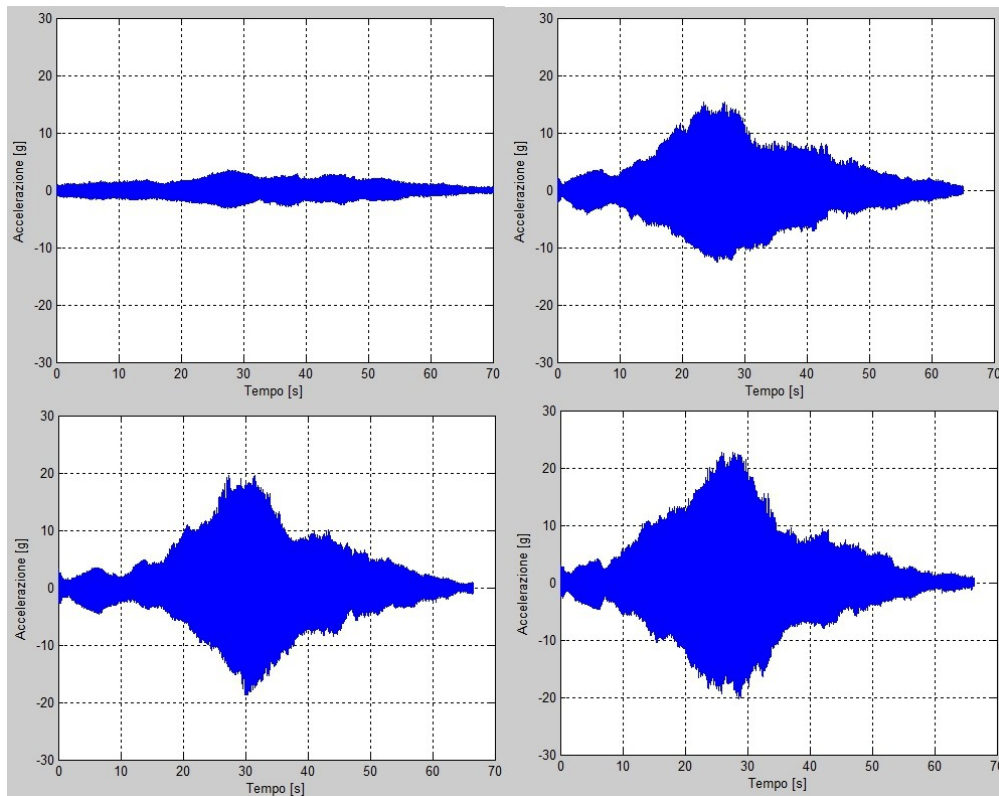


Figura 4.1: Segnali dell'accelerometro di riferimento per le frenate a 2,5bar

In figura 4.1 si riportano le prime 4 frenate caratterizzate da un valore di attuazione della pressione alla pompa di 2,5bar. Nella prima sono stati raggiunti i 4g mentre, nella 4°, sono stati superati i 20g.

## Capitolo 4 - RISULTATI DELLE PROVE

Altro segno dell'evoluzione del fenomeno è la sua durata. Ipotizzando un valore limite qualsiasi, è evidente che il segnale rimanga sopra di esso per sempre più tempo con il susseguirsi delle frenate.

L'ultimo fatto da segnalare è la presenza del picco centrale compreso tra i 25 e i 30 secondi: ciò non sembra legato alla durata del fenomeno, ma alla velocità raggiunta. Se dipendesse solo da quanto tempo è passato dall'inizio della frenata, probabilmente, l'andamento sarebbe sempre crescente o quasi. Ciò può essere indizio di una qualche risonanza del sistema che viene eccitata al raggiungimento della sua frequenza propria.

Tutto questo è avvertibile anche a orecchio: anche se soggettivo e grossolano, è comunque uno strumento di misura.

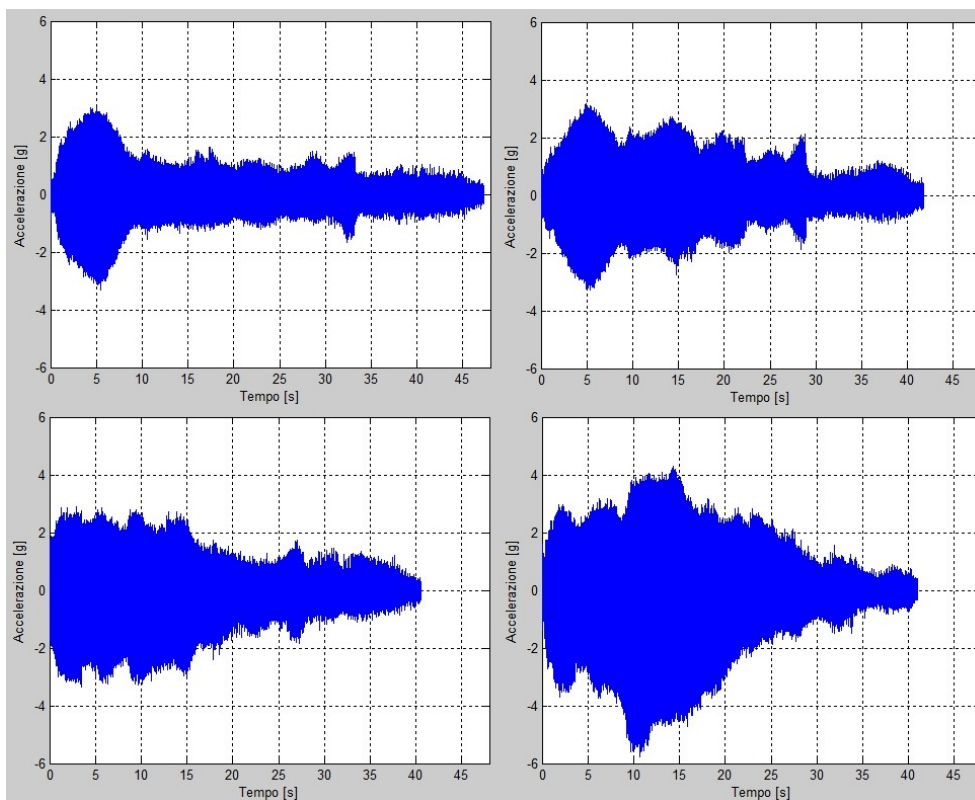


Figura 4.2: Segnali dell'accelerometro di riferimento per le frenate a 5bar

A 5 bar il problema sembra attenuarsi (figura 4.2): c'è sempre un andamento crescente di poco sopra i 4g.

In questo caso non c'è un periodo centrale più intenso fisso a un certo numero di secondi, ma la situazione è molto variabile. Mentre le prime due frenate (quelle in alto) sembrano arrivare al massimo a 5 secondi, la terza ha un'ampiezza fissa da 0 a 15 secondi e l'ultima un picco a 10 secondi.

Tutto questo è previsto dalla teoria esposta nel capitolo 1: il judder è un fenomeno legato alla bassa pressione di frenata. Evidentemente 5bar bastano a vincere e a guidare la deformazione del disco (radice del problema o *root cause*).

In realtà la procedura originale (motorway judder) prevedeva ben 16 frenate: ulteriori 8 a 7,5 e 10bar. La cancellazione di quest'ultime è data dalla scomparsa del fenomeno.

Grazie a test effettuati su altri impianti frenanti che non sono stati riportati in questo elaborato, si è capito, però, che questa non è una regola generale. In alcuni casi, più gravi di questo, la vibrazione a 2,5 e a 5 bar è completamente confrontabile, quindi è necessario salire ulteriormente di pressione per vedere un miglioramento.

## **4.2 Temperature in pastiglia**

L'impianto frenante è equipaggiato con una termocoppia inserita nella pastiglia lato sospensione. Grazie ad essa è possibile monitorare la temperatura durante tutta la durata del test (frequenza d'acquisizione 10Hz).

Essa fa anche da trigger per la gestione della prova perché stabilisce quando finisce il preriscaldamento.

Non sono state utilizzate 2 termocoppie, una per ogni lato, perché non forniscono un valore aggiunto all'elaborazione dei dati.

*Tabella 4.1: Temperature all'inizio e alla fine delle frenate*

<b>Frenata</b>	<b>Temperatura iniziale [°C]</b>	<b>Temperatura finale [°C]</b>
<b>2,5 bar</b>		
<b>1</b>	250	266
<b>2</b>	256	276
<b>3</b>	256	283
<b>4</b>	256	283
<b>5 bar</b>		
<b>5</b>	239	268
<b>6</b>	251	286
<b>7</b>	273	305
<b>8</b>	284	318

In tabella 4.1 sono riportate le temperature all'inizio e alla fine delle frenate e, in

figura 4.3 il grafico relativo.

Con questi dati si può aggiungere un altro tassello alla caratterizzazione del fenomeno: l'influenza della temperatura. Essa è il secondo fattore scatenante previsto dalla letteratura.

Il risultato è un andamento oscillante per la presenza di frenate e di intervalli di raffreddamento, ma anche uno complessivo dipendente dalla pressione di frenata. Quelle a 2,5bar raggiungono un range pressoché stabile, mentre a 5bar si è in continua crescita.

Ciò è imputabile a una maggiore potenza termica liberata: l'energia totale sarà la stessa, ma il tempo è inferiore. Se da una parte viene liberato più calore, dall'altra la dispersione rimane direttamente proporzionale alla temperatura.

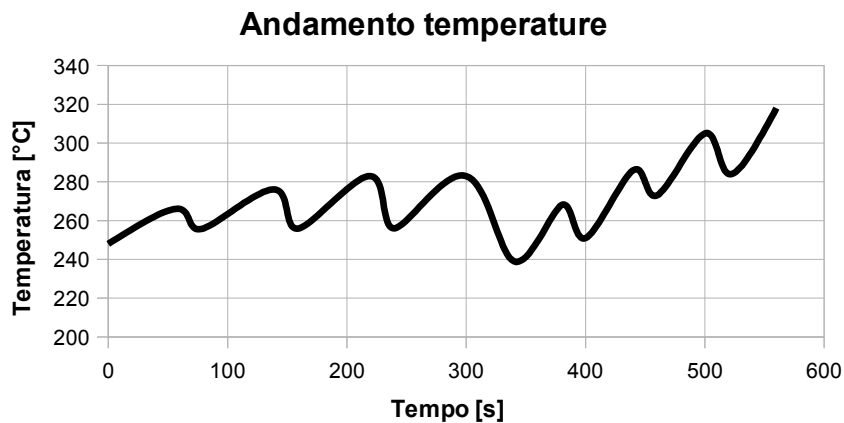


Figura 4.3: Grafico andamento temperature

Con entrambe le pressioni si arriverà all'equilibrio tra potenza termica generata e dissipata, ma per quelle a 5bar esso è a temperature ben più alte. Di conseguenza il freno diventa sempre più caldo.

### 4.3 Prime conclusioni e indicazioni per il prosieguo

Incrociando i dati su vibrazioni e temperature è evidente che più quest'ultima è alta e più forte sarà il fenomeno, ma solo a determinate pressioni.

Un certo aumento di sollecitazioni è stato registrato sia a 2,5 che a 5bar, così com'è successo per la temperatura. Ma nell'ultimo gruppo di frenate l'impianto ha vibrato molto meno nonostante fosse più caldo.

È importante, però, ricordare una cosa: fin'ora sono state considerate le temperature in pastiglia, non quelle sul disco. Esso si scalda molto di più durante la frenata, ma è anche in grado di dissipare molto di più.

Nel capitolo successivo saranno presentati i risultati della termocamera che, come si vedrà, getteranno molta più luce sul comportamento del disco.

#### *Capitolo 4 - RISULTATI DELLE PROVE*

---

Riguardo al prosieguo, è evidente che conviene lavorare sulla 4° frenata a 2,5bar perché con essa si raggiunge il picco di sollecitazione.

Anche l'8° frenata è stata oggetto di studi più approfonditi, però non ha riportato differenze importanti. Di conseguenza i risultati della sua analisi non saranno esposti qui di seguito.



## **5 ANALISI APPROFONDATA DELLE FRENATE CRITICHE**

Nel precedente capitolo è stato appurato che la 4° frenata risulta essere la più critica di tutta la procedura. Una prima analisi di essa è stata fatta attraverso l'accelerometro di riferimento e la termocoppia in pastiglia, ma per capire più a fondo il judder è necessario scendere più nel dettaglio.

In questo capitolo saranno esposti e commentati i risultati provenienti dalla termocamera, dal vibrometro e dall'applicazione Judder Brembo, sviluppata appositamente per lo studio delle vibrazioni.

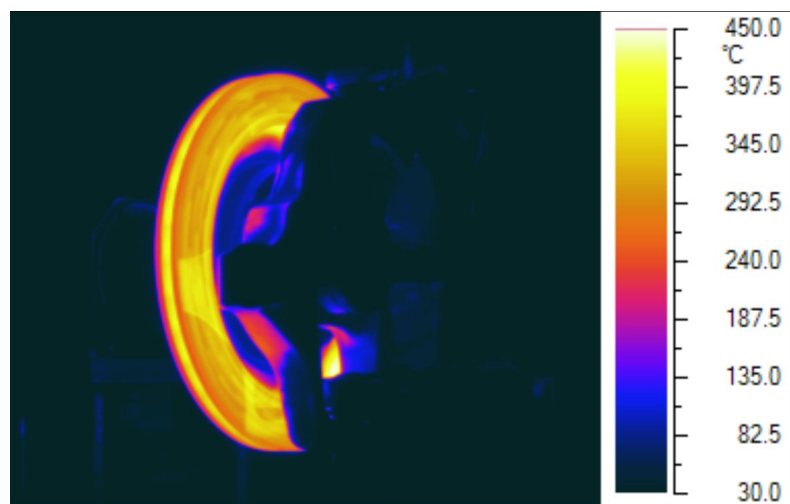
### **5.1 Disco**

È il componente più importante perché dalla sua deformazione si origina il fenomeno. Di esso sono state esaminate le temperature e le deformazioni con il vibrometro.

#### **5.1.1 Temperature**

Insieme alla pressione, la temperatura è il principale elemento scatenante, quindi deve essere esaminata a fondo.

Al contrario della termocoppia, con la termocamera è possibile rilevare la distribuzione di temperatura su un corpo.



*Figura 5.1: Fotogramma dal video ripreso dopo i preriscaldi*

In figura 5.1 è riportata una fotografia a falsi colori del disco. Essa non è altro che un fotogramma del video girato appena dopo i preriscaldi effettuati con pressioni di 10bar.

Ogni sfumatura di colore rappresenta una temperatura e più sono alte e più ci si avvicina al bianco.

Purtroppo si sono verificati dei fenomeni di riflessione: nella parte bassa e centrale del disco è visibile la sagoma del fusello. Dato che gli infrarossi si comportano esattamente come la luce visibile, è possibile farli riflettere. In questo caso, il disco emette radiazioni che rimbalzano sul fusello e tornano al mittente.

Il risultato di ciò è la rilevazione di una temperatura più alta perché l'emissione diretta e quella riflessa si sommano. Non c'è un modo per eliminare quest'ultima, si può solo diminuirne l'effetto riducendo l'emissività. Quest'ultima, però, non va impostata a un valore troppo basso, pena la sottostima del valore rilevato.

Le temperature sulla superficie del disco, escludendo le zone di riflessione, sono comprese tra i 300°C e i 340°C.

La prima cosa che salta all'occhio è la differenza rispetto alle pastiglie, più fredde di quasi 100°C. Il punto di misura della termocoppia, infatti, è a pochi millimetri dalla piastrina, di sicuro più freddo della superficie.

La seconda cosa che si nota è la pressoché uniformità della distribuzione di calore. La differenza di 40°C è imputabile alla presenza di fasce concentriche più calde di altre, ma anche questo si può ritenere normale.

Il contatto pastiglia/disco e la distribuzione di pressione non è mai costante, quindi ci sono sempre zone più sollecitate di altre. Per questo motivo, quando si utilizzano delle termocoppie striscianti per rilevare la temperatura superficiale del disco, è necessario averne due o tre su altrettante circonferenze differenti.

In figura 5.2, invece, è riportata la situazione dopo le frenate a 2,5bar: la distribuzione di temperatura non è più uniforme.

Il disco appare complessivamente più freddo, perché il range va da 220°C a 300°C, ma la differenza tra i limiti è di 80°C. La minore temperatura è imputabile alla maggiore velocità di rotazione raggiunta che ne ha favorito il raffreddamento.

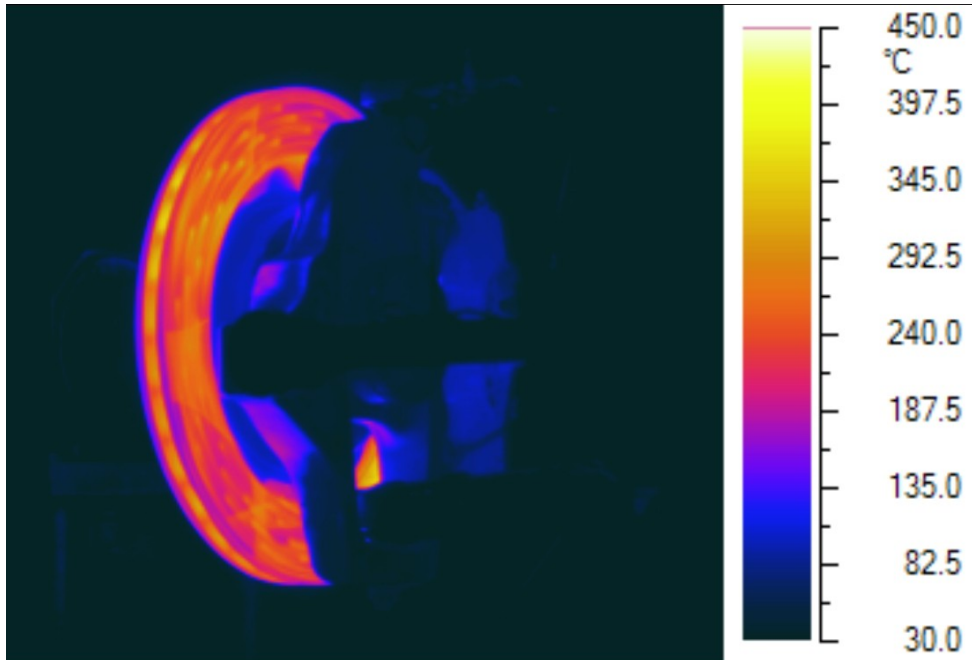
La cosa più importante, però, non è tanto la presenza di questi hotspot, ma la loro distribuzione: essi sono 2 e disposti a 180° l'uno dall'altro. In figura 5.2 è visibile solo uno di essi (l'altro è coperto dal fusello), ma nella 5.3 si vedono bene entrambi.

Le zone più calde, come visto nel capitolo 1, si dilatano più delle altre deformando il disco e rendendo il fenomeno autoeccitante perché in esse si scaricheranno più forze.

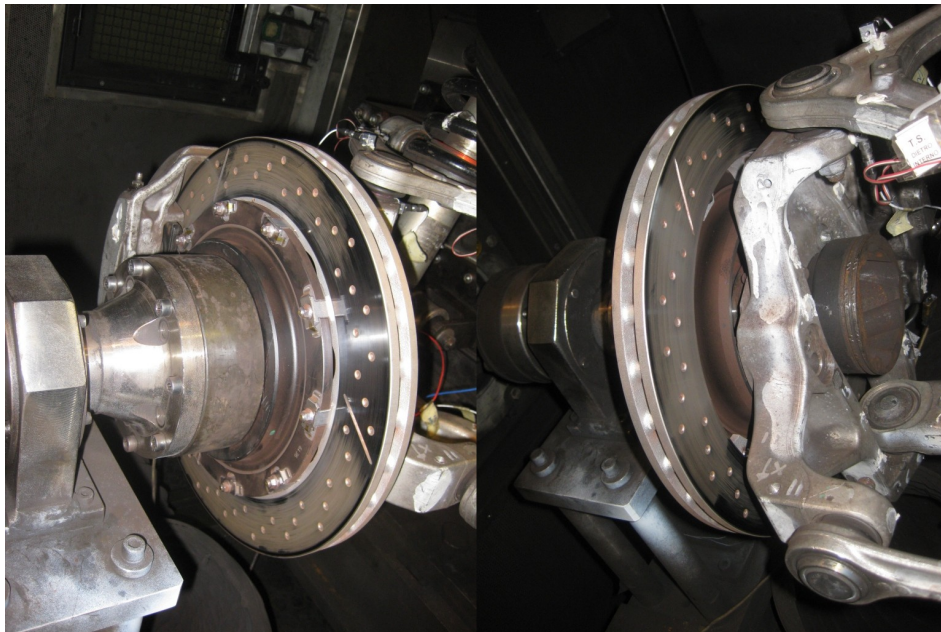
Il risultato di ciò è un bilobato: il disco presenterà due creste (le più calde) e due valli (le più fredde). Il fenomeno apparirà sfasato di 90° tra una cartella e l'altra.

Il disegno in figura 5.4 schematizza questa situazione.





*Figura 5.2: Fotogramma dal video ripreso dopo le frenate a 2,5bar*



*Figura 5.3: Disco dopo il test con le due zone più sporche a 180° l'una dall'altra e sfasate di 90° tra i due lati*

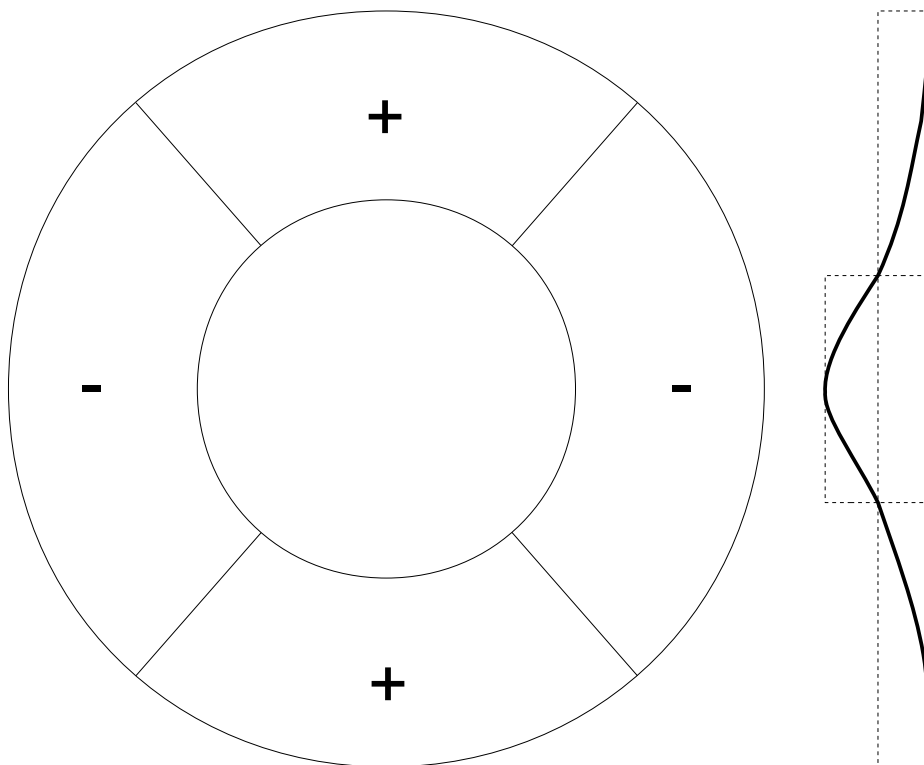


Figura 5.4: Schematizzazione di un disco bilobato

Ritornando alle figure 5.2 e 5.3, esse presentano due modi di vedere lo stesso fenomeno. Nella prima la cresta appare come più calda, mentre nella seconda è pulita dai depositi di materiale d'attrito. Nelle valli non c'è contatto e quindi la polvere rimane depositata.

Ovviamente quella che da un lato appare una cresta, sull'altra faccia del disco sarà una valle. L'immagine 5.3, infatti, è la composizione di 2 foto: quella a sinistra è ripresa dal lato della ruota, mentre l'altra dalla sospensione. Si nota come una cresta ben visibile sul lato destro (il disco è completamente pulito) sia una valle sull'altra cartella e viceversa.

Il bilobato, però, non appare sempre nello stesso modo, ma ogni volta ha uno sfasamento differente. Alla fine di una prova sono stati segnati i punti di inizio e fine delle due valli, e poi si è proceduto ad un nuovo test. Alla fine di quest'ultimo la posizione delle due deformazioni era differente: il fenomeno, quindi, non è correlato a difetti geometrici o del materiale.

Se così non fosse il disco si deformerebbe sempre nello stesso modo.

### 5.1.2 Vibrometria

Dato che non è possibile studiare le deformazioni del disco con gli accelerometri, si è ricorsi al vibrometro laser. Sono stati analizzati gli spostamenti assiali e radiali delle due cartelle.

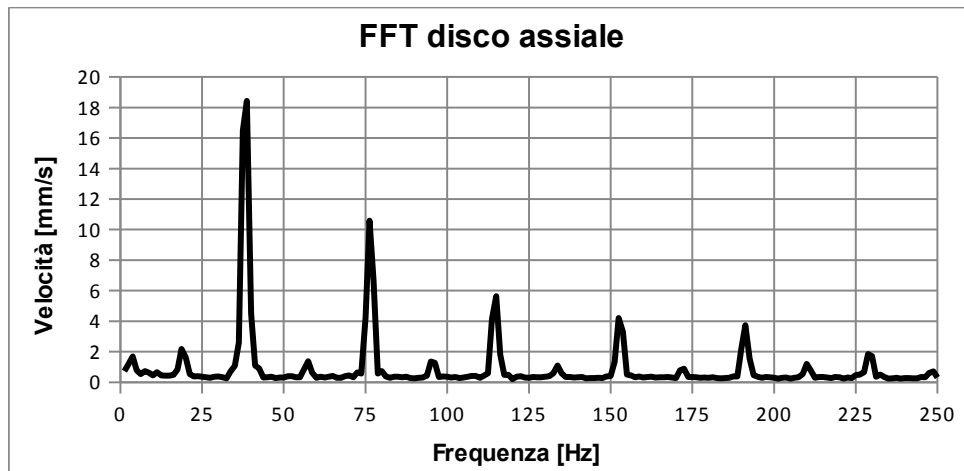


Figura 5.5: FFT della velocità del disco lungo l'asse di rotazione

Nel grafico di figura 5.5 è rappresentata la FFT del segnale del vibrometro lungo l'asse del disco: si nota il picco più alto a 38,75Hz. Dato che la velocità di rotazione era impostata a 1150giri/min, corrispondenti a 19Hz o circa 110Km/h, esso corrisponde al secondo ordine.

Questo risultato coincide con quanto trovato prima: il bilobato genera due creste e due valli, cioè un'onda con frequenza doppia rispetto alla rivoluzione del disco.

Come si vede dalla figura 5.6, la cartella rivolta verso la ruota ha un movimento ondulatorio uguale a quello presentato nel disegno 5.4. Il fotogramma di sinistra riporta lo spostamento minimo mentre l'altro il massimo.

$$s = \frac{A}{(2\pi f)} \sin(2\pi f t) \quad (4.1)$$

Sulle ordinate del grafico 5.5 è presente la velocità in mm/s, ma con l'equazione 4.1 è possibile risalire allo spostamento in mm. Il picco del 2° ordine è sufficiente per arrivare a 0.08mm. Dato che, come riportato nel primo capitolo, a un pilota esperto bastano 0,015mm di variazione di spessore per accorgersi del judder, in questo caso il disco è sicuramente da bocciare.

In figura 5.7 sono presentati, invece, i due fotogrammi relativi al 4° ordine: la forma ondulatoria non è più in senso circonferenziale, ma radiale. Lo

spostamento è pari a 0,02mm, molto inferiore rispetto al 2° per la ridotta ampiezza e per la frequenza doppia.

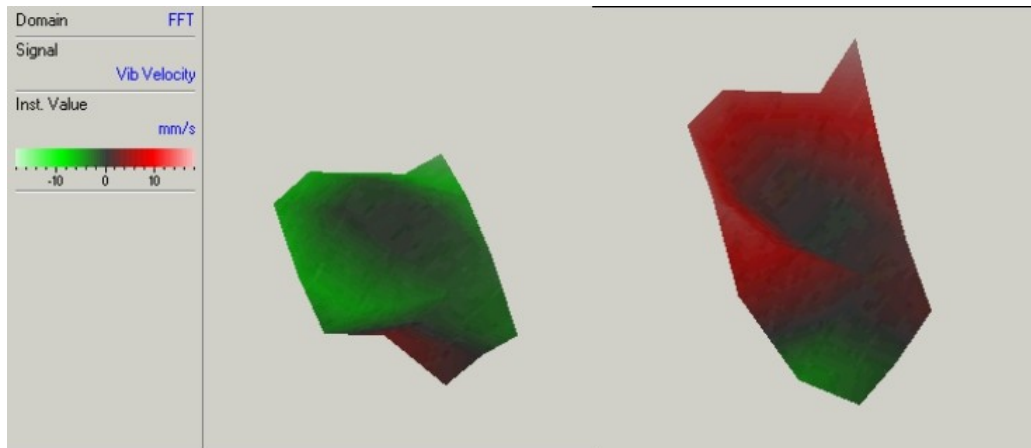


Figura 5.6: Due fotogrammi con velocità massima e minima del disco nella direzione assiale a 38,75Hz

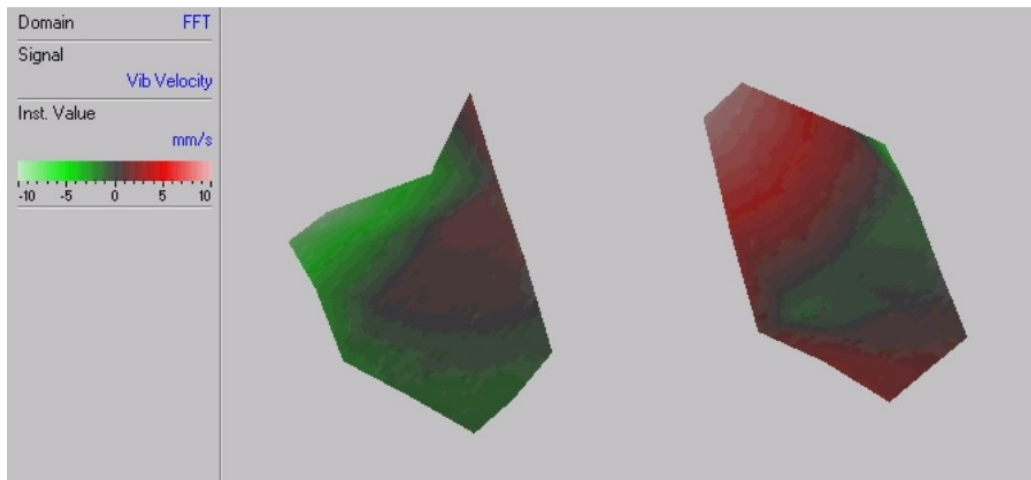


Figura 5.7: Fotogrammi con massimo e minimo della velocità assiale a 76Hz

Per ottenere gli spostamenti radiali, il vibrometro è stato posizionato frontalmente al disco e non è stato necessario utilizzare uno specchio per mantenere il raggio il più perpendicolare possibile. La FFT risultante è presentata in figura 5.8 e denota un 4° ordine di ampiezza doppia rispetto al 2°. Lo spostamento corrispondente è di 0,03mm per entrambi.

Per capire l'andamento è necessario guardare la figura 5.9: le due cartelle, rappresentate da due linee di punti, hanno un andamento oscillante in controfase l'una rispetto all'altra. Anche questa è la conseguenza della presenza di zone

calde su una cartella corrispondenti a quelle fredde sull'altra. Quando una si dilata per il calore (cresta), l'altra lo fa molto meno (valle), facendo anche imbarcare il disco.

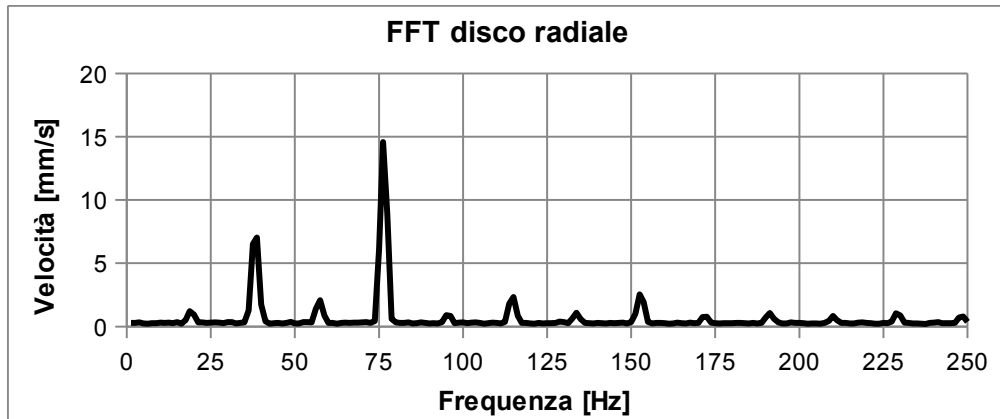


Figura 5.8: FFT della velocità radiale del disco

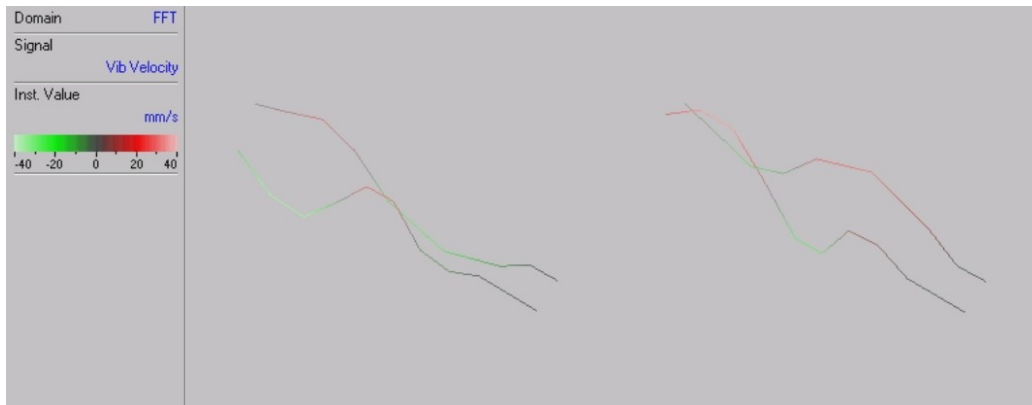


Figura 5.9: Fotogrammi della massima e minima velocità di deformazione radiale del disco a 76Hz

È stata riportata solo la deformazione del 4° ordine perché essa e quella del 2° ordine hanno la stessa forma.

## 5.2 Pinza

La pinza e il fusello sono i due componenti che hanno permesso di fare un confronto tra l'output del vibrometro e il software oggetto di questo elaborato. Essendo a diretto contatto con il disco, le deformazioni di quest'ultimo genereranno delle sollecitazioni sia al suo interno, facendola dilatare lungo l'asse di rotazione del disco, sia sull'attacco radiale con il fusello. In quest'ultimo caso

entra in gioco anche la coppia frenante non costante che, come si vedrà in seguito, farà oscillare tutto l'assieme intorno alla sua posizione di equilibrio. Gli unici dati ricavati solo dalla vibrometria sono quelli relativi alle pastiglie perché, per motivi legati al notevole calore presente in quella zona, è sconsigliabile posizionarci degli accelerometri.

### 5.2.1 Vibrometria

Con il vibrometro sono stati rilevati gli spostamenti assiali e radiali della pinza e solo quelli assiali delle pastiglie.

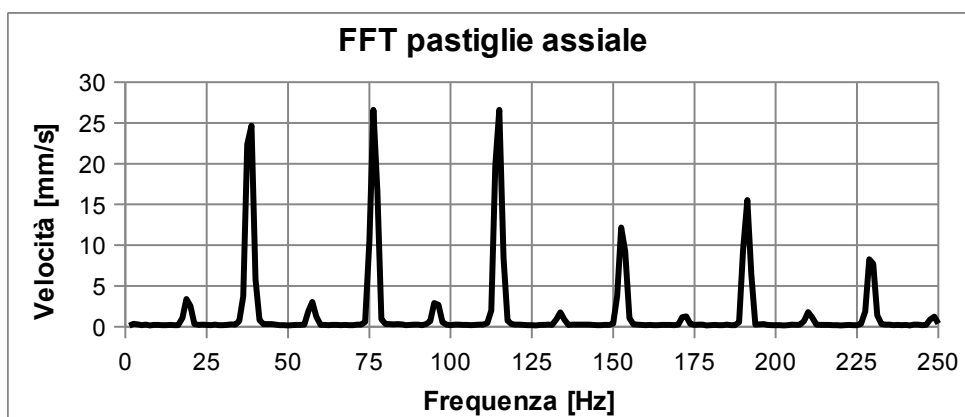


Figura 5.10: FFT della velocità assiale delle pastiglie

Osservando il grafico di figura 5.10, notano i picchi del 2°, 4° e 6° ordine. Hanno tutti valori molto simili il 4°, cioè quello un po' più alto, genera uno spostamento di 0.06mm.

In figura 5.11, come al solito, sono riportati i due fotogrammi delle posizioni massima e minima degli spostamenti. Come riferimento è stato preso il lato della pinza rivolto verso la ruota, mentre le pastiglie sono quei due segmenti che hanno registrato i movimenti maggiori.

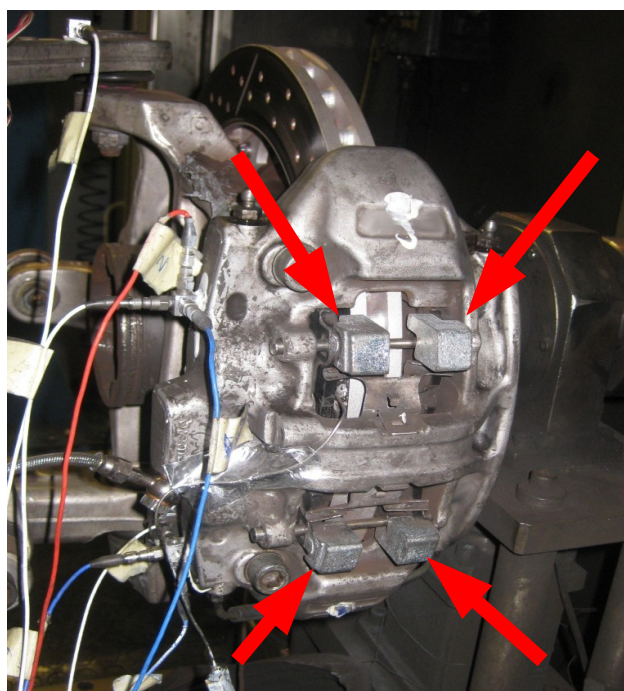
In realtà essi rappresentano le due masse attaccate ai lati delle piastrine (figura 5.12), usate per eliminare i fischi. Come è stato spiegato in maniera più ampia nel capitolo 1, un freno fischia quando le frequenze proprie di due o più componenti sono simili. Aggiungendo massa quest'ultime si abbassano e, se l'operazione è applicata a un solo pezzo, si separeranno.

La prima cosa che si nota nella 5.11 è che esiste un moto relativo tra corpo pinza e pastiglie: quest'ultime tendono ad avvicinarsi ed allontanarsi tra loro, eccitate dalla sollecitazione proveniente dal disco. Proprio questo è alla base delle oscillazioni di pressione e di coppia frenante.

In realtà quest'ultimi due aspetti sono fortemente connessi tra loro: più alta è la pressione e più lo sarà anche la coppia. Chiaramente se la prima oscilla, anche la seconda sarà costretta a farlo.



*Figura 5.11: Fotogrammi del massimo e minimo presi dall'animazione dello spostamento assiale delle pastiglie al 4° ordine*



*Figura 5.12: Pinza con le quattro massette evidenziate*

Tutto questo vuol dire che il disco deformato sposta le pastiglie e, quando le fa rientrare, il fluido frenante viene spostato dall'altro lato della pinza e verso il pedale dando origine a un contraccolpo.

Lo scuotimento delle pastiglie, però, non è uguale da entrambi i lati, ma è più accentuato nella parte di uscita disco. Il segmento di destra, che rappresenta la corrispondente massetta, ha una posizione massima e minima molto più distanti rispetto al superiore.

Questo nel caso del 4° ordine: il 2° e il 6° hanno un comportamento opposto, cioè la parte inferiore è quasi fissa mentre quella superiore ha ampie oscillazioni. In termini di spostamento, per quanto riguarda il 2° ordine, ciò si traduce in un'ampiezza maggiore per via della minore frequenza, corrispondente a quanto visibile a occhio nudo. La pastiglia, infatti, sembra essere quasi fissa nella parte inferiore e libera sopra.

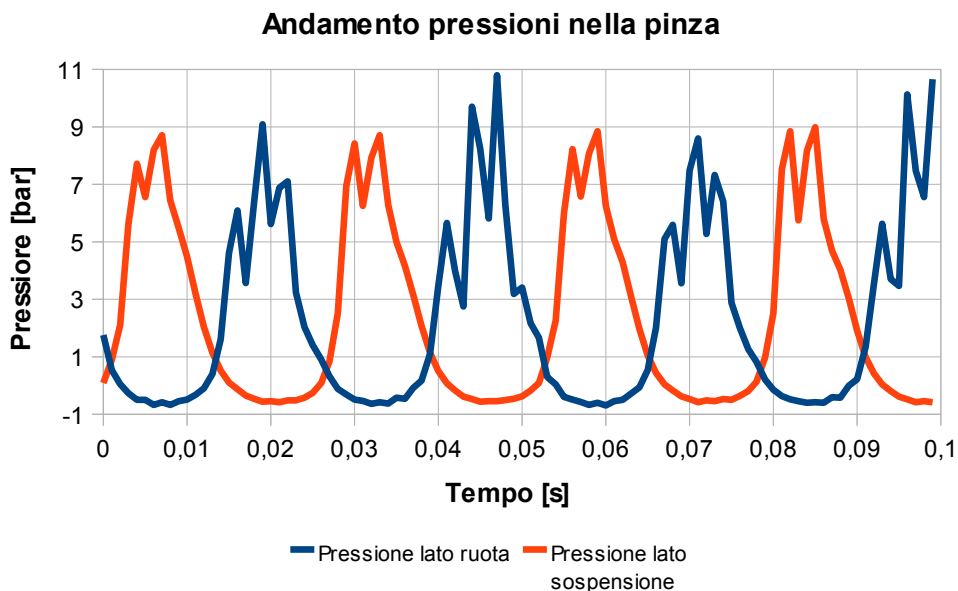


Figura 5.13: Andamento pressioni nei due lati della pinza

In figura 5.13 è presentato il grafico che confronta la pressione dal lato ruota e da quello della sospensione: si nota come ci sia un'alternanza tra i picchi. Quando da una parte la pressione sale, dall'altra cala andando pure sotto il livello atmosferico.

A far aumentare la pressione sono i condotti di sezione molto ristretta presenti all'interno della pinza. Essi costituiscono una perdita di carico e, come insegna Bernoulli, per aumentare la velocità del fluido in spostamento è necessario imporre una pressione sempre più alta.



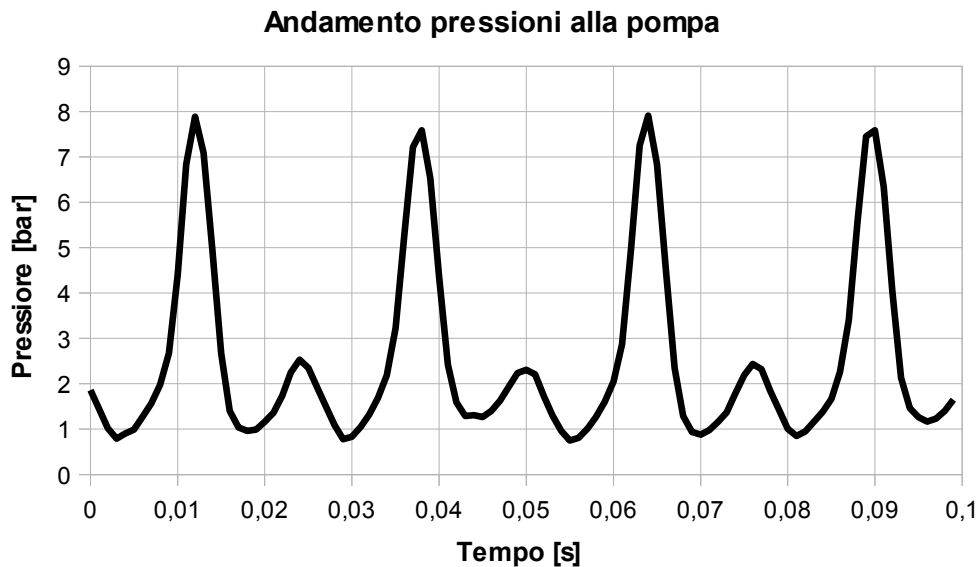
Mentre, in condizioni normali, la quantità di olio che si sposta è minima, perché i pistoni escono pochissimo dalle loro sedi, con il judder ne è richiesto molto di più. I condotti, quindi, risultano essere di sezione troppo ridotta e oppongono molta resistenza.

La conseguenza sono pressioni fino a quasi ben 11bar, corrispondenti a 8,5bar sopra quello imposto dal guidatore.

Il picco negativo, invece, è da imputare alla forza d'inerzia. Il fluido che si muove a forte velocità all'interno dei canali deve invertire continuamente il suo senso di percorrenza per seguire l'alternanza di creste e valli.

In queste condizioni si va sotto la pressione atmosferica, quindi si avranno dei valori negativi.

Tutto ciò genera un andamento sinusoidale delle pressioni, dipendente da quello del disco.



*Figura 5.14: Grafico dell'andamento della pressione del fluido frenante alla pompa*

In figura 5.14 è riportato il grafico della pressione rilevata dal sensore sulla pompa del fluido frenante. A fronte di una richiesta di 2,5bar, si vede come le oscillazioni presenti in pinza provochino picchi fino a 8bar e depressioni poco inferiori a 1bar.

Un andamento del genere, chiaramente, provoca delle pulsazioni sul pedale che potrebbero anche impensierire il pilota.

L'abbassamento del picco da 11 a 8bar è imputabile alla perdita di carico delle tubazioni tra pompa e pinza, anch'esse di sezione ridotta per la maggiore resistenza e ridotta quantità d'olio necessaria per frenare.

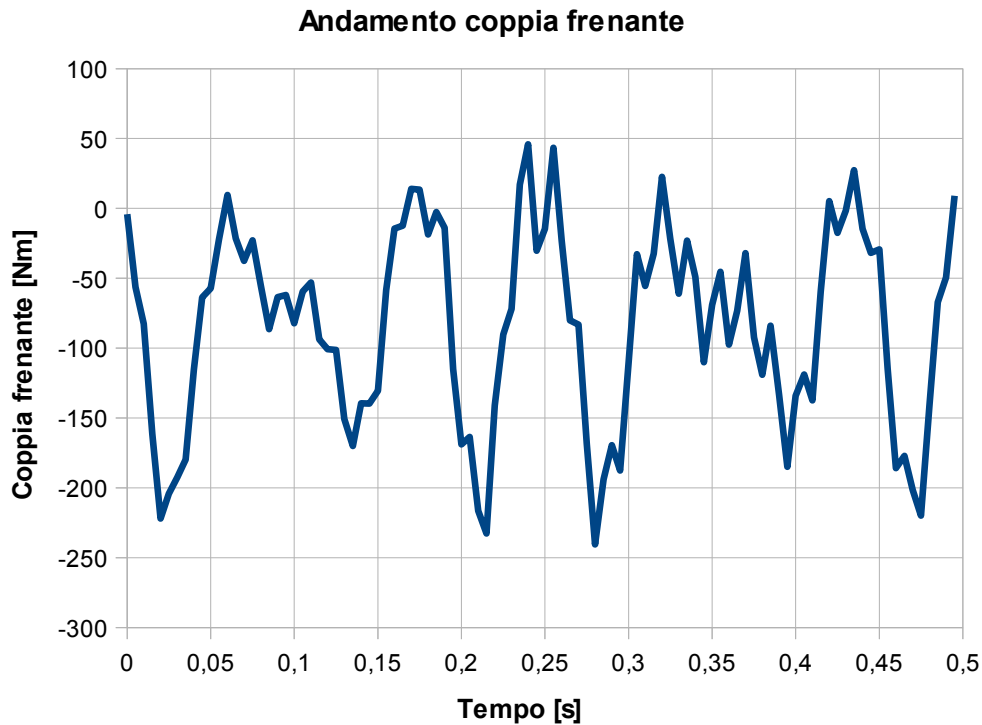


Figura 5.15: Grafico dell'andamento della coppia frenante

Neanche la coppia frenante (figura 5.15) è costante, ma ha un andamento più confuso rispetto alle pressioni del fluido frenante. Questo, purtroppo, può essere imputabile all'aliasing, dato che la frequenza di acquisizione è a 200Hz. È comunque visibile una certa variabilità.

Il suo valore va da 0Nm fino a -240Nm, quindi ci sono dei momenti in cui il freno non contribuisce al rallentamento del veicolo. Anche questo fattore impaurisce chi guida.

Gli sbalzi di pressione, logicamente, non si scaricano solo sui pistoni o sui condotti, ma anche sui fondelli, cioè le pareti interne dei cilindri. La conseguenza è una dilatazione della pinza, come già anticipato dall'immagine 5.11.

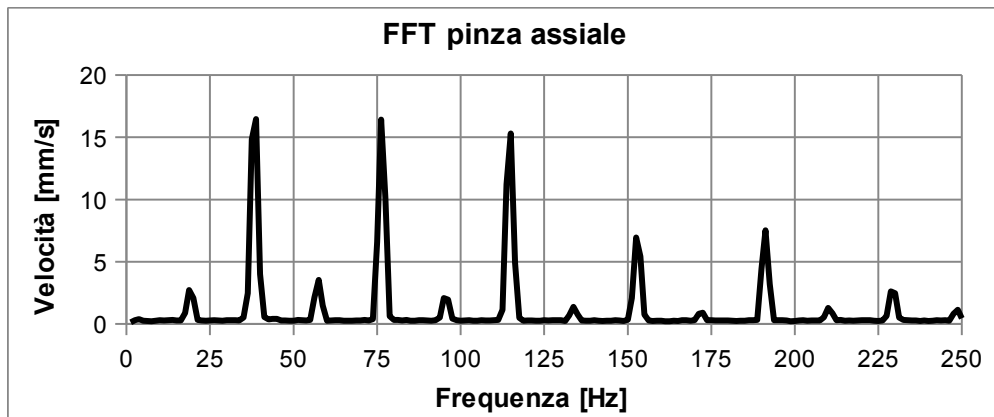


Figura 5.16: FFT delle velocità della pinza in direzione assiale

Osservando il grafico della FFT degli spostamenti assiali della pinza dal lato ruota (figura 5.16), si nota come abbia lo stesso andamento di quello della FFT delle pastiglie (5.10).

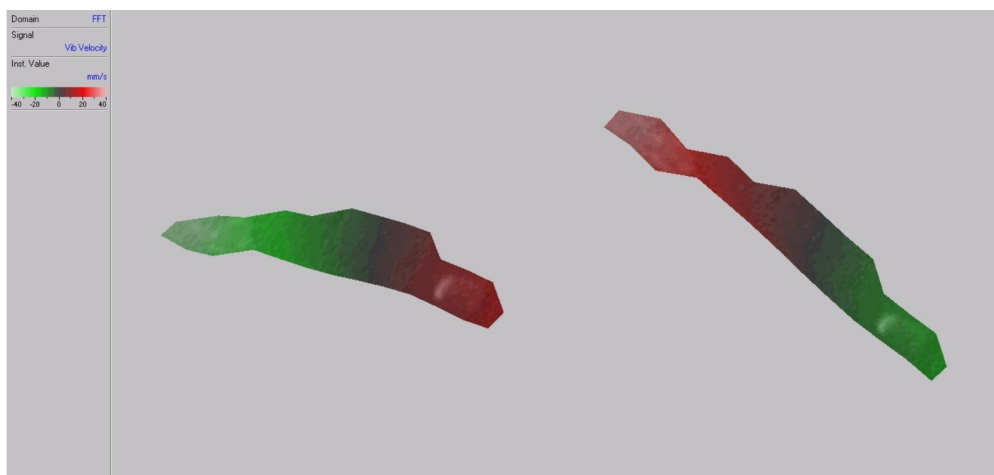


Figura 5.17: Fotogrammi della velocità massima e minima della pinza al 4° ordine

Il 4° ordine, rappresentato in figura 5.17, prevede un movimento simile a quello delle pastiglie, cioè di rotazione intorno ad un asse. Quando un lato si dilata, l'altro ritorna alla sua dimensione originaria e viceversa.

Il 2° e il 6° ordine hanno, invece, un movimento differente (figura 5.18): i due fondelli si dilatano allo stesso modo e compare anche uno spostamento del ponte della pinza lungo l'asse di rotazione.

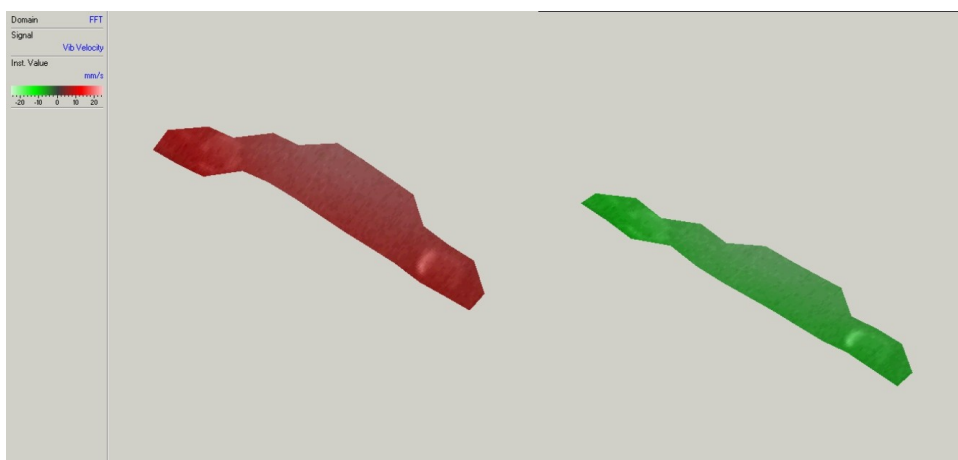


Figura 5.18: Fotogrammi della velocità massima e minima della pinza al 2° e 6° ordine

Fin'ora gli spostamenti hanno raggiunto velocità massime di poco superiori a 25mm/s, ma dall'analisi della pinza nel senso radiale emergono quantità molto più elevate.

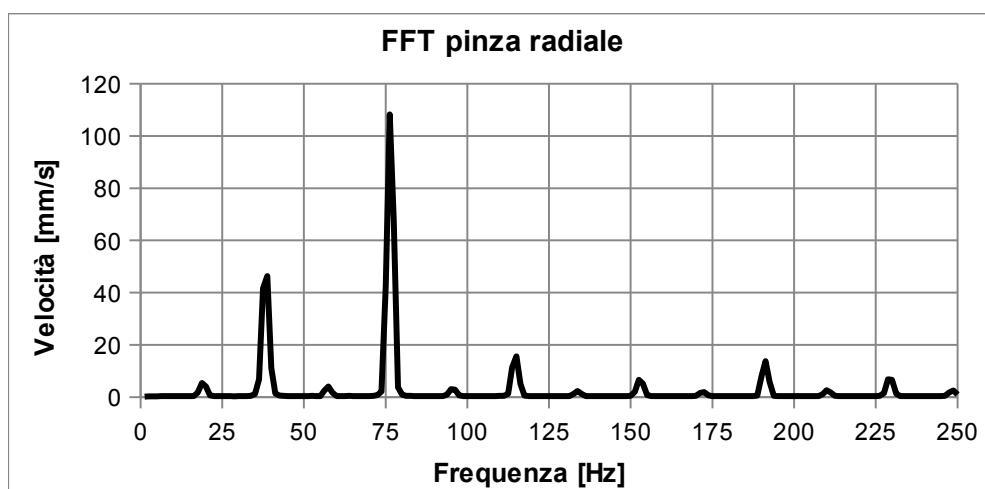


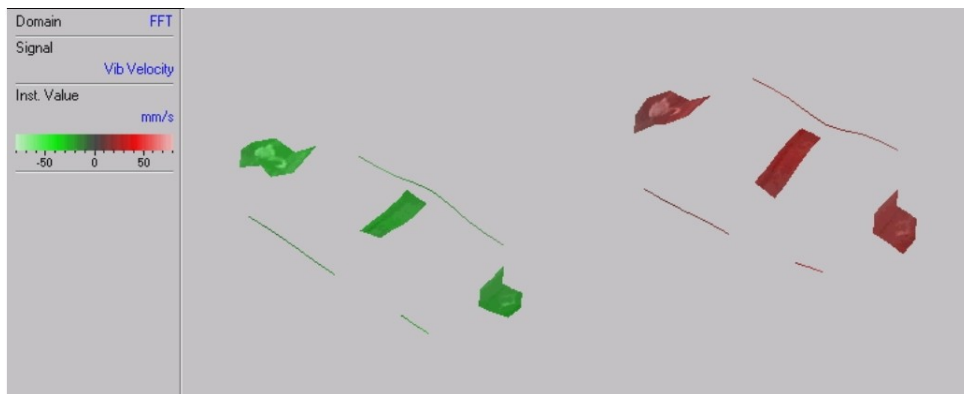
Figura 5.19: FFT della velocità della pinza in senso radiale

Il 4° ordine, com'è visibile in figura 5.19, arriva fino a 108mm/s, corrisponde a uno spostamento di 0,23mm di ampiezza.

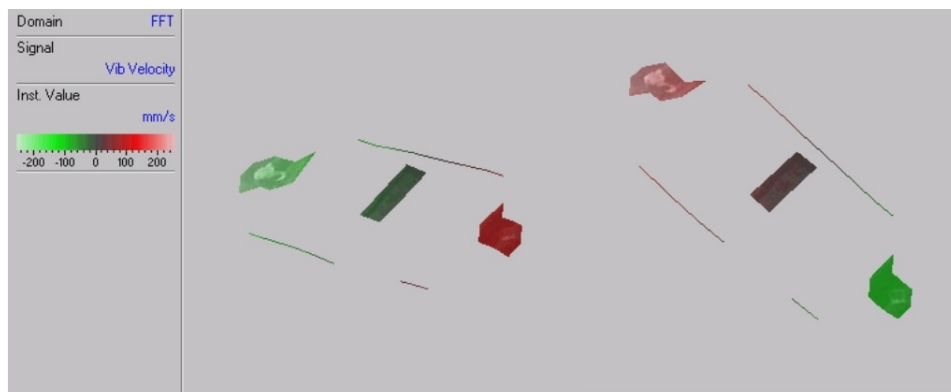
È presente anche un 2° ordine con un'ampiezza pari a circa la metà del primo picco, ma comunque molto più alta rispetto a quanto visto fino a qui.

Il 2° e il 4° ordine hanno due profili di spostamento differenti: il primo oscilla con un asse parallelo all'asse verticale (figura 5.20), mentre il secondo sembra una rotazione rigida di intorno all'asse della ruota (figura 5.21). Quest'ultimo è

visibile anche ad occhio nudo e, come si vedrà nello studio della vibrometria fusello o dal programma Judder Brembo, deriva dalla rotazione di tutta la sospensione.



*Figura 5.20: Fotogrammi di massimo e minimo spostamento del primo modo di vibrare radiale della pinza*



*Figura 5.21: Fotogrammi dello spostamento massimo e minimo del secondo modo di vibrare radiale della pinza*

### **5.2.2 Judder Brembo**

La pinza è il primo componente, secondo l'ordine di esposizione, che è stato analizzato anche con il programma Judder Brembo.

Nella 4° frenata il fenomeno ha avuto un'evoluzione nel tempo, così come presentato in figura 5.22.

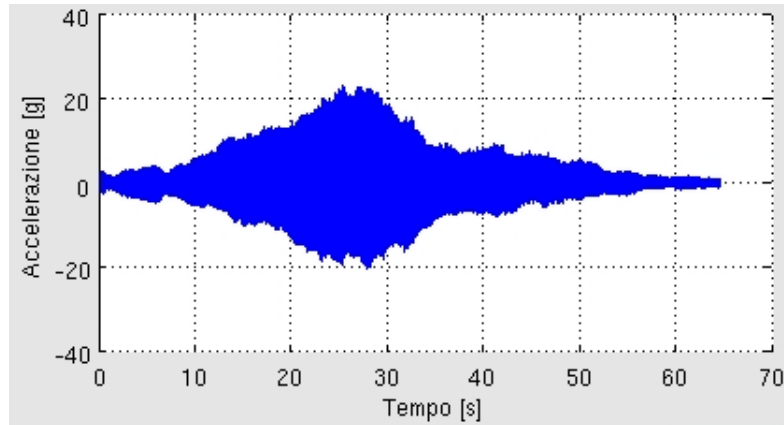


Figura 5.22: Andamento del segnale di riferimento durante la 4° frenata

Il picco è stato raggiunto intorno ai 25 secondi, per poi scendere fino ad annullarsi. Dato che, per fare l'animazione, è necessario impostare un certo periodo tempo, conviene selezionare proprio questo valore.

Per elaborare i dati è necessario scegliere una risoluzione in frequenza e un valore di overlap: sono stati impostati, rispettivamente, a 1Hz (slice di 1s) e 0,5.

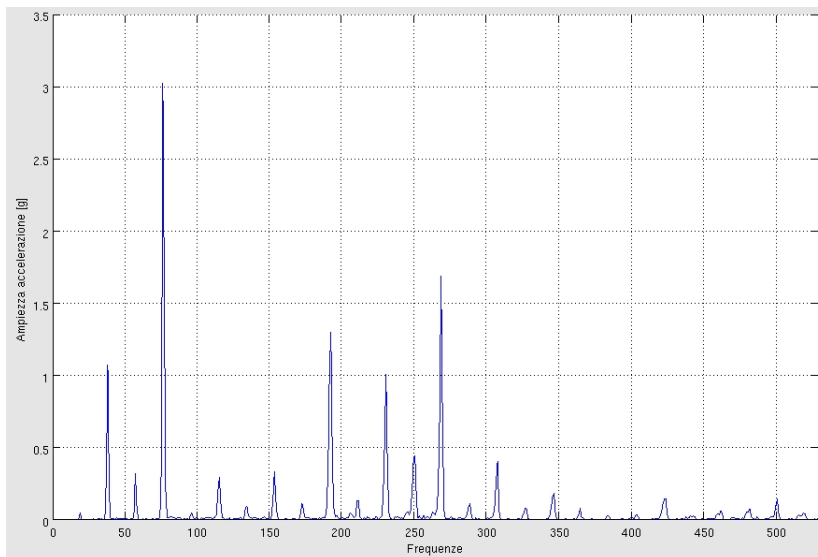


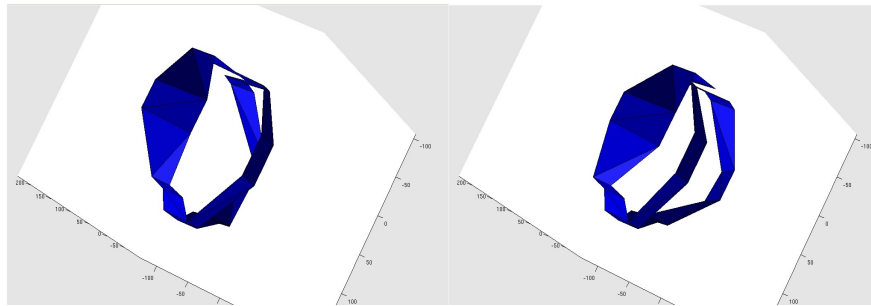
Figura 5.23: FFT dell'accelerometro 9 della pinza (asse y)

In tutte le FFT che saranno presentate d'ora in poi sarà sempre considerata la slice numero 53, perché la velocità del disco corrisponde a quella utilizzata nella vibrometria.

In figura 5.23 è riportata la FFT dell'accelerometro 9, uno degli 8 presenti sulla pinza rivolti secondo l'asse y (guardare l'Appendice 1 per l'elenco completo). Il 2° e il 4° ordine sono, anche in questo caso, molto elevati. Quest'ultimo è collocato a 76Hz, stessa frequenza rilevata dal vibrometro.

È importante ricordare una cosa: le FFT del vibrometro erano espresse in velocità (mm/s), mentre quelle di Judder Brembo in accelerazioni (g, ossia  $9,81\text{m/s}^2$ ). Derivando una sinusoidale di ampiezza A rappresentante la velocità, si ricava un'accelerazione pari a  $A2\pi f$ , quindi le velocità a frequenza maggiore avranno un'accelerazione ancora più grande.

Questo spiega l'aumento delle differenze tra 2° e 4° ordine. Ovvio che i dati ottenuti non saranno identici a causa di disturbi nel segnale (sia del laser sia degli accelerometri), leakage (la finestatura può ridurlo ma non annullarlo), operazioni di scalatura e fenomeno non costante.



*Figura 5.24: Fotogrammi del massimo e minimo spostamento in senso radiale della pinza in Judder Brembo*

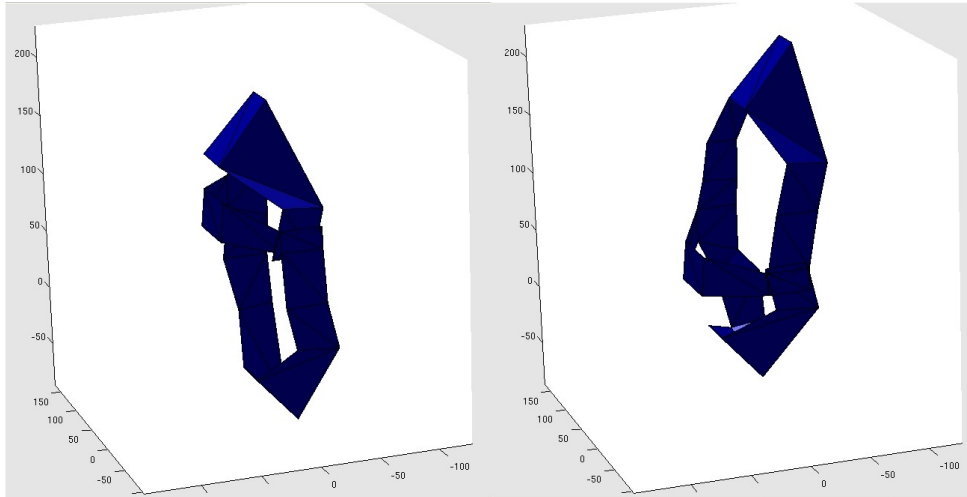
In figura 5.24 è sono riportati i due fotogrammi dello spostamento radiale della pinza secondo il 2° ordine: esso appare come una rotazione attorno ad un asse verticale, esattamente come rilevato dalla vibrometria. Il componente si deforma e la parte di destra, cioè quella rivolta verso la ruota, compie gli spostamenti più importanti perché non vincolata alla sospensione.

Anche il 4° ordine ha un movimento molto simile a quanto previsto dal vibrometro (5.25): tutto il gruppo ruota intorno all'asse della ruota per effetto della variazione di coppia frenante.

In queste due immagini gli spostamenti sembrano di ampiezza simile, ma in realtà è stata usata l'amplificazione per renderli sufficientemente visibili. Mentre nel primo caso è stato necessario moltiplicare fino a 120 volte, nel secondo sono bastate 60.

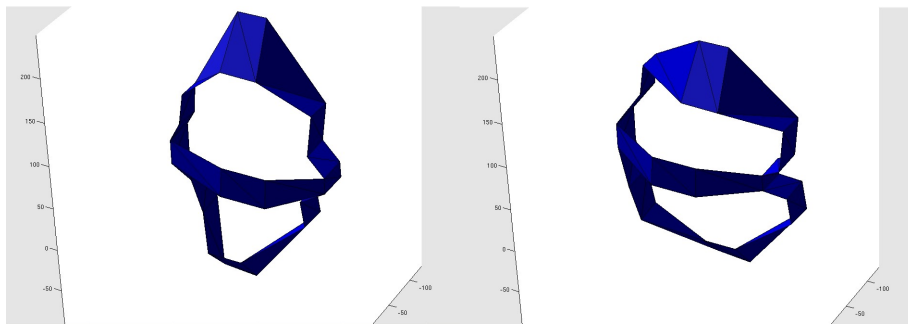
Con il 4° ordine è visibile anche un movimento non visibile con il vibrometro (perché di direzione ortogonale al raggio laser): il ponte e le due zone tra i

pistoni si muovono di più del resto della pinza. Ovviamente l'ingrandimento ha deformato eccessivamente il componente, ma ha consentito di porre in risalto questa differenza.



*Figura 5.25: Fotogrammi dello spostamento radiale della pinza secondo il 4° ordine in Judder Brembo*

Anche in questo caso sono stati analizzati gli spostamenti assiali (figura 5.26).



*Figura 5.26: Fotogrammi degli spostamenti assiali della pinza in Judder Brembo*

L'amplificazione dell'ampiezza è sempre 120 e si nota come la pinza si dilati e contraiga. La FFT ricavata da Judder Brembo prevede sempre un 4° ordine predominante alla frequenza di 76Hz (figura 5.27). Questa volta l'accelerometro considerato è il numero 8.



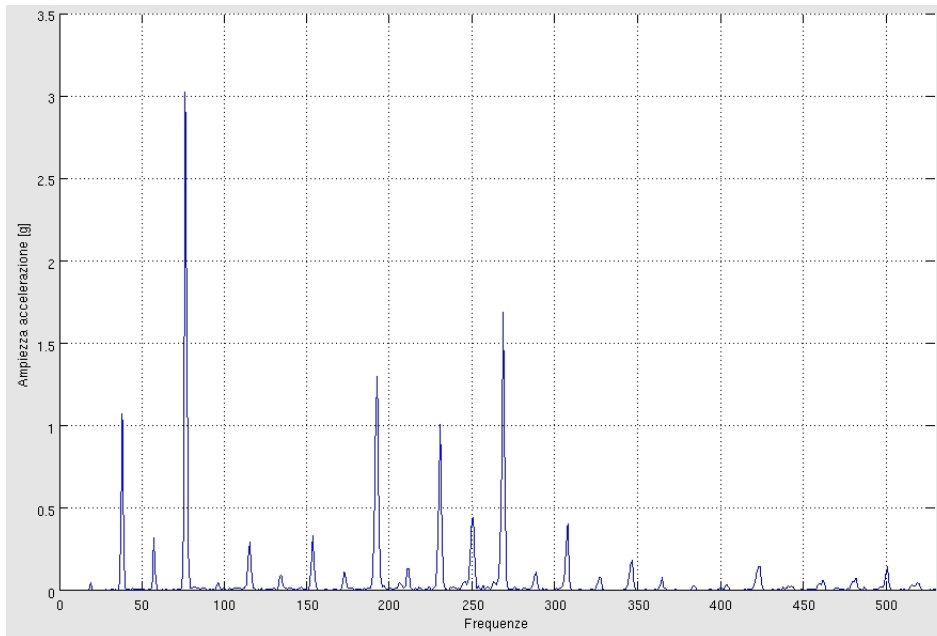


Figura 5.27: FFT degli spostamenti assiali della pinza calcolata da Judder Brembo

Questo primo confronto ha dato esiti molto positivi: Judder Brembo e vibrometria sono correlati su frequenze e modi di vibrare.

Riassumendo, la pinza ruota intorno al suo asse per le variazioni di coppia frenante e si dilata e restringe per gli sbalzi di pressione causati dalle ondulazioni presenti sul disco. Tutto questo avviene soprattutto al 4° ordine, ossia con frequenza quadrupla rispetto alla velocità di rotazione del banco (76Hz).

### 5.3 Sospensione

La sospensione contiene il fusello, il triangolo superiore, quello inferiore e il braccetto laterale. Sono stati analizzati tutti con Judder Brembo, tranne il primo che è stato oggetto di studio anche del vibrometro laser.

#### 5.3.1 Vibrometria del fusello

Le rilevazioni sono state concentrate sugli spostamenti nel senso radiale. A titolo di confronto, anche parte del triangolo superiore è stata inserita nella misura. La FFT risultante è visibile in figura 5.28: l'unico picco significativo è a 76Hz e arriva fino a 241mm/s. Ciò corrisponde a uno spostamento di ampiezza 0,5mm, motivo per cui è visibile anche ad occhio nudo.

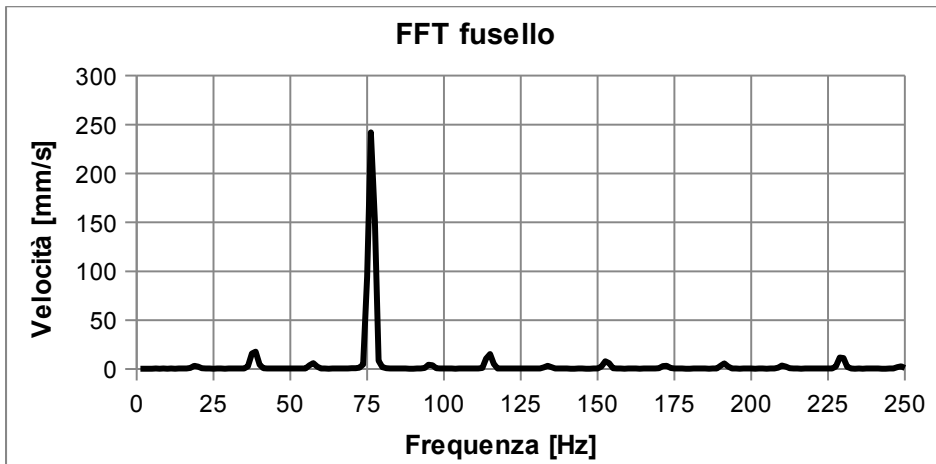


Figura 5.28: FFT degli spostamenti radiali del fusello

In figura 5.29 sono presentati i due fotogrammi del massimo e minimo spostamento: il fusello ha un movimento di rotazione intorno ad un asse parallelo a quello della ruota. Questo risultato era già visibile con la pinza. La riga in alto è il profilo del triangolo superiore e si nota come segue il fusello nei suoi spostamenti.

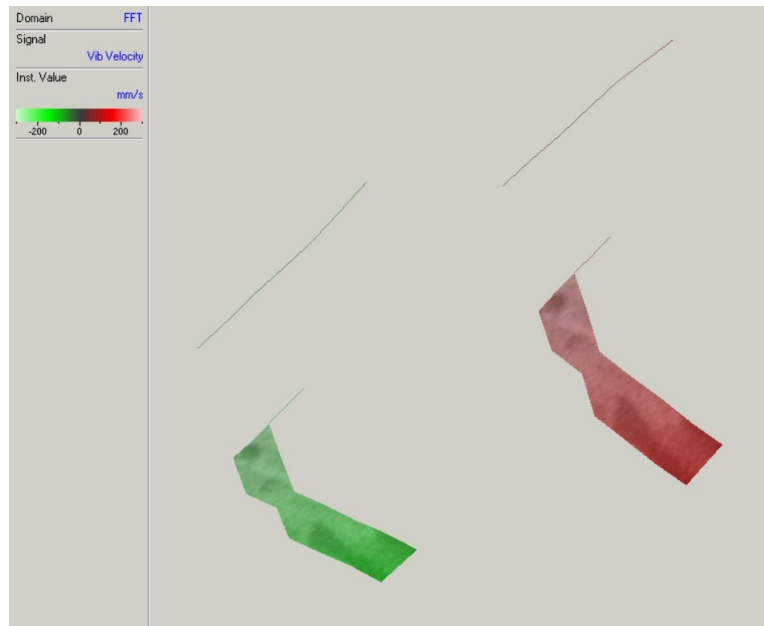
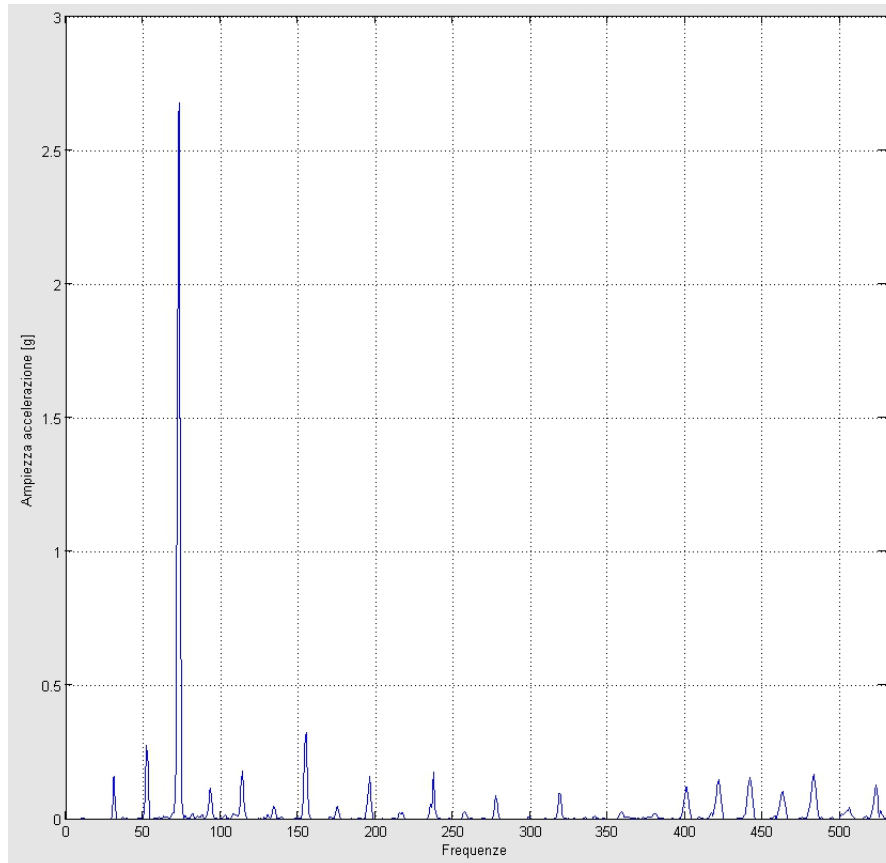


Figura 5.29: Fotogrammi del massimo e minimo spostamento del fusello e di parte del triangolo superiore

Questa, però, è solo una piccola fetta del componente. Con Judder Brembo è stato analizzato utilizzando ben 33 accelerometri, diventando il più strumentato di tutto il modello.

### 5.3.2 Judder Brembo sul fusello



*Figura 5.30: FFT dell'accelerometro 9 del fusello*

La FFT (figura 5.30) dell'accelerometro 9 sul fusello, rivolto lungo l'asse y, segnala un picco del 4° ordine, esattamente come previsto dal vibrometro. Guardando la deformata del pezzo, però, si notano alcune particolarità: la rotazione non è precisa e ci sono delle parti che sembrano muoversi con frequenza differente (figura 5.31).

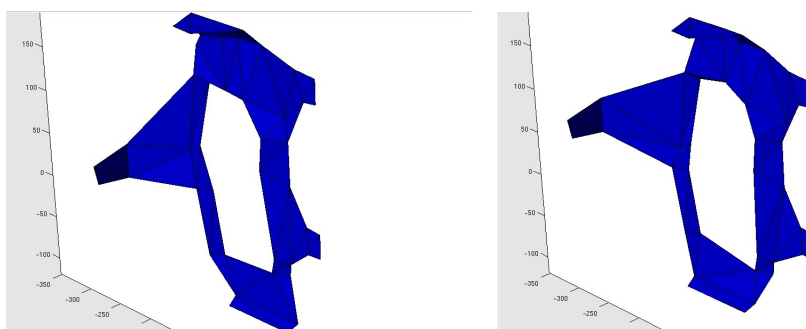


Figura 5.31: Fotogrammi presi dal video degli spostamenti del fusello

Mentre la parte centrale ruota come la pinza, le connessioni con gli altri componenti hanno un moto differente.

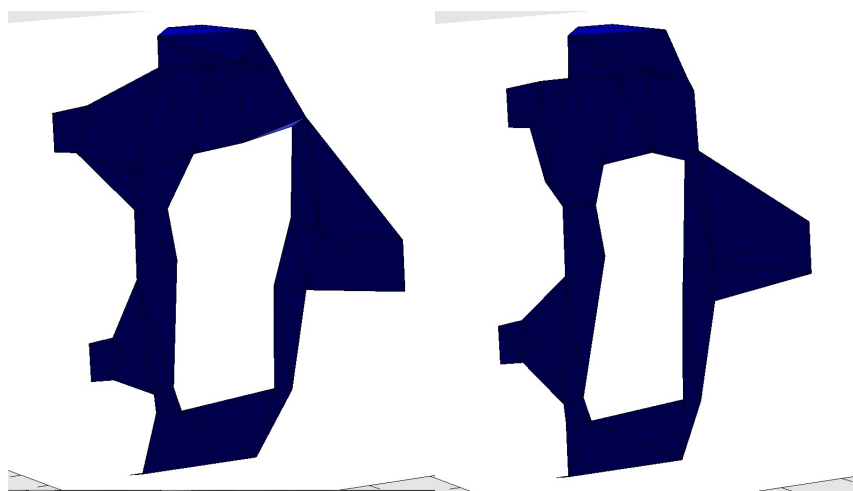


Figura 5.32: Elasticità dell'attacco radiale della pinza

La figura 5.32 riporta l'elasticità dell'attacco radiale rispetto al resto del fusello: le due connessioni vengono stirate e compresse ripetutamente.

Questo comportamento ha senso perché l'energia proviene dalla pinza e l'alluminio ha comunque una certa elasticità. Ovvio che l'amplificazione delle ampiezze, settata a 60, aumenta quest'effetto: una dilatazione di 1mm è rappresentata come di 6cm.

Altro fatto evidente è la differenza di frequenza tra i vari punti del fusello: ovunque ci sia una connessione, lo spostamento avviene in maniera differente. Considerando il movimento di rotazione del fusello, nella tabella 5.1 sono riportate le frequenze dei picchi degli accelerometri disposti lungo y e nelle parti orizzontali e lungo z in quelle verticali.

*Tabella 5.1: Picchi raggiunti dagli accelerometri del fusello*

<b>Accelerometro</b>	<b>Frequenza picco [Hz]</b>
3	76
6	76
8	73
11	76
15	77
18	76
19	73
23	77
26	76
29	73
33	73

Si nota come gli accelerometri nel corpo del componente (3, 6, 11, 18 e 26) indichino tutti un picco a 76Hz, mentre gli altri abbiano valori differenti. I due attacchi della pinza, per esempio, sono a 73Hz.

Queste differenze non sono imputabili a difetti nel programma Judder Brembo o al sistema di misura, perché gli accelerometri indicanti 76Hz provengono da set di misura differenti, rispettivamente dal 7 e dal 5. Se il sistema di scalatura dei segnali o quest'ultimi contenessero disturbi, si sarebbero ottenute delle differenze anche all'interno del fusello.

Il fenomeno è spiegabile con l'inserimento di non linearità: il collegamento tra i vari componenti non è fatto con continuità (come una saldatura a regola d'arte), ma con opportuni organi che rispondono in maniera differente alle sollecitazioni.

La pinza è fissata con delle viti, quindi con sistemi meccanici fatti di materiale differente rispetto al resto e che trasmetteranno l'energia in maniera diversa. I triangoli sono connessi al fusello con elementi contenenti gomma, cioè un materiale smorzante che cambia il suo comportamento a seconda della sollecitazione.

In figura 5.33 è riportato lo spaccato di uno di questi snodi [9]: se vede come le due parti siano collegati con una cuffia di teflon.

Per fare un paragone, ci si può rivolgere al mondo della musica. Le chitarre elettriche sono composte da un corpo e da un manico con la tastiera. Ci sono tre metodi per collegare le due parti: incollarle, avvitarle o fare tutto lo strumento da un unico tronco di legno.

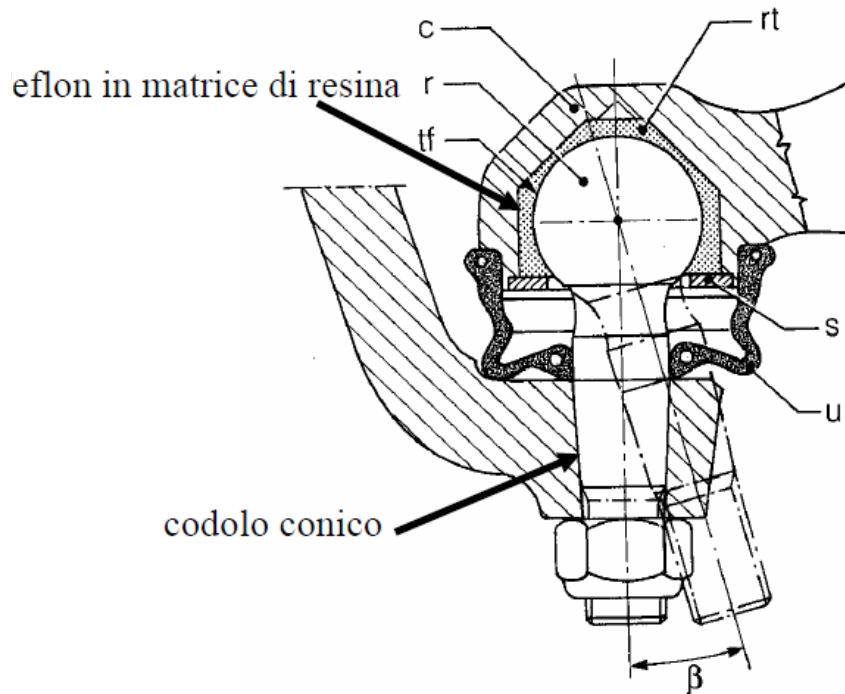


Figura 5.33: Spaccato di una giunzione con inserti in gomma

Quest'ultimo metodo è il più costoso per l'enorme quantità di scarti prodotti, però garantisce la migliore sonorità.

Il suono è una vibrazione generata dalle corde pizzicate dal chitarrista, che si propaga all'interno dello strumento e poi all'aria. Senza il corpo sarebbe quasi impossibile sentire una chitarra non amplificata.

Con una connessione incollata o avvitata si introduce una non linearità che influisce sulla trasmissione della vibrazione tra corpo e manico. Il risultato è un suono di qualità leggermente inferiore che l'orecchio di un esperto può avvertire. La stessa cosa avviene nella sospensione durante il judder: pinza, fusello e bracci si scambiano delle forze attraverso giunti avvitati e con elementi smorzanti in gomma.

Concludendo, il fusello ha un modo di vibrare al 4° ordine, il predominante, che prevede la sua rotazione intorno all'asse della ruota. Judder Brembo e vibrometria si trovano d'accordo su questo fatto. Il primo, però, consente di analizzare tutta la struttura del componente, evidenziando comportamenti differenti tra centro e connessioni e fenomeni di elasticità nell'attacco radiale della pinza.

## 5.4 Triangolo inferiore

I due triangoli della sospensione sono stati analizzati solo con Judder Brembo.

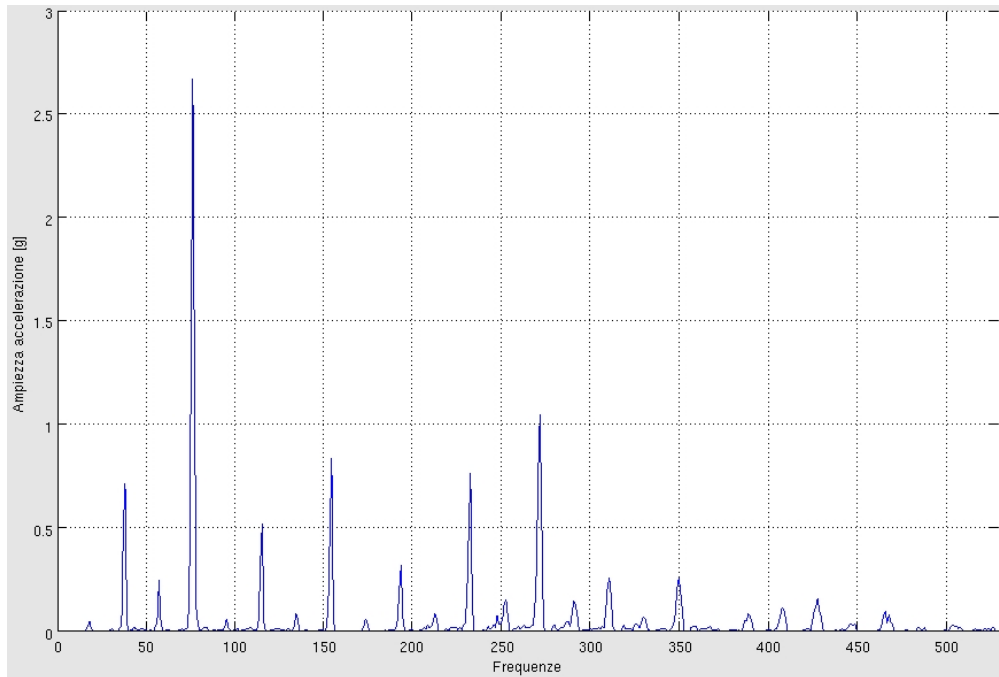


Figura 5.34: FFT del segnale dell'accelerometro 18 del triangolo inferiore

In figura 5.34, è riportata l'FFT dell'accelerometro rivolto verso l'asse y e posizionato vicino all'aggancio dell'ammortizzatore: anche in questo caso si ha un 4° ordine predominante con un'ampiezza di poco superiore ai 2,5g (come per il fusello).

Ancora una volta ci si trova davanti a differenze nella frequenze di vibrazione delle varie zone.

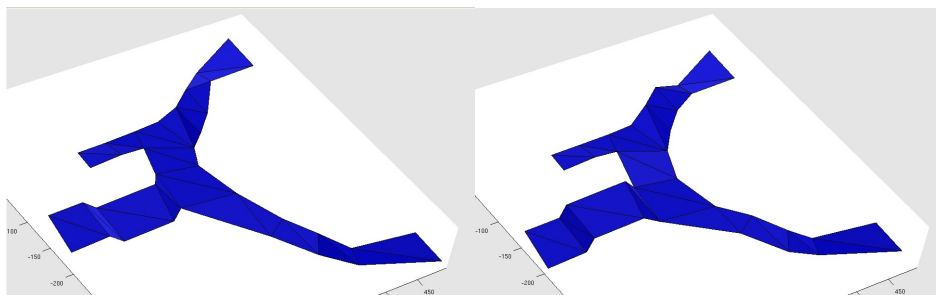


Figura 5.35: Fotogrammi dello spostamento massimo e minimo del triangolo inferiore secondo Judder Brembo

Mentre tutto il componente oscilla con una deformata abbastanza stabile (figura 5.35), ci sono solo due zone che si muovono a frequenze diverse e se ne parlerà più avanti, le due regioni vicine all'attacco dell'ammortizzatore sembrano essere quasi ferme.

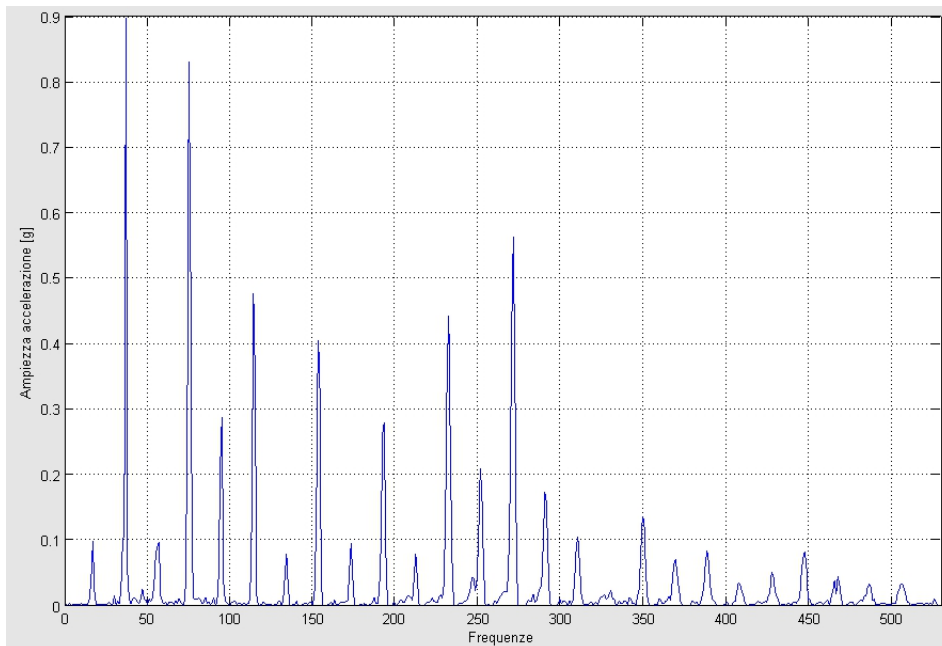


Figura 5.36: FFT del segnale dell'accelerometro 11 del triangolo inferiore

In figura 5.36 è riportata la FFT del segnale dell'accelerometro rivolto lungo l'asse y e posizionato di fianco all'attacco: si vede come le ampiezze siano notevolmente ridotte e il 2° ordine sia addirittura più alto del 4°.

La deformata del 2° e 4° ordine sono identiche, cambia solo l'ampiezza notevolmente ridotta della prima.

Probabilmente, in questo caso, non ha molta influenza la connessione tra componenti differenti, ma l'effetto irrigidente dato dall'ammortizzatore.

Quest'ultimo, oltre che essere di notevoli dimensioni, non può ruotare per assecondare gli spostamenti lungo y, ma solo lungo x e z. In poche parole, vincola l'asse y.

Il risultato sarebbe la costituzione di una specie di nodo, attorno al quale gira tutto il triangolo inferiore.

Oltre all'attacco dell'ammortizzatore, ci sono altre due zone che presentano singolarità: quelle vicine ai silent-block. Quest'ultimi sono le connessioni al resto del telaio che, nel caso del banco, è rappresentato dallo schienale. Anche in questo caso c'è gomma al loro interno (figura 5.37).





*Figura 5.37: Silent-block con la parte in teflon colorata di giallo*

Nella zona del silent prima del semiasse si rileva un picco di frequenza a 75Hz (accelerometro 1), mentre nell'altro a 77Hz (accelerometro 26). Da notare che entrambi appartengono al set di misura 3, quindi, ancora una volta, non è un errore da imputare al sistema di scalatura.

L'ultima osservazione riguarda i punti di misura al centro dei due lati del triangolo: probabilmente si tratta di nodi. Le loro FFT sono molto simili a quelle di figura 5.36, quindi i loro spostamenti sono molto ridotti.

## **5.5 Triangolo superiore**

Sul penultimo componente di questa trattazione poggia l'accelerometro più importante: quello di riferimento. Si ricorda che la sua posizione è stata scelta perché riconosciuta come quella con le maggiori sollecitazioni, e quindi il minor rischio di confondere il segnale vero e proprio con il rumore, oltre che cogliere anche le più piccole variazioni del fenomeno in corso.

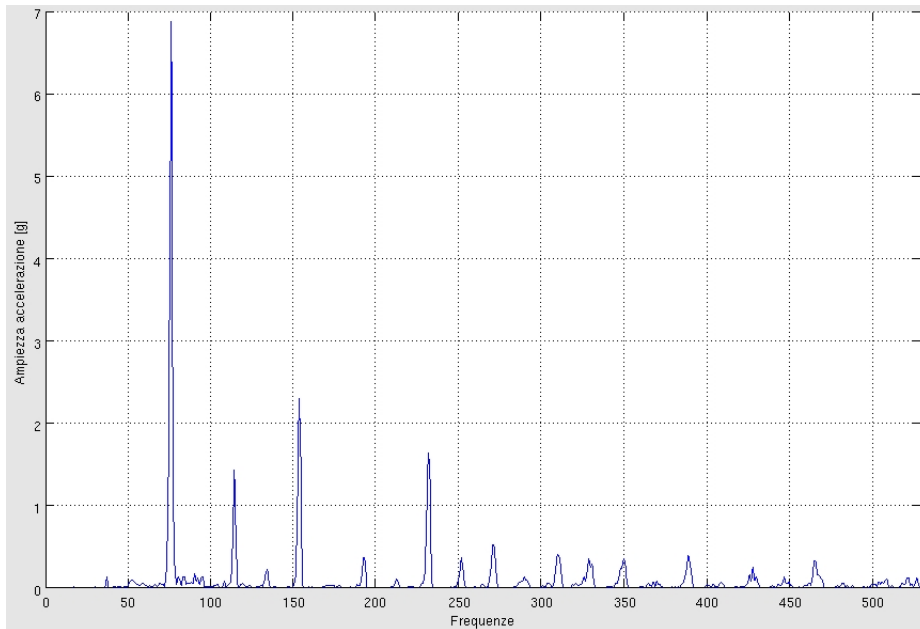


Figura 5.38: FFT del segnale dell'accelerometro di riferimento

L'FFT della 53° slice è riportata in figura 5.38: il 4° ordine è nettamente superiore e raggiunge i 7g di ampiezza.

Osservando gli spostamenti del pezzo (figura 5.39), si osserva un altro fenomeno elastico simile a quello visto in passato nell'attacco radiale della pinza: l'innesto del fusello ha un movimento differente.

Dalle FFT non appare nulla di diverso perché c'è sempre un picco a 76Hz, quindi la responsabile è la fase. L'elasticità provoca uno sfasamento dei movimenti facendo sembrare che esso si muova in ritardo.

Che sia proprio questa zona ad essere elastica è anche logico, dato che l'energia proveniente dal fusello passa proprio da lì.

Il resto del componente si muove come se subisse una traslazione rigida, quindi non ci sono molte modificazioni di forma e differenze nelle FFT.

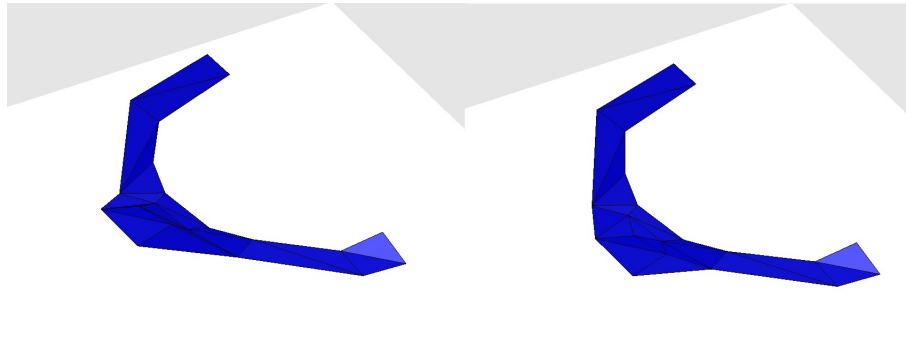


Figura 5.39: Fotogrammi dello spostamento massimo e minimo del triangolo superiore

## 5.6 Braccio laterale

Il braccio laterale è il più piccolo dei componenti ed è dotato di soli 3 punti di misura.

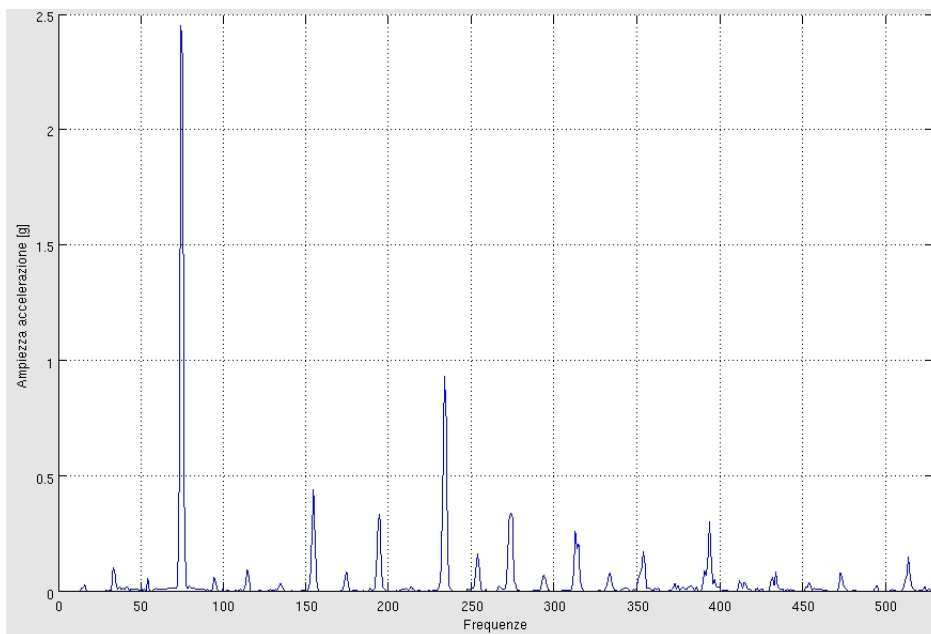
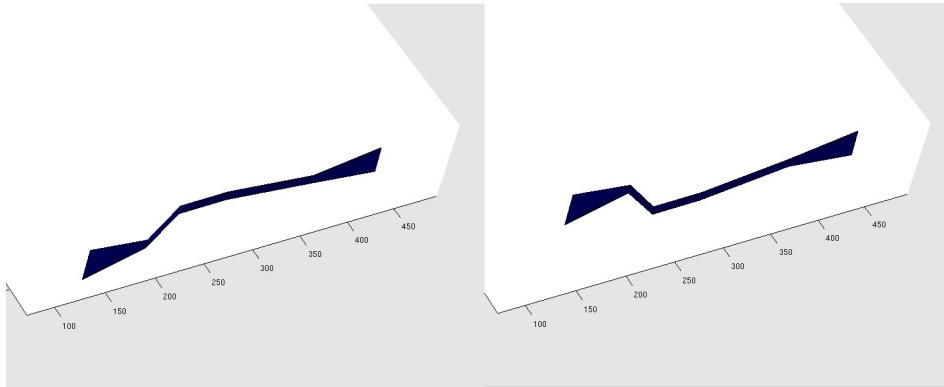


Figura 5.40: FFT del segnale dell'accelerometro 2 del braccio laterale

L'FFT di figura 5.40 è un déjà vu: 4° ordine con un picco vicino a 2,5g. Questo ricorrere di valori simili non fa altro che testimoniare la bontà dei calcoli effettuati. Può sembrare una constatazione inutile dato che il programma è stato

testato, però utilizzare dei segnali creati apposta e utilizzarne di veri può portare a grosse differenze.



*Figura 5.41: Fotogrammi provenienti dall'animazione del braccio laterale*

Lo spostamento (figura 5.41) denota un'ampiezza più alta della parte collegata al fusello. Gli altri due punti, invece, si muovono parallelamente.

Parlando di nuovo di frequenze, i due collegamenti hanno un picco a 74Hz, mentre il centro a 77Hz: l'influenza delle connessioni si fa sentire ancora una volta.

## **5.7 Assemblato complessivo**

Ora che sono stati analizzati tutti i componenti, si possono valutare gli spostamenti dell'assemblato.

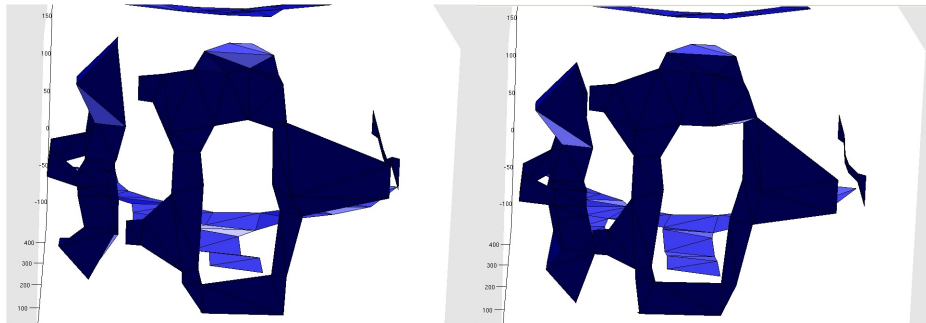


Figura 5.42: Movimenti dell'assemblato con primo piano sulla pinza e il fusello

In figura 5.42 sono riportati i due fotogrammi di massimo e minimo spostamento della pinza e del fusello. Quest'ultimo ruota su se stesso, con l'energia della pinza, trascinandosi tutto il resto della sospensione. In quest'immagine si vede bene quanto detto prima riguardo alla singolarità negli accoppiamenti: la distanza relativa tra pinza e fusello varia in continuazione. Se le frequenze fossero le stesse per entrambi probabilmente, gli spostamenti sarebbero in fase.

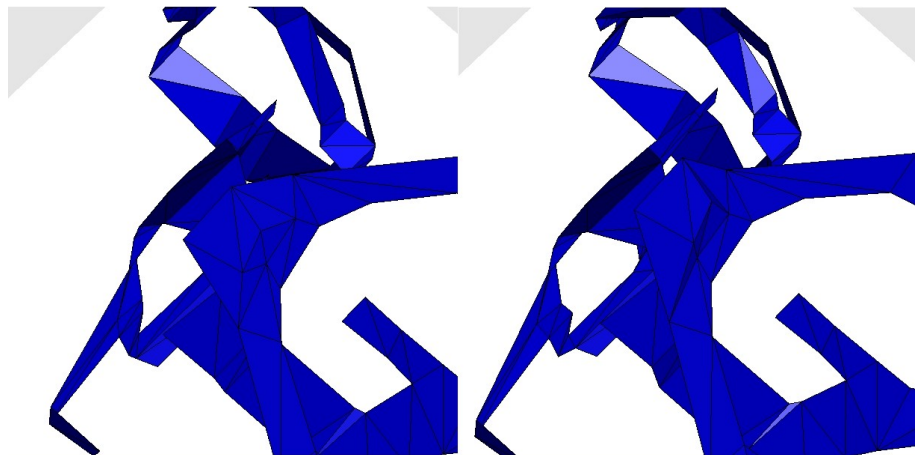
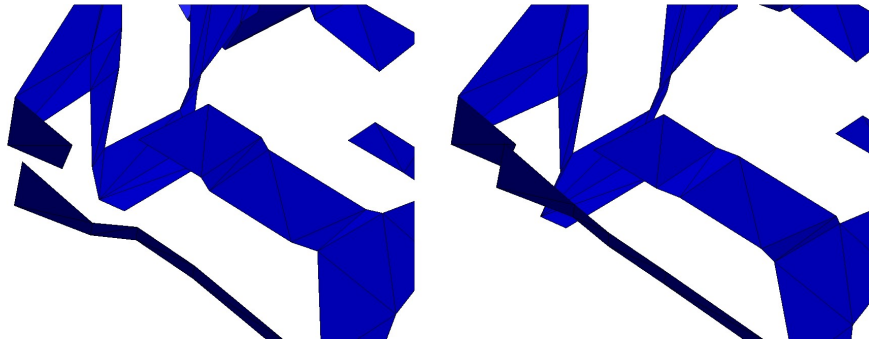


Figura 5.43: Movimenti del fusello e del triangolo superiore

Un comportamento differente, invece, è riportato nella 5.43: le parti che collegano il fusello al triangolo superiore si muovono con la stessa frequenza, ma in controfase. Nel fotogramma di sinistra, il triangolo è spostato verso sinistra mentre l'altro componente verso destra. Nel secondo fotogramma è il contrario.

Questo effetto è da ricercare nella struttura interna delle connessioni: a collegare le due parti è un perno d'acciaio inserito in una struttura di gomma. In questo



*Figura 5.44: Movimenti di fusello e triangolo inferiore*

modo sono sempre consentiti piccoli moti relativi, dipendenti dall'elasticità del polimero.

Se fusello e triangolo sono in controfase, il perno girerà intorno all'asse x per assecondarli.

Tra fusello e triangolo inferiore (figura 5.44), invece, ci sono delle differenze di frequenza che non mantengono in fase gli spostamenti.

La stessa cosa avviene tra fusello e braccio laterale, solo che qui si inserisce anche un moto di allontanamento e riavvicinamento di quest'ultimo.

Fino a qui è sempre stata analizzata la 4° frenata perché è risultata essere la più impegnativa. Nelle altre a 2,5bar non si sono notate grosse differenze, a parte l'ampiezza.

## 6 CONCLUSIONI

In questo elaborato di tesi è stato esposto un problema che affligge molti impianti frenanti: il judder.

Nel primo capitolo sono stati ripresi i concetti principali del funzionamento di un freno ed è stato introdotto il fenomeno in questione. Esso è oggetto di studio da parte di studenti ed enti di ricerca, ma non si hanno molte certezze a suo riguardo.

In questa sede sono stati eseguiti dei test ad hoc su una sospensione colpita dal problema e ne sono stati esposti i risultati. Per meglio svolgere questo compito è stato anche sviluppato un programma scritto in linguaggio Matlab che consente di elaborare un'animazione della sospensione durante il fenomeno.

I due “filoni”, se così si possono chiamare, di sviluppo sono stati, quindi, scrittura del programma e svolgimento dei test.

### 6.1 Judder Brembo

L'applicazione, che conta circa 4500 righe di codice, ha le seguenti caratteristiche:

- Inserimento della mesh di punti ed elementi triangolari di un componente. Si può fare sia per via grafica, con apposita interfaccia, sia con un file di testo.
- Composizione di assemblati di più componenti come, per esempio, l'intera sospensione con il freno.
- Indicazione della posizione degli accelerometri determinando i 4 punti più vicini ad essi e la direzione nello spazio. A ognuno sarà anche collegato un segnale nel tempo proveniente dai test a banco e salvato su un file .mat.
- Salvataggio di tutti i dati inseriti in un file di Matlab per poter ricaricare il progetto in un secondo momento senza dover reinserire tutto da capo.
- Decidere quali componenti visualizzare o nascondere, regolarne l'ampiezza di oscillazione e l'animazione lungo i tre assi. In questo modo l'utente può mettere in risalto qualsiasi aspetto dell'animazione.
- Elaborazione di tutti i segnali degli accelerometri. Essi saranno divisi in set e ognuno avrà ne avrà uno di riferimento. Le operazioni eseguite sono:
  - Crosscorrelazione per correggere i ritardi nel tempo;
  - Divisione in slice di tempo di durata dipendente dalla risoluzione in frequenza scelta;
  - FFT di ogni slice.

- Elaborazione del segnale di velocità di rotazione campionato, solitamente, a frequenza differente rispetto agli accelerometri.
- Animazione dell'assemblato inserito in base ai dati elaborati. Ogni punto delle FFT sarà considerato come una sinusoidale con una certa frequenza, ampiezza e fase, quindi lo spostamento non è altro che la somma di esse in un certo tempo.
- Possibilità di visualizzare l'animazione di un solo ordine. Si può decidere se visualizzare i primi venti tutti insieme oppure solo uno in particolare, considerando la sua sinusoidale.
- Opzione di salvataggio dell'animazione come file video non compresso.
- Visualizzazione dei risultati ottenuti. L'utente può vedere, oltre che i segnali, il loro spettrogramma (per evidenziare gli ordini) e le varie FFT.
- Salvataggio dei picchi di ogni slice e di ogni ordine in un foglio di calcolo per future elaborazioni e presentazioni a discrezione dell'utente.

L'applicazione, come si può intuire dalle sue caratteristiche, è stata sviluppata per lo studio del judder, ma si adatta a qualsiasi fenomeno vibratorio. Il cuore di essa, soprattutto dal punto di vista matematico, è l'elaborazione dei segnali e le Trasformate di Fourier su di essi, operazioni molto frequenti nel campo delle misure sperimentali.

## 6.2 Studio del judder

Dalla letteratura si evince che esso dipende da due “grandezze fisiche”: la pressione di frenata e la temperatura dell'impianto. Di solito non si superano i 10bar e il sistema deve essere caldo.

Alla luce di ciò è stata sviluppata una procedura, chiamata “Motorway” che lo mette in risalto. In essa si raggiungono i 250°C in pastiglia per poi eseguire due gruppi di frenate a 2,5 e 5bar.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- La temperatura accentua il problema, aumentando le vibrazioni e i rumori prodotti.
- La pressione tende, invece, a ridurlo. Nelle frenate a 5bar il fenomeno appare come molto debole, nonostante il raggiungimento di temperature più elevate. Questo dipende molto anche dalla sospensione: capita che siano necessarie pressioni ancora più alte per annullare il problema.
- Durante una frenata il fenomeno tende a raggiungere un picco d'intensità in una tempo variabile a seconda della pressione. A 2,5bar è poco prima della metà, a 5bar verso l'inizio, ma non è comunque fisso.
- Se si lascia a girare il banco ad una velocità pari a quella raggiunta nel picco e con pressione costante, il fenomeno aumenterà fino a raggiungere un massimo ma non andrà oltre.



- La termocamera ha permesso di capire ciò che accade sulla superficie del disco: si formano due hot spot a 180° uno dall'altro. Essi fanno dilatare alcune parti più di altre, dando la classica forma “bilobata”. Più si alza la pressione e più questo fenomeno si riduce, ritornando a una distribuzione di temperatura a fasce concentriche.
- Anche la vibrometria laser ha riscontrato una deformazione nei sensi radiale e assiale. In entrambi i casi con andamenti oscillanti a frequenze pari al 2° e 4° ordine.
- La pinza è sollecitata dalla deformata del disco. Il fluido frenante cerca di passare da un lato all'altro di essa a seconda del passaggio di una cresta o una valle. Le pressioni sono alternate dai due lati. Anche la pompa registra sbalzi anche pari a 3-4 volte la pressione di frenata.
- Questi sbalzi hanno conseguenze sulla deformazione della pinza e sulla coppia resistente. Mentre quest'ultima oscilla di conseguenza, la prima si dilata e si restringe in senso sia assiale sia radiale.
- Tutto il resto della sospensione è sollecitata dalla pinza e dalla variabilità della coppia frenante. Il fusello tenta di ruotare attorno all'asse della ruota per assecondare la pinza, ma i triangoli oppongono resistenza. Il risultato è una flessione alternata di quest'ultimi e un picco d'ampiezza al 4° ordine.
- Dai dati è possibile anche notare l'influenza delle non linearità. Silent-block e connessioni avvitate alterano la frequenza nella zona circostante perché forniscono una risposta diversa alle sollecitazioni.
- Sono presenti anche fenomeni elastici in corrispondenza degli attacchi della pinza e del triangolo superiore, cioè quelli da cui passa più energia. Essi sono visibili come dilatazioni superiori alla zona circostante.
- L'ultima frenata a 2,5bar è stata la più critica, ed è stata oggetto di tutti gli studi fin qui esposti. Quella a 5bar, invece, non ha prodotto particolari vibrazioni, ma ha visto l'annullamento dell'effetto di non linearità sul silent-block tra fusello e triangolo superiore.

Una volta a conoscenza di ciò che accade, si potrebbe pensare a qualche accorgimento per evitare l'insorgere del fenomeno, ma la strada è ancora lunga. Il motivo per cui si formino hot spot sul disco non è ben chiaro, ma l'unica cosa certa è che non dipende solo da esso. La deformazione è, in qualche modo, aiutata dalla pinza e dalle pastiglie.

Il judder, quindi, è un problema che affligge l'intero impianto frenante, non solo il disco.



## APPENDICE 1: POSIZIONE ACCELEROMETRI

### Triangolo superiore

Numero	Posizione	Direzione	Set	Segnale
1	A	+Z	4	10
2	A	-X	4	11
3	A	+Y	4	12
4	B	+X	4	2
5	B	+Z	4	3
6	B	+Y	4	1
7	C	+Z	13	10
8	C	-Y	13	11
9	C	+X	13	12
10	D	+Z	4	8
11	D	-X	4	9
12	D	+Y	4	13
13	E	-X	4	4
14	E	+Z	4	6
15	E	+Y	4	7

### Triangolo inferiore

Numero	Posizione	Direzione	Set	Segnale
1	A	+Y	3	5
2	A	+Z	3	8
3	A	-X	3	9
4	B	+Y	7	1
5	B	+X	7	2

*Appendice 1*

<b>Numero</b>	<b>Posizione</b>	<b>Direzione</b>	<b>Set</b>	<b>Segnale</b>
6	B	+Z	7	3
7	C	+Y	3	4
8	C	+Z	3	6
9	C	+X	3	7
10	D	+Z	7	10
11	D	-Y	7	11
12	D	+X	7	12
13	E	+Z	3	10
14	E	+X	3	11
15	E	-Y	3	12
16	F	+Z	9	10
17	F	+X	9	11
18	F	+Y	9	12
19	G	-X	9	1
20	G	+Y	9	2
21	G	+Z	9	3
22	H	-X	7	4
23	H	+Z	7	6
24	H	+Y	7	7
25	I	-X	3	1
26	I	+Y	3	2
27	I	+Z	3	3

**Braccio laterale**

<b>Numero</b>	<b>Posizione</b>	<b>Direzione</b>	<b>Set</b>	<b>Segnale</b>
1	A	+Z	2	10
2	A	+Y	2	11
3	A	+X	2	12
4	B	-X	11	1

*Appendice I*

---

5	B	-Z	11	2
6	B	+Y	11	3
7	C	-X	2	5
8	C	+Y	2	8
9	C	+Z	2	9

**Pinza**

<b>Numero</b>	<b>Posizione</b>	<b>Direzione</b>	<b>Set</b>	<b>Segnale</b>
1	A	+X	1	1
2	A	+Z	1	2
3	A	+Y	1	3
4	B	+X	2	1
5	B	+Z	2	2
6	B	+Y	2	3
7	C	+Z	13	5
8	C	+X	13	8
9	C	+Y	13	9
10	D	-Z	2	4
11	D	+X	2	6
12	D	-Y	2	7
13	E	+Y	1	10
14	E	-X	1	11
15	E	-Z	1	12
16	F	+Y	1	5
17	F	+Z	1	8
18	F	-X	1	9
19	G	-Z	13	4
20	G	-X	13	6
21	G	+Y	13	7
22	H	+Y	1	4

*Appendice 1*

---

23	H	-X	1	6
24	H	+Z	1	7
25	I	-Z	13	1
26	I	+X	13	2
27	I	+Y	13	3

**Fusello**

<b>Numero</b>	<b>Posizione</b>	<b>Direzione</b>	<b>Set</b>	<b>Segnale</b>
1	A	+X	7	8
2	A	-Z	7	9
3	A	+Y	7	5
4	B	+Z	5	5
5	B	+X	5	8
6	B	+Y	5	9
7	C	+Y	8	1
8	C	-Z	8	2
9	C	+X	8	3
10	D	+Y	5	1
11	D	-Z	5	2
12	D	+X	5	3
13	E	+X	6	10
14	E	-Z	6	11
15	E	-Y	6	12
16	F	+X	5	6
17	F	-Y	5	7
18	F	-Z	5	4
19	G	-Z	8	5
20	G	+X	8	8
21	G	-Y	8	9
22	H	+Y	6	1

*Appendice 1*

---

23	H	-Z	6	2
24	H	+X	6	3
25	I	+X	5	10
26	I	-Y	5	11
27	I	+Z	5	12
28	L	-Z	8	4
29	L	+X	8	6
30	L	-Y	8	7
31	M	+X	8	10
32	M	-Y	8	11
33	M	-Z	8	12





## **Bibliografia**

- [1] Devoto Giacomo, Oli Giancarlo, *Devoto Oli Compatto*, LeMonnier, 1999.
- [2] H Jacobsson, *Aspect of disk brake judder*, Machine and Vehicle Systems, Chalmers University of Technology, Goteborg, 2003.
- [3] Manuale di riparazione per Ford Scorpio, [www.fordscorpio.co.uk/manual/brake/BrakeDisk.pdf](http://www.fordscorpio.co.uk/manual/brake/BrakeDisk.pdf), 1994.
- [4] Sito internet PCB Piezotronics, [www.pcb.com](http://www.pcb.com).
- [5] Sito internet Raytech, [www.raytek.com](http://www.raytek.com).
- [6] Ernest O. Doebelin, *Strumenti e metodi di misura*, McGraw-Hill, 2008.
- [7] Sito internet DSEurope, [www.dseurope.com](http://www.dseurope.com).
- [8] Sito internet HBM, [www.hbm.com](http://www.hbm.com).
- [9] Dispense del corso di Teoria e tecnica dei veicoli terrestri del prof. Massimiliano Gobbi.