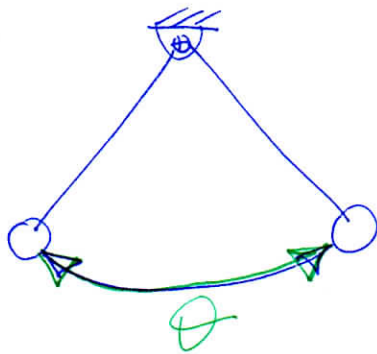


Introduzione alla Meccanica delle Vibrazioni

La **VIBRAZIONE** è una oscillazione di un sistema meccanico intorno ad un punto di equilibrio statico.

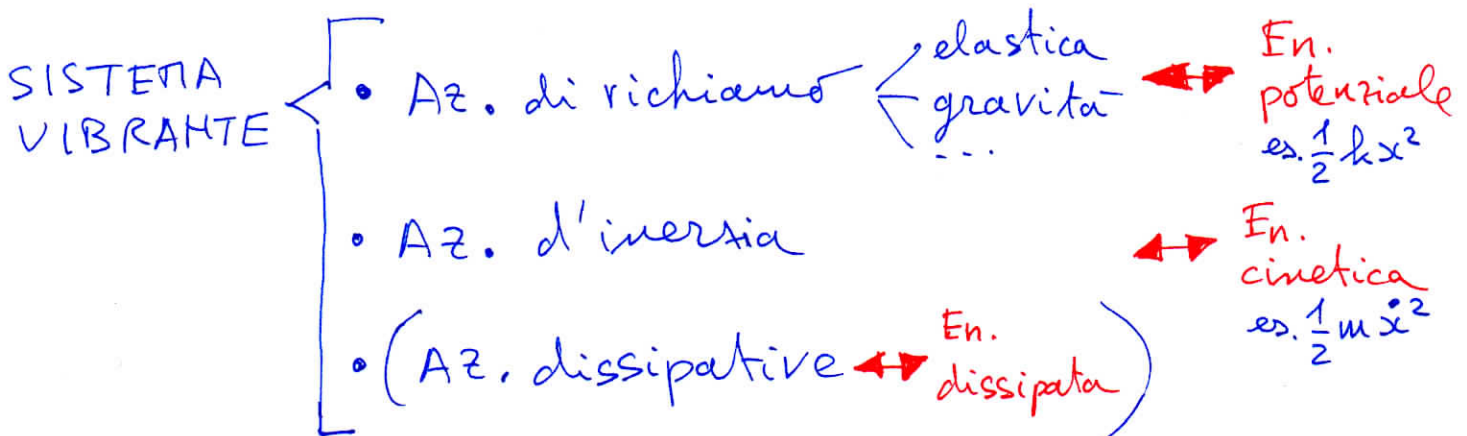
La vibrazione può essere **periodica** (che si ripete uguale a sé stessa nel tempo; es. pendolo ideale, lavatrice in centrifuga a velocità costante) oppure **casuale** (es. veicolo sulla strada accidentata).



$$\omega_n \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = \sqrt{\frac{k}{m}}$$


$$f_n \left[\text{Hz} \right] = \frac{1}{2\pi} \omega_n$$

↑
cicli
s



ECCITAZIONE


di breve durata
(condiz. iniziali $\neq 0$)

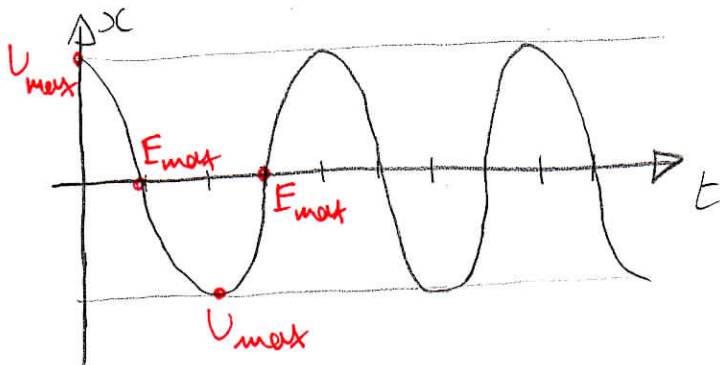
- SPOSTAMENTO INIZ.
- VELOCITA' INIZ.
- IMPULSO di FORZA (URTO)
- FORZA A GRADINO 



VIBR. LIBERE

alla pulsazione ω_n

En. potenziale \leftrightarrow En. cinetica

 (En. dissipata)



perchiera nel tempo

- FORZA VARIABILE
- SPOSTAM. VARIABILE



VIBR. FORZATE

Es: Eccitazione armonica a puls. Ω

\downarrow
 Risposta armonica a puls. Ω
 con ampiezza dipendente da

- amp. eccitazione

- $\frac{\Omega}{\omega_n}$

$\frac{\Omega}{\omega_n} = 1 \leftrightarrow$ RISONANZA

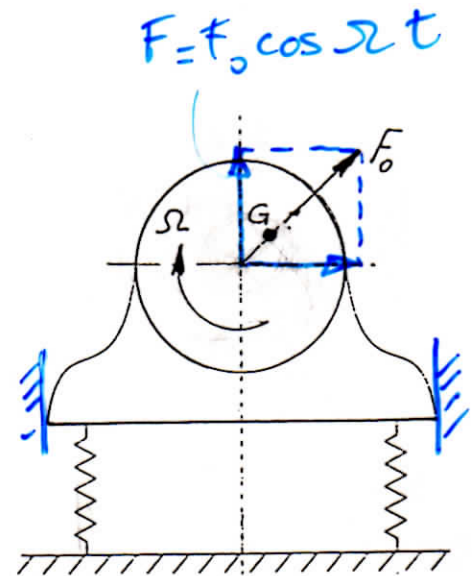
Eccitazione compie
 LAVORO
 \rightarrow introduce ENERGIA

ESEMPI

Rotore

Motore squilibrato

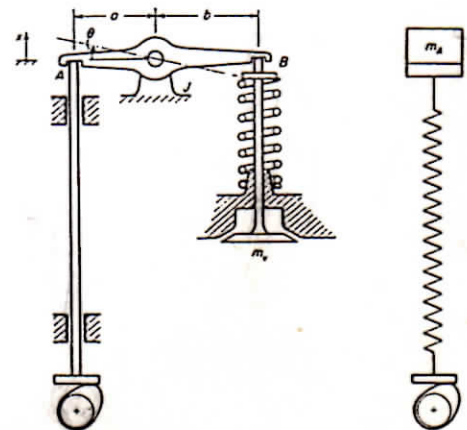
- **Inerzia: massa**
(massa del motore).
- **Forza di richiamo: elastica**
(sospensioni).
- **Eccitazione: forza centrifuga**
(forza rotante $me\Omega^2$).



Macchina alternativa: a un logo

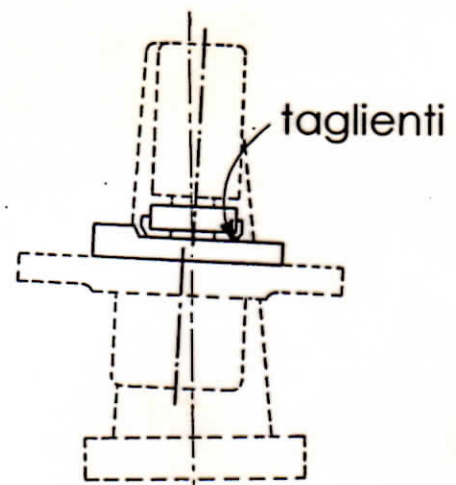
Camma e punteria (membri rigidi)

- **Inerzia: masse in movimento**
(valvola, bilanciere, stelo, ...).
- **Forza di richiamo: elastica**
(molla).
- **Eccitazione: spostamento**
(contorno della camma).



Fresatrice

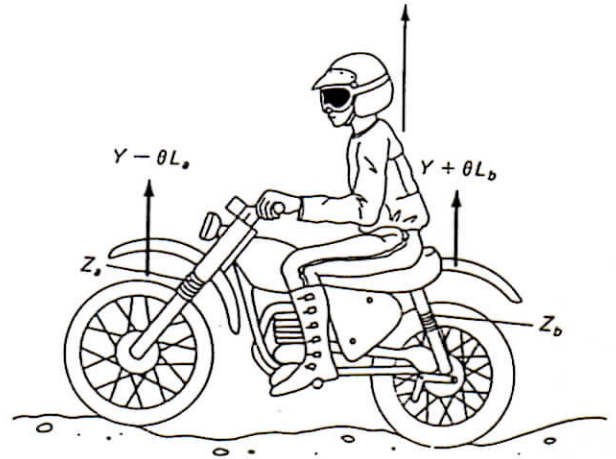
- **Inerzia: distribuita**
(scatole, motori, ecc.).
- **Forza di richiamo: elastica**
(rigidezza della struttura).
- **Eccitazione: forza di taglio**
(la forza di taglio non è costante).



ESEMPI

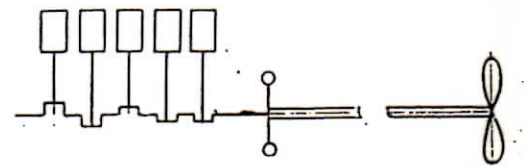
Motocicletta

- **Inerzia: massa**
(telaio, motore, motociclista).
- **Forza di richiamo: elastica**
(sospensioni).
- **Eccitazione: spostamento**
(irregolarità del fondo stradale).



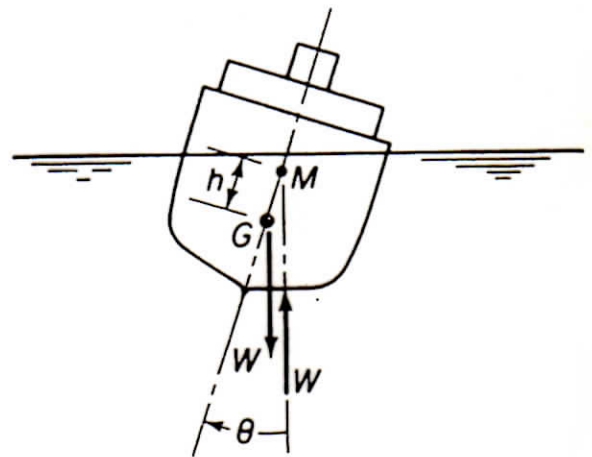
Albero di trasmissione *(motore marino)*

- **Inerzia: momento d'inerzia**
(elica ecc.).
- **Azione di richiamo: elastica**
(torsione dell'albero).
- **Eccitazione: momento motore**
(momento con andamento periodico).



Nave

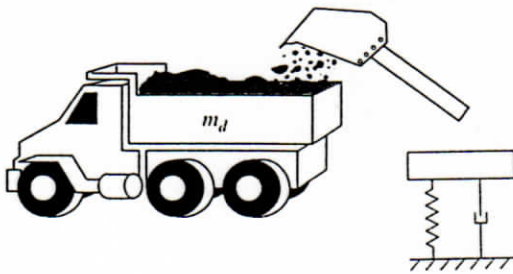
- **Inerzia: momento d'inerzia**
(momento d'inerzia della nave).
- **Forza di richiamo: momento**
(coppia peso-spinta idrostatica).
- **Eccitazione: onde**
(azione del moto ondoso).



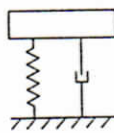
VIBRAZIONI LIBERE E FORZATE

- Se l'eccitazione è un disturbo di breve durata, vengono eccitate delle vibrazioni libere:

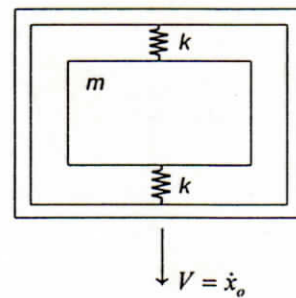
- urto,
- condizioni iniziali non tutte nulle,
-



Forza a gradino.



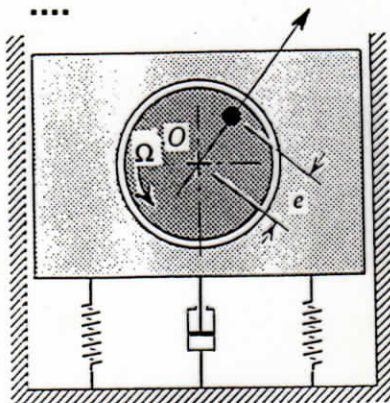
Eccitazione:



Velocità iniziale.

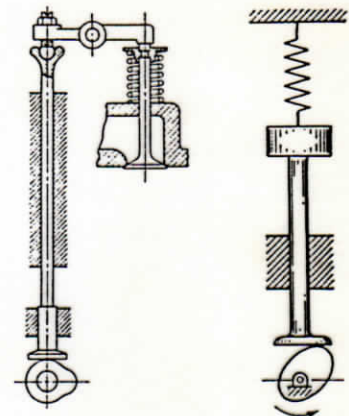
- Se l'eccitazione perdura nel tempo, vengono eccitate delle vibrazioni forzate:

- rotore squilibrato,
- camma e cedente,
-



Forza centrifuga.

Eccitazione:



Legge di moto.

Effetti delle vibrazioni > Scopi dello studio

A volte i moti vibratorii sono utilizzati per conseguire determinati **scopi positivi** (strumenti musicali, altoparlanti, convogliatori vibranti [*filmati web 02*], processi di finitura vibrazionale con polveri abrasive).

Nella maggior parte dei casi lo studio delle vibrazioni degli organi di macchine ha importanza per affrontare gli **effetti negativi** delle vibrazioni sul funzionamento delle macchine e sulla vita degli organi meccanici:

- Sollecitazioni aggiuntive rispetto a quelle statiche > guasti, rotture [*filmati web 02*: flutter, ponti]
- Cattiva qualità e bassa precisione delle lavorazioni (es. macchine automatiche, macchine utensili)
- Basso confort vibro-acustico (es. veicoli, elettrodomestici)
- Patologie provocate da elevata esposizione alle vibrazioni dei lavoratori (es. martello pneumatico)

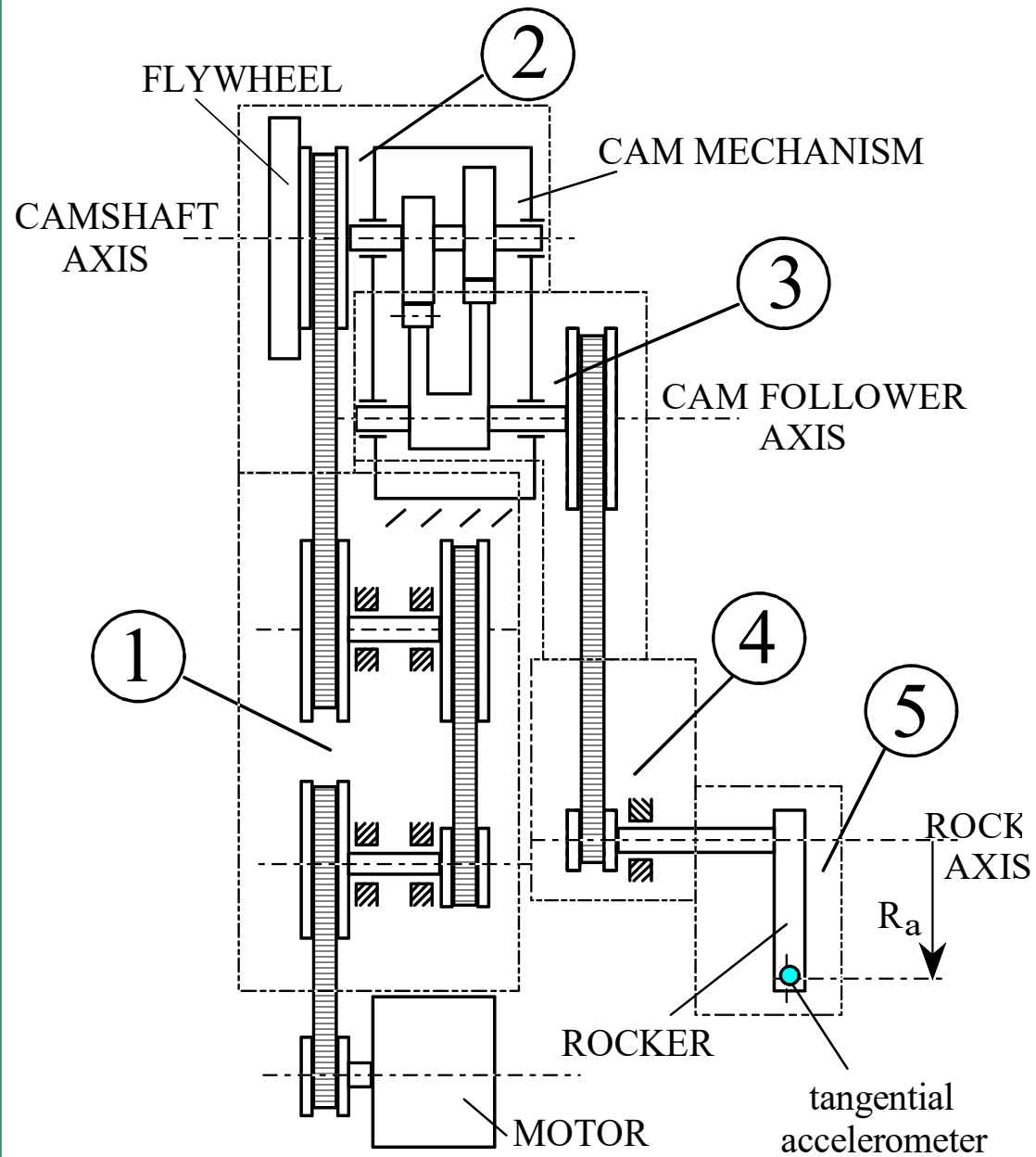
I fenomeni sonori e vibratorii sono strettamente legati: i suoni sono onde di pressione generate da strutture vibranti.

Inoltre, la modifica dei parametri vibrazionali di una macchina può essere impiegato come 'sintomo dello stato di salute'; le vibrazioni sono quindi tra i parametri maggiormente impiegati per il **monitoraggio** e la **diagnostica** dei guasti e dell'usura, ai fini di implementare procedure di **manutenzione predittiva** (su condizione).

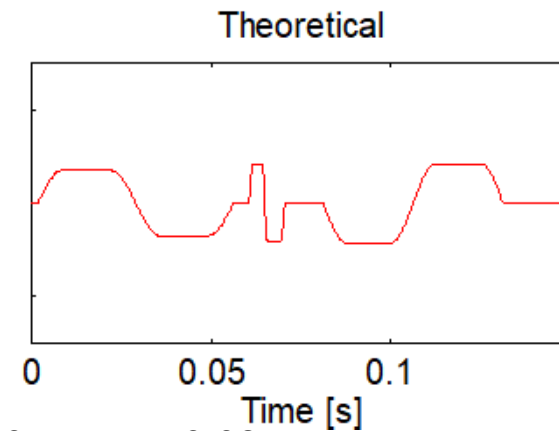
➤ Perché studiare il comportamento dinamico di un meccanismo ?

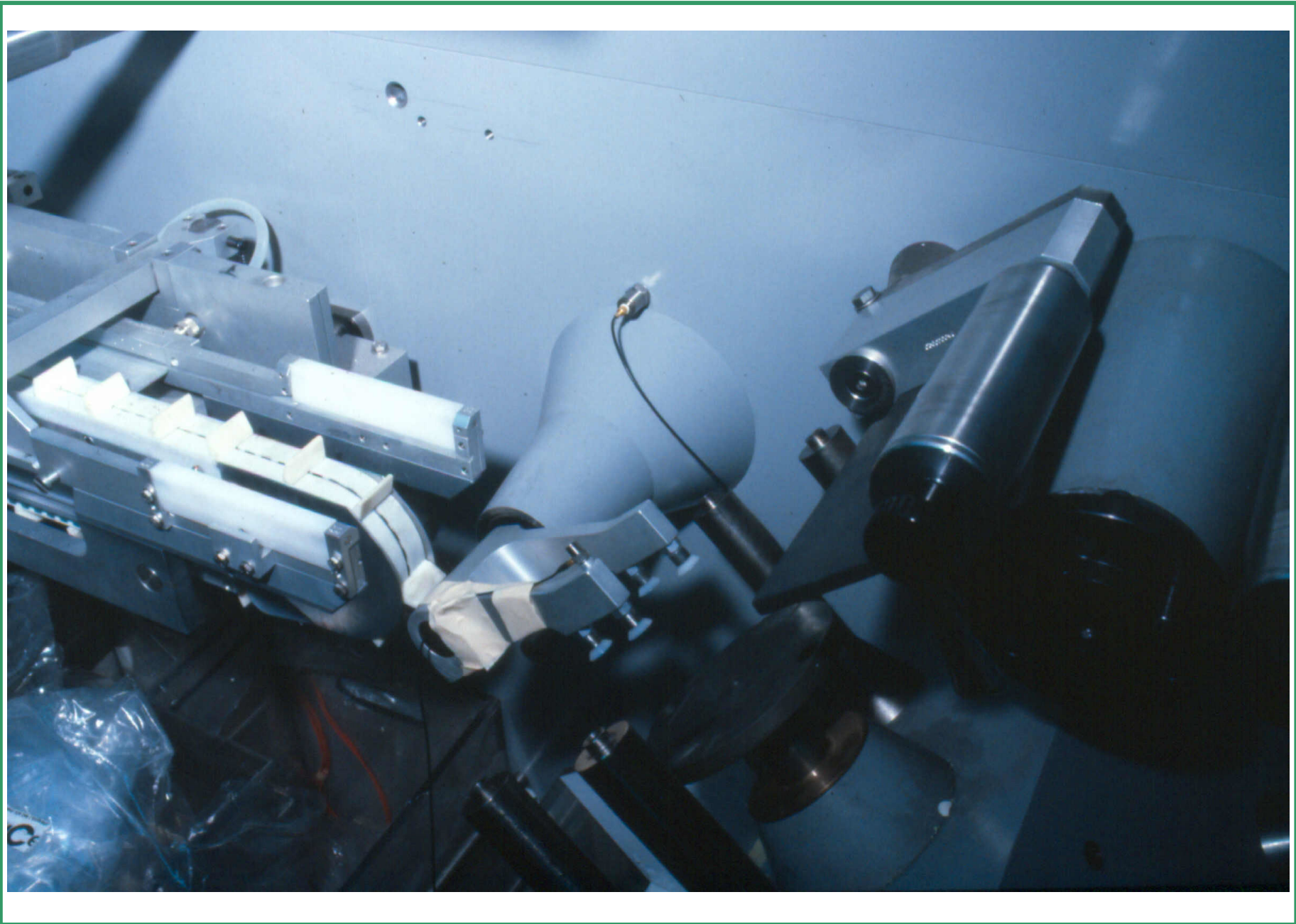
- ❑ Un meccanismo, in linea teorica, deve seguire una determinata **legge di moto**.
- ❑ Nella realtà esiste uno **scostamento tra il moto effettivo e la legge di moto teorica** del cedente.
- ❑ Il meccanismo **vibra** con oscillazioni che si sovrappongono al moto di corpo rigido.
- ❑ Possono aversi **picchi di accelerazione** indesiderati ai quali sono associate elevate **forze di inerzia** e fenomeni dinamici che:
 - producono **elevate sollecitazioni** e possibili **guasti**
 - peggiorano la **qualità** del prodotto
 - producono **vibrazioni e rumore**

➤ Esempio

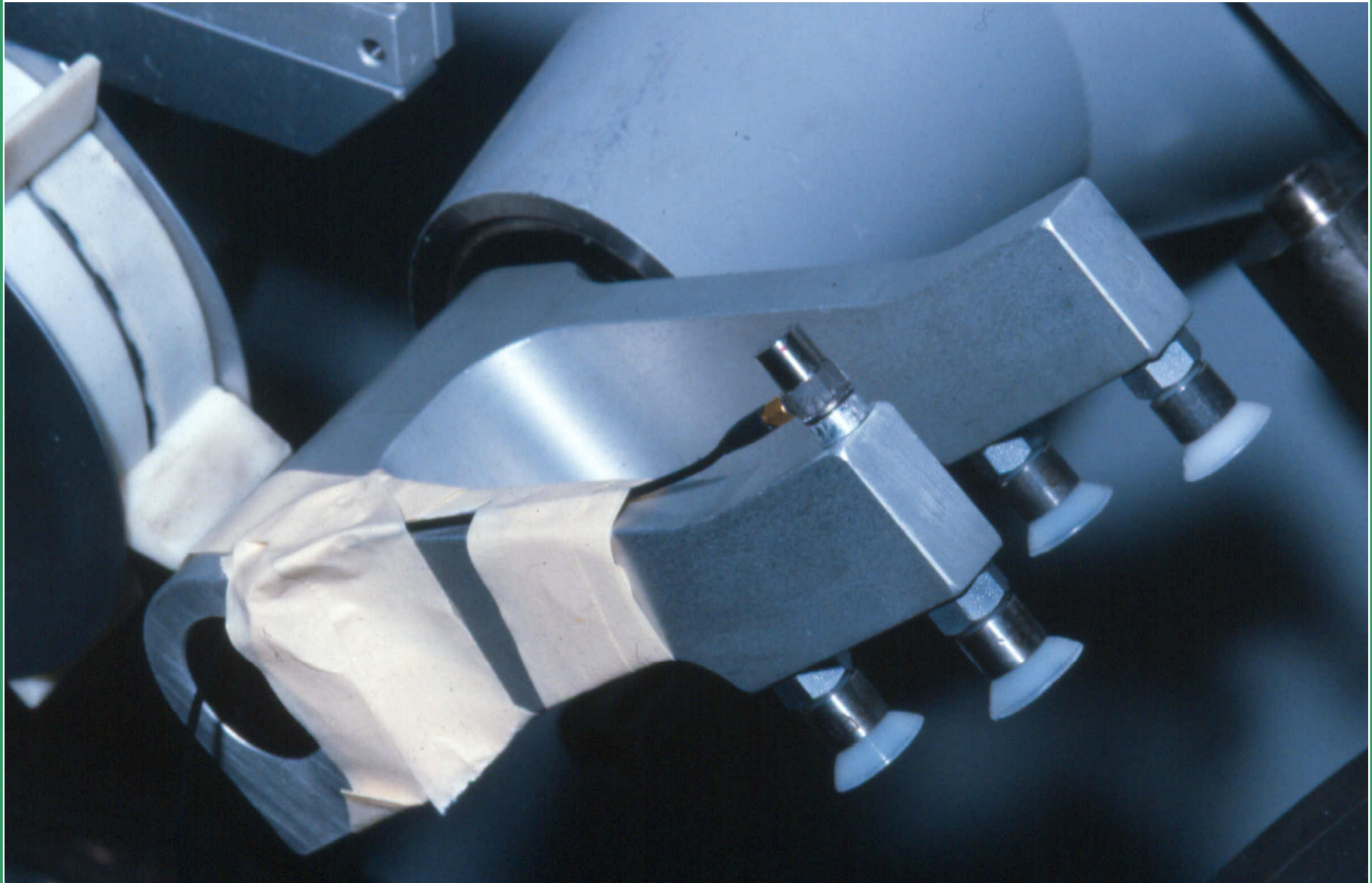


Accelerazione teorica





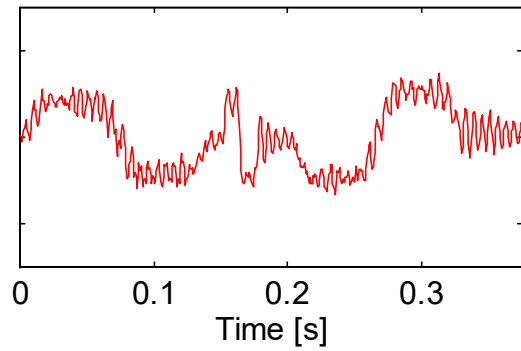
Modellazione a Parametri Concentrati di Meccanismi



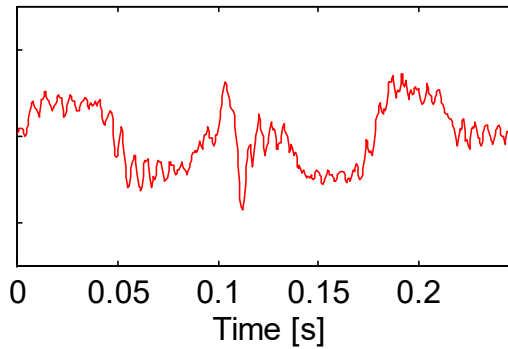
Modellazione a Parametri Concentrati di Meccanismi

Rilievi sperimentali a diverse velocità di funzionamento

Experimental - 160 rpm

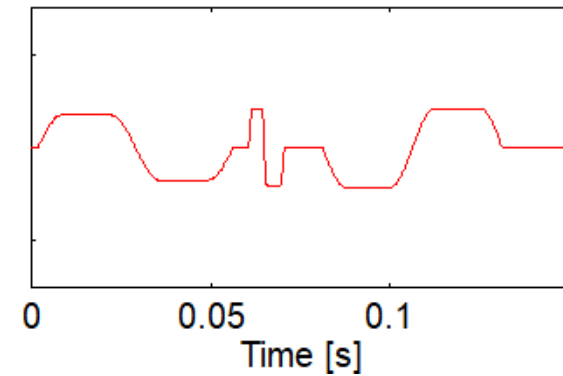


Experimental - 240 rpm

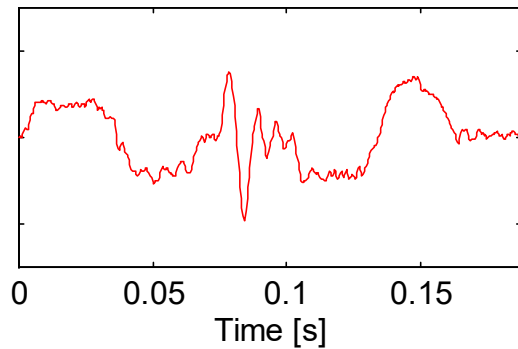


Accelerazione teorica

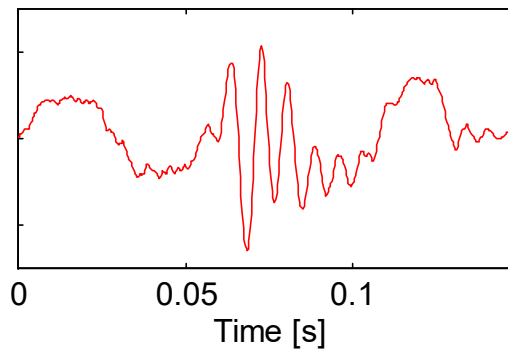
Theoretical



Experimental - 320 rpm



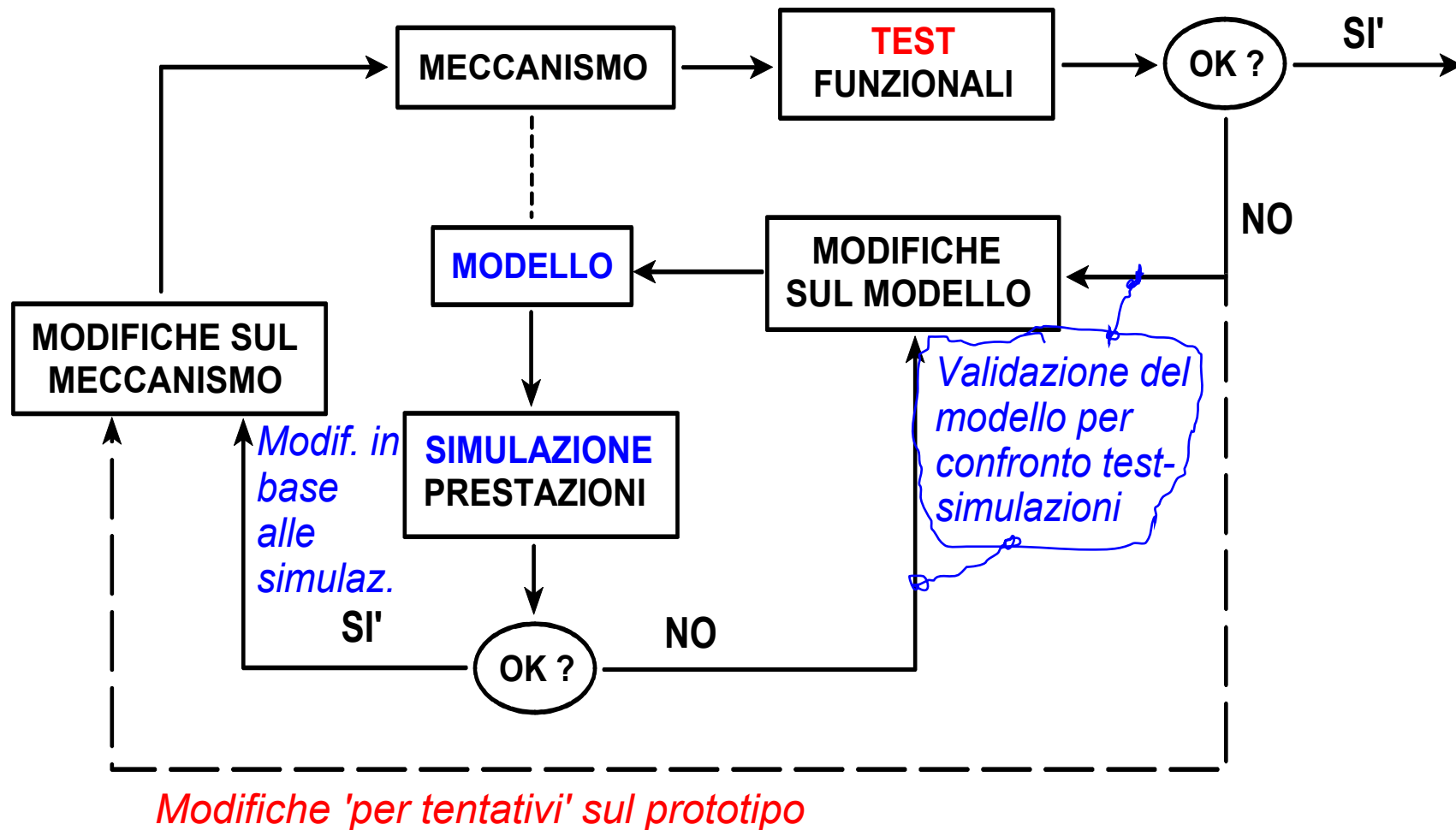
Experimental - 400 rpm



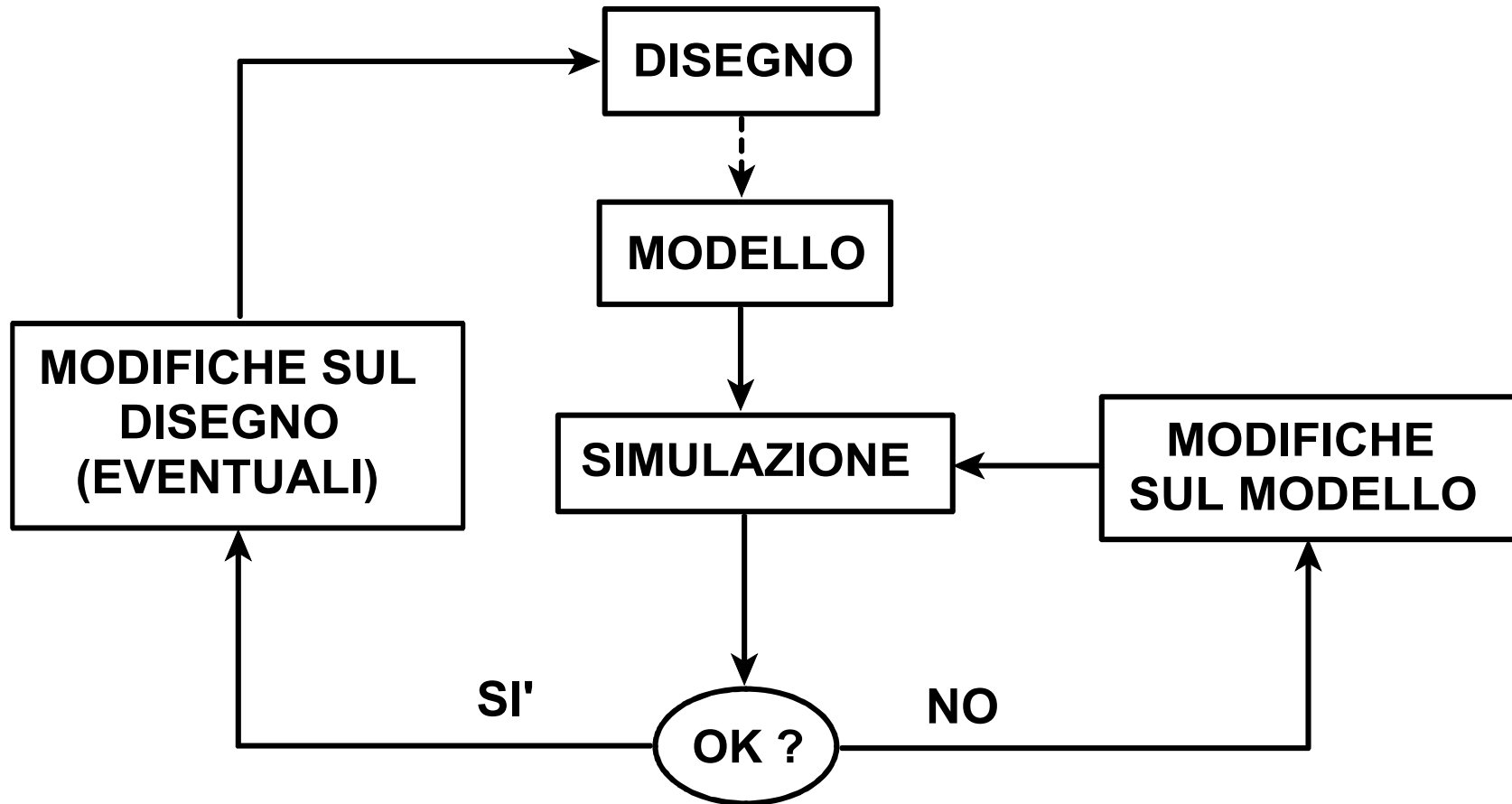
➤ Osservazioni

- ❑ I fenomeni dinamici risultano **più intensi con l'aumentare della velocità della macchina** e possono risultare inaccettabili per macchine di elevate prestazioni (velocità, precisione).
- ❑ Occorre **individuare le cause** che danno origine agli effetti dinamici indesiderati, al fine di ridurli entro limiti accettabili per le specifiche funzionali della macchina.
- ❑ A questo scopo, è particolarmente utile l'impiego di **modelli** atti a simulare adeguatamente l'effettivo comportamento dinamico dei meccanismi; infatti risulta possibile:
 - individuare i **parametri costruttivi critici** per il comportamento dinamico
 - verificare gli **effetti della modifica** di tali parametri a livello di simulazione

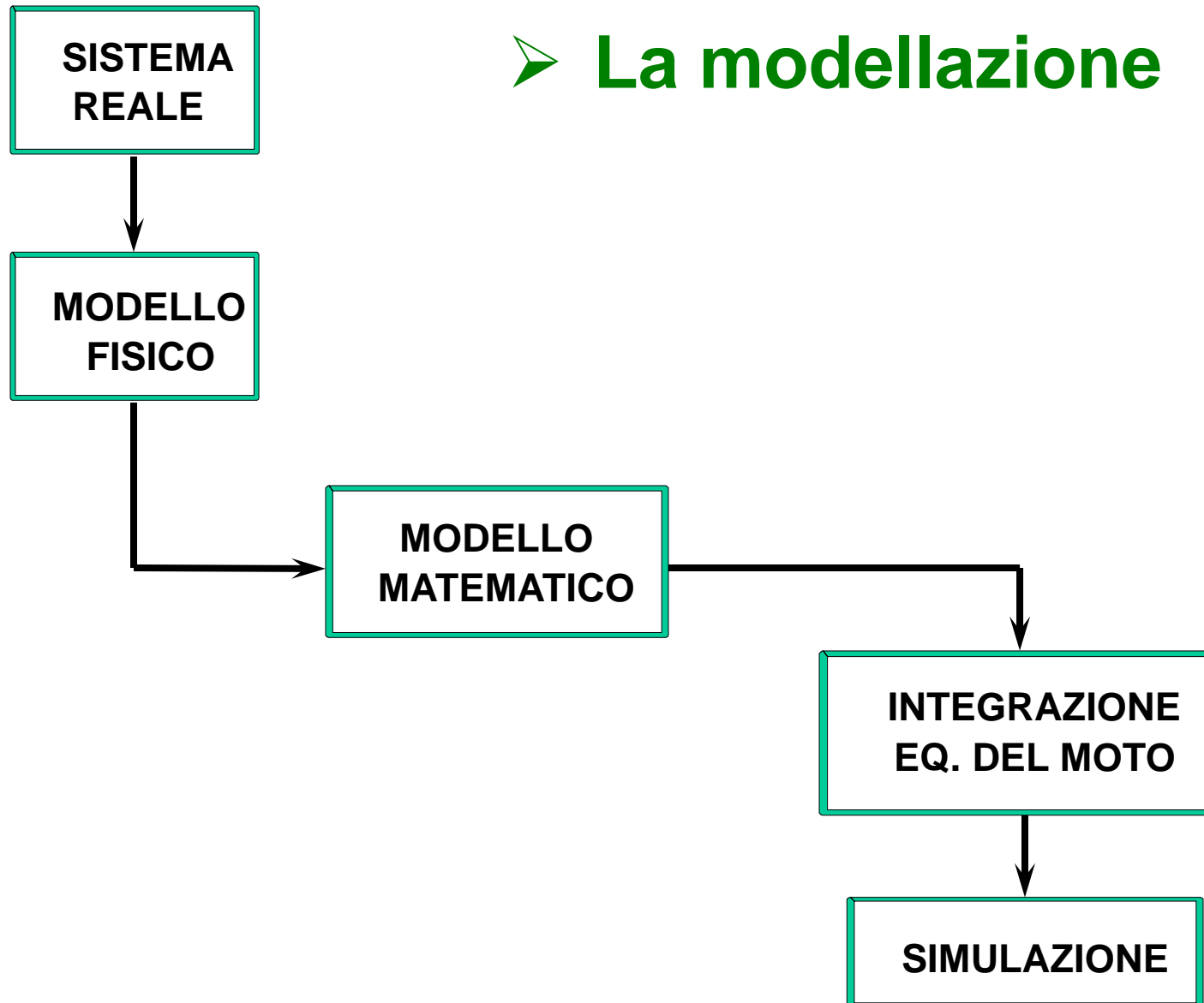
➤ Metodi di analisi: **sperimentale** vs **simulazione**



➤ Impiego del modello: in fase di progetto



➤ La modellazione



Modellazione

Nello studio delle vibrazioni, i sistemi meccanici vengono sostituiti da modelli che si ottengono dal **sistema reale** con ipotesi semplificative (**modello fisico**).

Questo deve mantenere gli aspetti essenziali del sistema meccanico. Il modello fisico può essere lineare o non lineare. A volte il modello fisico può essere inizialmente semplificato per ottenere in tempi rapidi una soluzione, poi può essere migliorato per includere più dettagli (esempio motociclo).

Poi occorre scrivere le eq. che rappresentano il modello fisico (**modello matematico**). La scrittura di tali equazioni avviene applicando i principi della dinamica: il principio di D'Alembert, oppure dei lavori virtuali, oppure di Newton, le equazioni di Lagrange, etc. Solo in casi semplici si ottiene la soluzione in forma chiusa. Il più delle volte si ottiene per via numerica.

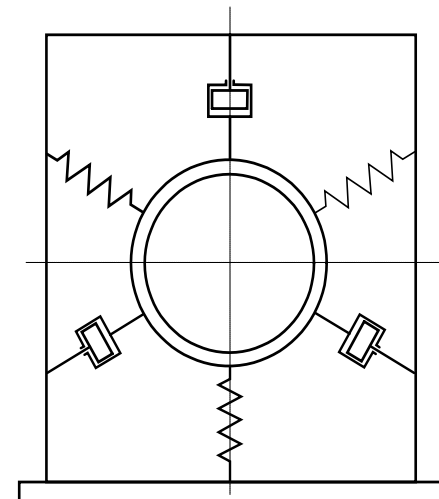
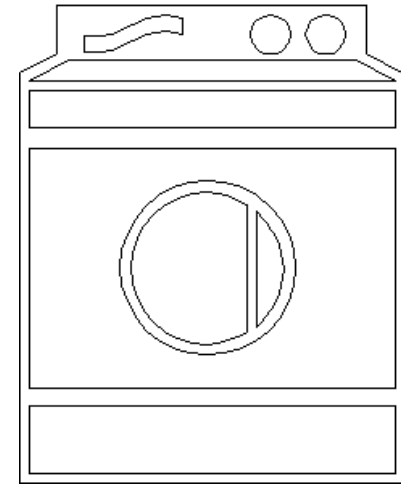
Risolvendo il modello matematico si ha la stima secondo il modello fatto del comportamento vibratorio del sistema reale (**simulazione**).

➤ Il modello fisico

- ❑ Per studiare un sistema meccanico se ne deve formulare un adeguato **MODELLO FISICO**

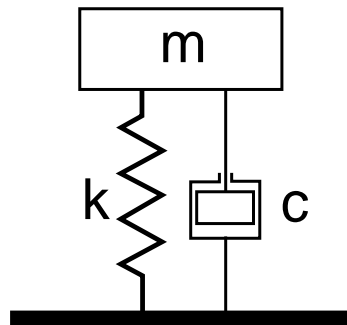
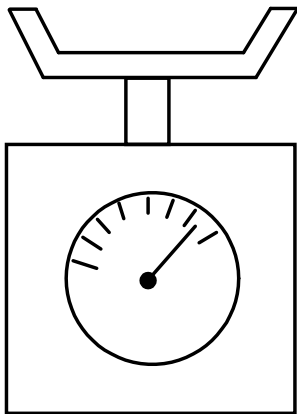
- ❑ Il **MODELLO FISICO** è un sistema immaginario ritenuto equivalente al sistema reale
 - nell'ambito di una prefissata **approssimazione**

 - rispetto alle caratteristiche che riguardano lo studio a cui si è interessati.



➤ Il modello matematico

- ❑ Formulato il modello fisico, si deduce da esso il **MODELLO MATEMATICO**
 - le **equazioni** che descrivono il modello fisico stesso e che, risolte, permettono di analizzare il suo comportamento.



$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F$$

➤ Il 'dilemma' della modellazione

- ❑ **Cosa includere** nel modello fisico per renderlo sufficientemente preciso ?
- ❑ Come mantenerlo **semplice** per rendere possibile e ragionevolmente **rapida** la soluzione del corrispondente modello matematico con gli strumenti di calcolo a disposizione ?

Quale è il “MIGLIOR MODELLO” ?

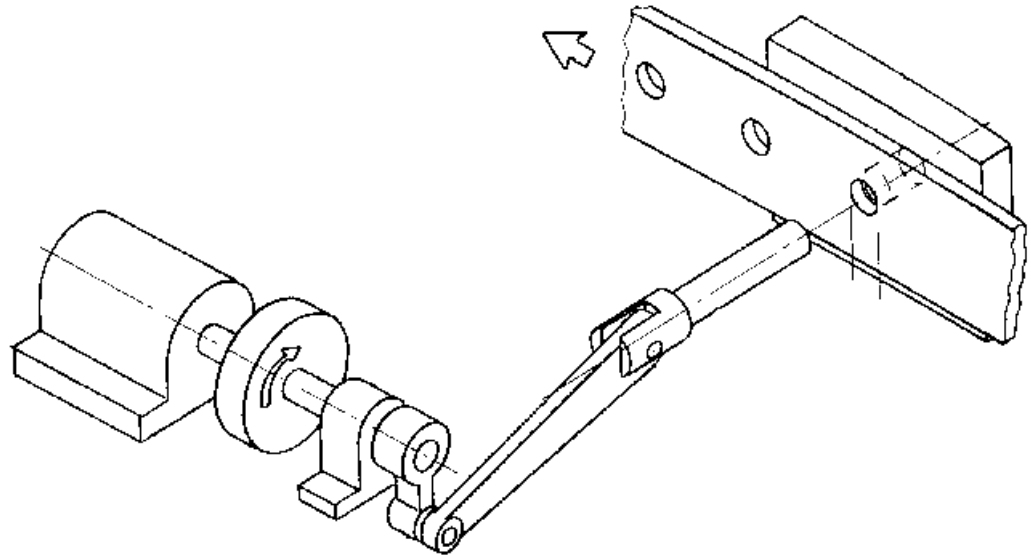
Il miglior modello è sempre il più semplice modello che risponde agli scopi e ai criteri che lo studio si propone.

*Il passaggio dal sistema reale al modello fisico comporta necessariamente delle **approssimazioni consapevolmente accettate**, che consistono principalmente nel trascurare tutto quanto provoca effetti piccoli sul comportamento del sistema.*

➤ Modellare i meccanismi

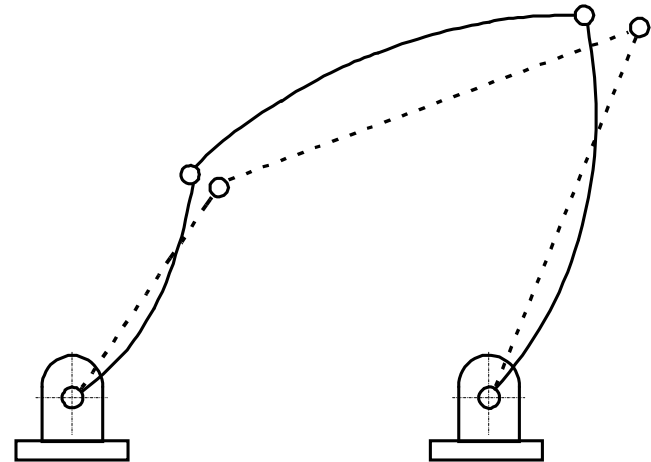
- ❑ Il modello fisico per lo studio del comportamento vibratorio di un meccanismo è necessariamente più complesso di quello impiegato per l'**analisi cinematica** o per l'**analisi dinamica di corpo rigido**, nelle quali si fanno le seguenti **approssimazioni**:
 - membri perfettamente rigidi
 - assenza di gioco nelle coppie cinematiche

- ❑ I meccanismi sono composti da **membri elastici** che si deformano sotto l'azione delle forze trasmesse e delle forze di inerzia.



➤ Modellare i meccanismi

- ❑ **Trascurare** tale deformabilità (cedevolezza) elastica è **possibile solo se**
 - le **forze** trasmesse sono **piccole**
 - **velocità ed accelerazioni** sono **ridotte**.

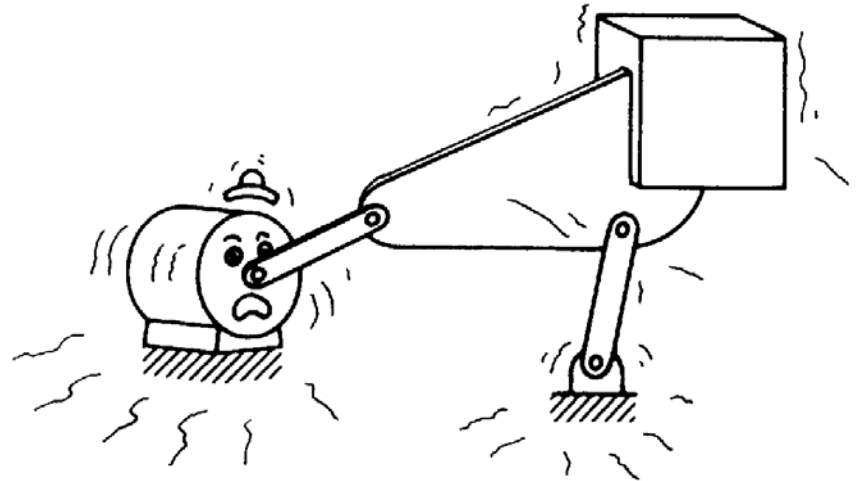
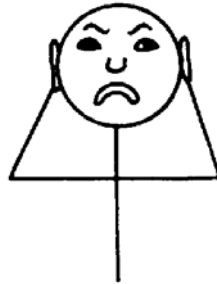
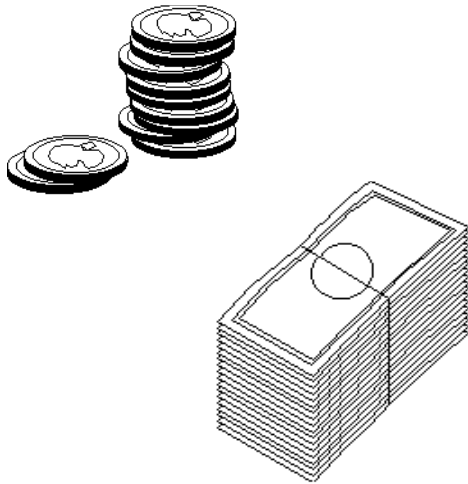
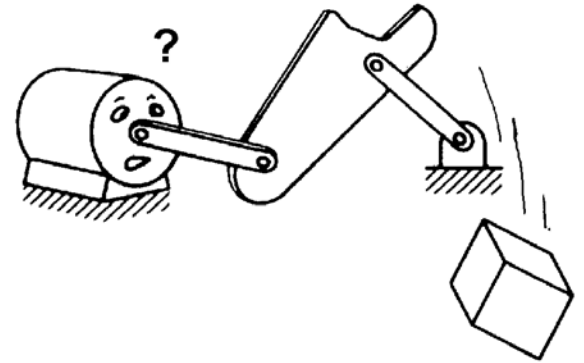


- ❑ Un meccanismo progettato “cinematicamente” può non essere in grado di svolgere correttamente la propria funzione se fatto operare ad alte velocità.

➤ Modellare i meccanismi

□ Nel campo specifico delle **macchine automatiche** sono sempre più pressanti le seguenti **esigenze**:

- operare ad **alta velocità**
- **manipolare accuratamente** il prodotto
- minimizzare il livello di **vibrazioni e rumore**



➤ Modellare i meccanismi

- ❑ Per macchine automatiche di **elevate prestazioni**, l'attenzione va rivolta all'analisi **CINETO-ELASTO-DINAMICA** dei meccanismi, che permette di simulare adeguatamente l'effettivo **comportamento dinamico e vibratorio**.

- ❑ In tale analisi si tiene sempre conto di:
 - **cedevolezza** elastica dei membri
 - **proprietà inerziali** dei membri

- ❑ Diverse indagini hanno inoltre mostrato che il comportamento vibratorio è influenzato in modo determinante da:
 - **giochi** nelle coppie cinematiche
 - **attriti**
 - **variabilità dei parametri** con la configurazione del meccanismo

Gradi di libertà

Il numero di gradi di libertà (gdl) è il numero minimo di coordinate libere indipendenti richiesto per determinare univocamente la posizione di tutti gli elementi del sistema per ogni istante di tempo, considerando non solo i moti di corpo rigido dei componenti, ma anche la loro *deformazione elastica*.

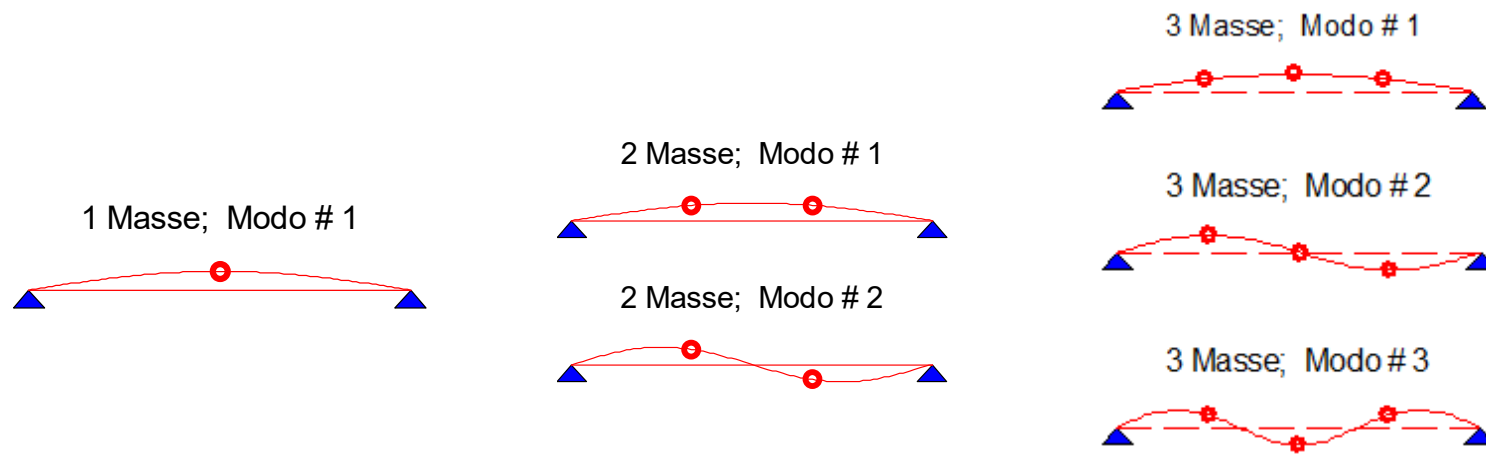
Gli organi di macchine sono sistemi continui con massa, elasticità ed elementi dissipativi distribuiti: sono quindi capaci di vibrare con **infiniti gradi di libertà**. Lo studio dei moti vibratorii per **sistemi continui** è possibile, ma già per sistemi di geometria semplice è molto complicato.

>>> **Modelli con # finito di gdl**

Il numero di gdl del modello necessari per ottenere una accurata simulazione cresce all'aumentare della frequenza massima dei fenomeni di interesse da simulare (campo in frequenza dell'analisi).

➤ Gradi di libertà ed elementi inerziali

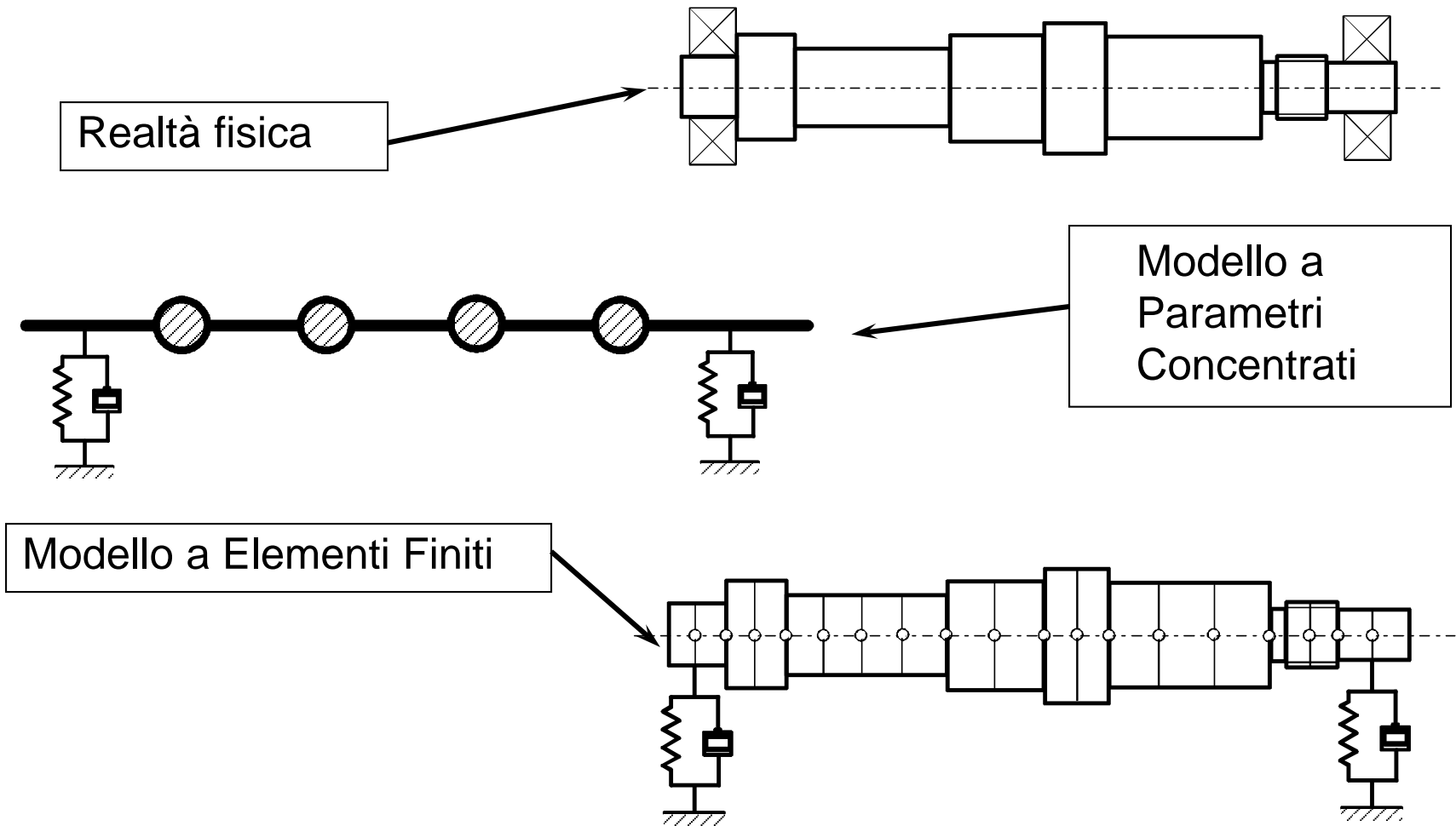
- ❑ Ad ogni **elemento inerziale** (massa o momento di inerzia) è associata un **coordinata** (spostamento lineare od angolare), che corrisponde ad uno dei **g.d.l.** del modello.
- ❑ Il **numero di elementi inerziali** necessari per modellare un membro cresce con il numero di **modi di vibrare** del membro stesso che si vogliono mettere in conto.



Tipologia di modelli

- Modelli continui - *infiniti gdl*
 - Singoli componenti
 - Geometria semplice
 - Solo lineari
- Modelli a parametri concentrati (lumped parameter, LP) - *# gdl medio-basso*
 - Meccanismi con più membri e coppie cinematiche
 - Significato fisico chiaro ed intuitivo dei g.d.l.: facilità di modellazione
 - Non-linearità
- Modelli a elementi finiti (FEM) - *# gdl elevato*
 - Singoli componenti anche di geometria complessa
 - NO non-linearità
- Modelli Multi-Body – da ‘assemblaggio’ modelli FEM e LP - *# gdl elevato*
 - sw dedicati
 - Meccanismi con più membri e coppie cinematiche
 - Non-linearità

➤ Metodologie di modellazione



➤ La modellazione a parametri concentrati

- ❑ Il modello fisico è costituito da elementi, ciascuno dei quali rappresenta una sola proprietà meccanica (elementi inerziali, rigidità, elementi dissipativi, giochi, ...).

- ❑ *Criteri generali*
 - **Limitare il numero di parametri** a quello essenziale affinché il modello riproduca il comportamento vibratorio del meccanismo entro il campo di frequenza di interesse
 - Minimizzare l'**impegno** richiesto per la valutazione dei parametri
 - Rendere facilmente possibili **modifiche** nel modello a seguito di modifiche del meccanismo
 - Rendere i **risultati** facilmente interpretabili

➤ **Il Modello a Parametri Concentrati**

- ❑ E' caratterizzato da **numero ridotto di g.d.l.** (i soli g.d.l. essenziali)
- ❑ Ha un **significato fisico chiaro ed intuitivo** dei g.d.l.
- ❑ E' facile modellare le **non linearità**
- ❑ E' facile **modellare meccanismi (più membri connessi)** e includere nel modello le caratteristiche di componenti elettromeccanici e gli algoritmi di controllo, ottenendo un modello dinamico omogeneo
- ❑ E' una metodologia 'classica' e molto impiegata per l'analisi cinetoelastodinamica di meccanismi a camma e di meccanismi per macchine automatiche

➤ Gradi di libertà ed elementi inerziali

- ❑ Di solito si considera il primo modo di vibrare di ciascun membro, al più anche il secondo.
 - ❑ Teoricamente i risultati possono essere migliorati aggiungendo ulteriori gradi di libertà.
 - ❑ Per i campi di frequenze solitamente considerati, si ottiene generalmente una adeguata modellazione di un meccanismo con l'impiego di un numero relativamente basso di g.d.l.
 - ❑ Gli elementi inerziali devono possedere la stessa energia cinetica del sistema reale, sia per il moto rigido, che per i moti vibratorii ad esso sovrapposti.
- ❑ Tra due masse sono sempre interposti:
 - **Rigidezze**
 - **Elementi dissipativi** (smorzamenti)
 - **Giochi** (eventualmente)

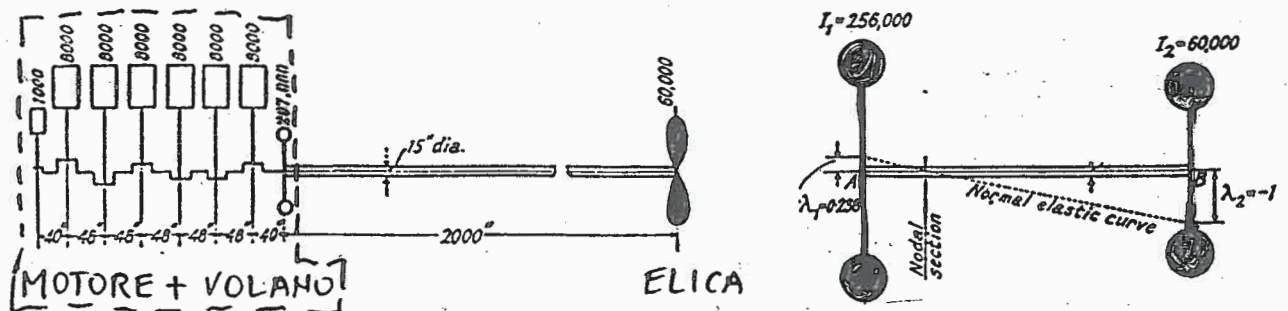
LA MODELLAZIONE A PARAMETRI CONCENTRATI

Il modello fisico è costituito da elementi, ciascuno dei quali rappresenta una sola proprietà meccanica (elementi inerziali, rigidità, elementi dissipativi, giochi, ...).

Ad ogni elemento inerziale (massa o momento di inerzia) è associata un coordinata (spostamento lineare od angolare), che corrisponde ad uno dei g.d.l. del modello.

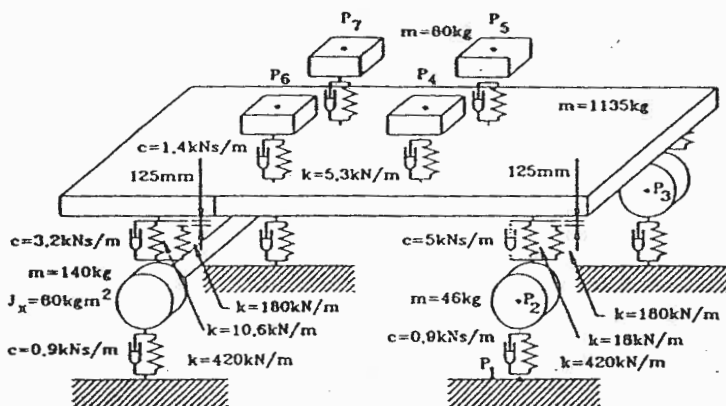
Nel caso in cui il sistema meccanico sia costituito da organi di grande rigidità ed altri molto deformabili (es. molle), il modello a parametri concentrati si ottiene semplicemente considerando i primi come infinitamente rigidi e concentrando la deformabilità del sistema nei secondi (di cui si trascura la massa).

Esempio: Albero di trasmissione navale - 2 g.d.l.

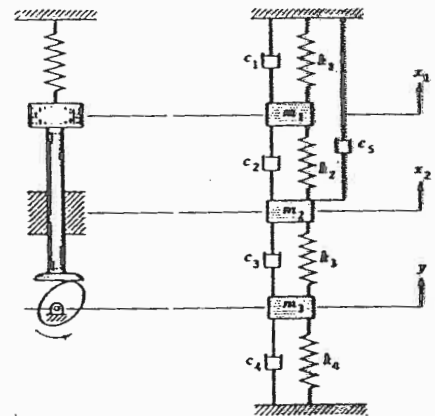


Il numero di gradi di libertà di un sistema è pari al numero delle coordinate indipendenti necessarie per individuarne la configurazione.

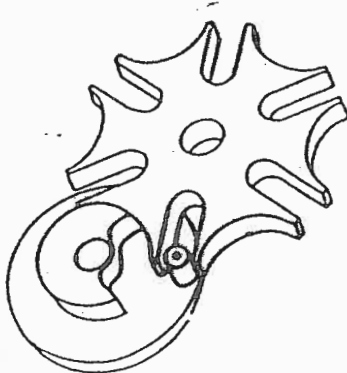
- Esempi di sistemi a molti gradi di libertà (*mgdl*, o *mdof*):



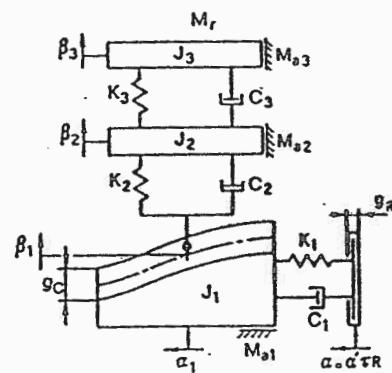
Modello di autovettura a 11 gdl



Modello di punteria a 3 gdl



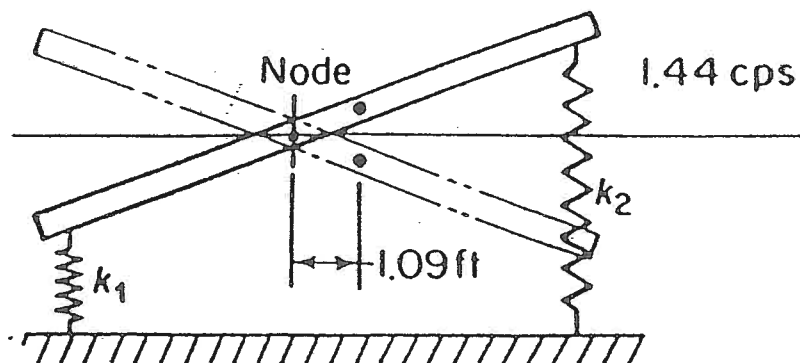
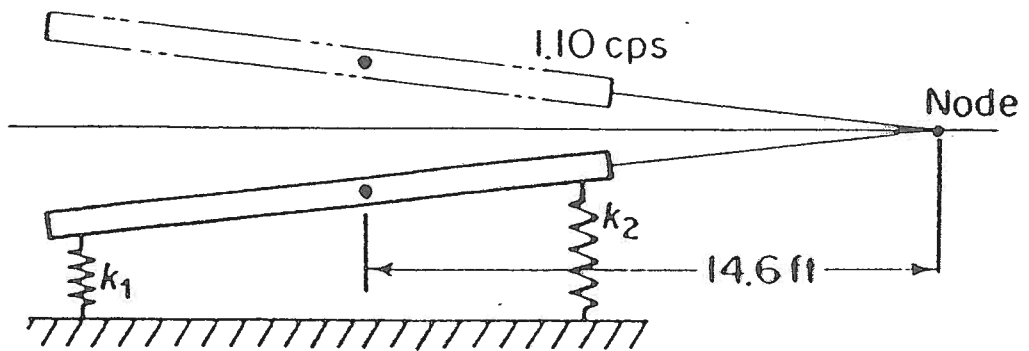
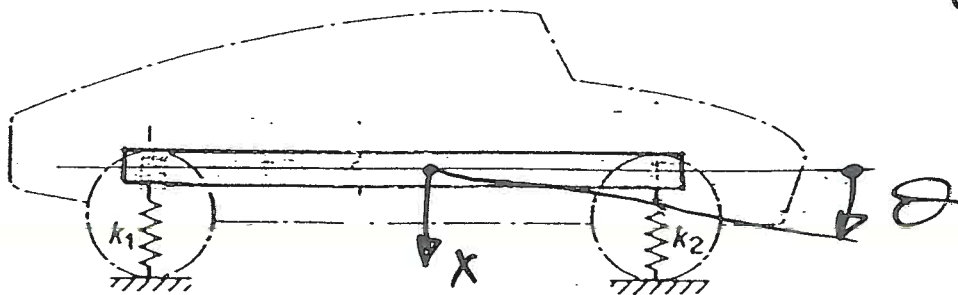
Modello di un meccanismo a croce di Malta a 3 gdl.

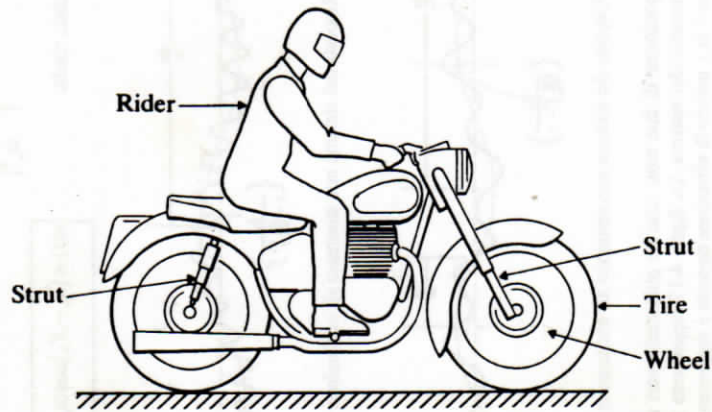


ESEMPIO

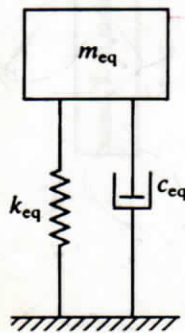
Modi propri di vibrare di un autoveicolo.

*Modello
a 2 gdl*

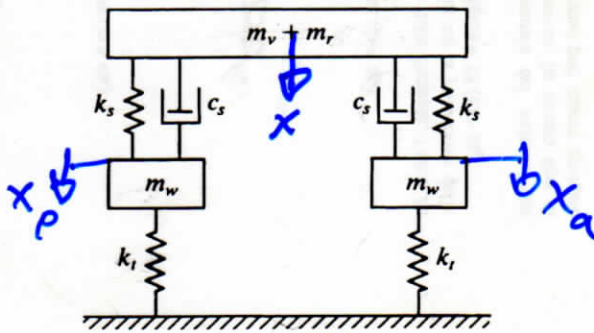




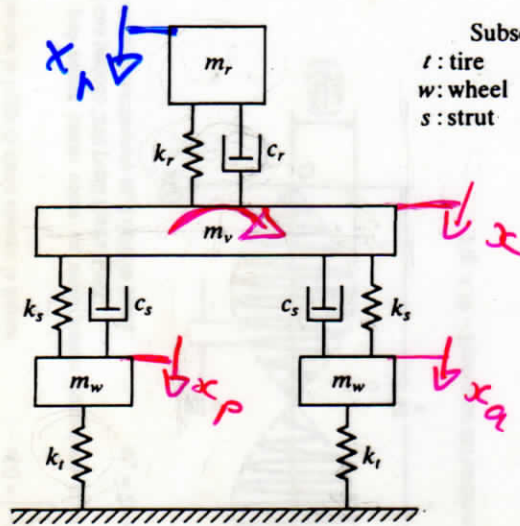
(a)



(b)

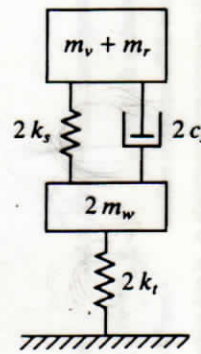


(c)



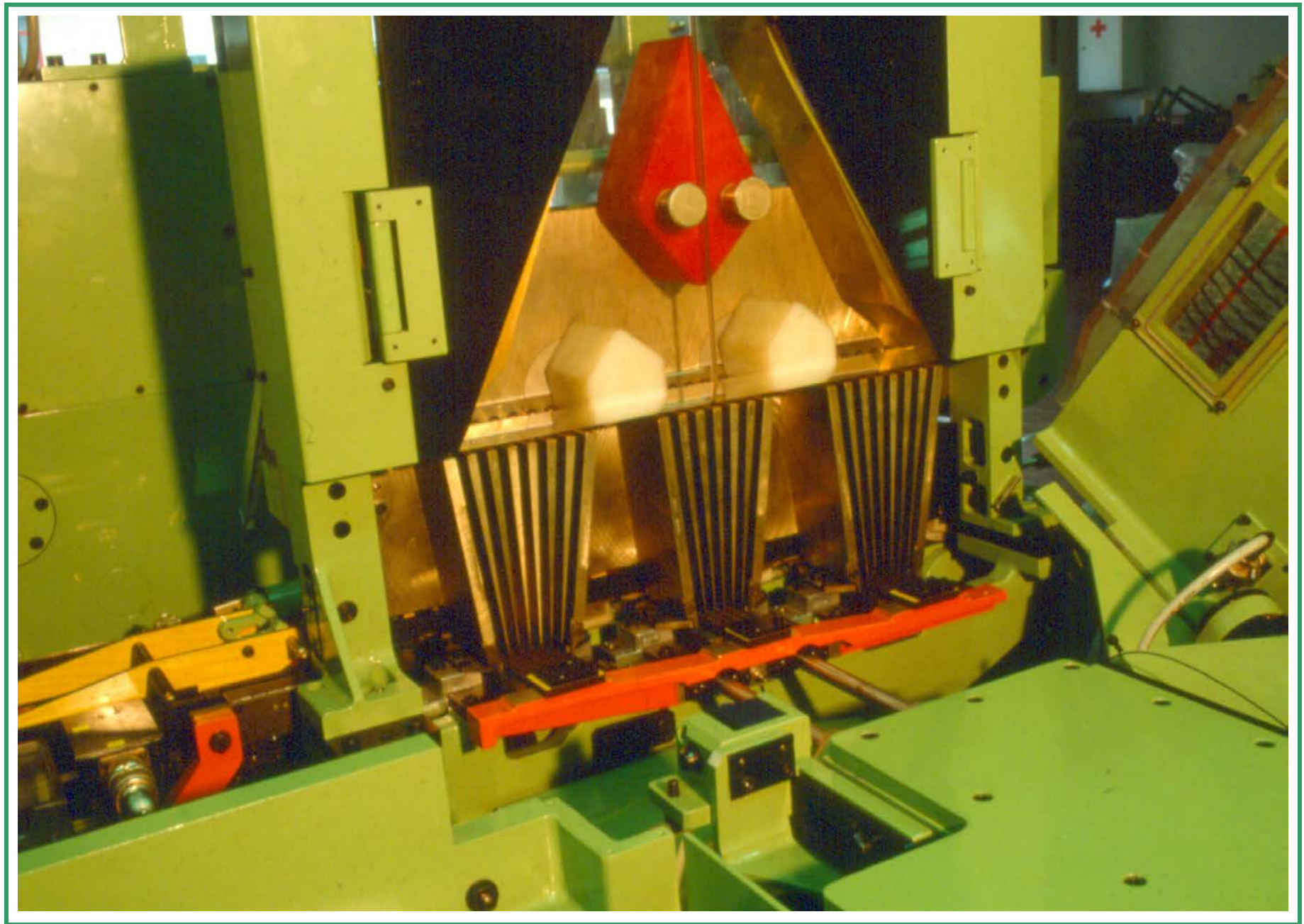
(d)

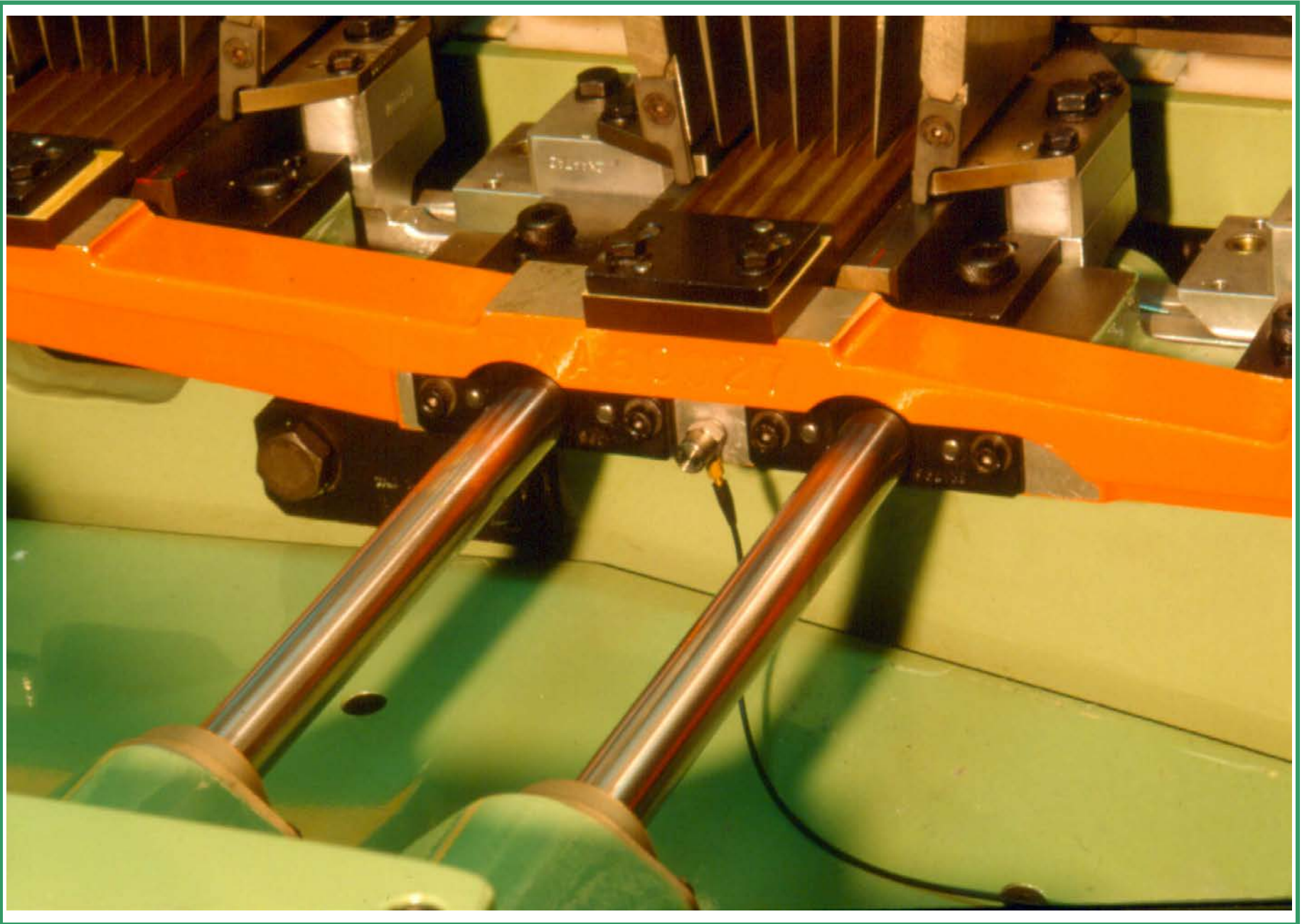
Subscripts
 t: tire v: vehicle
 w: wheel r: rider
 s: strut eq: equivalent



(e)

FIGURE 1.18 Motorcycle with a rider—a physical system and mathematical model.





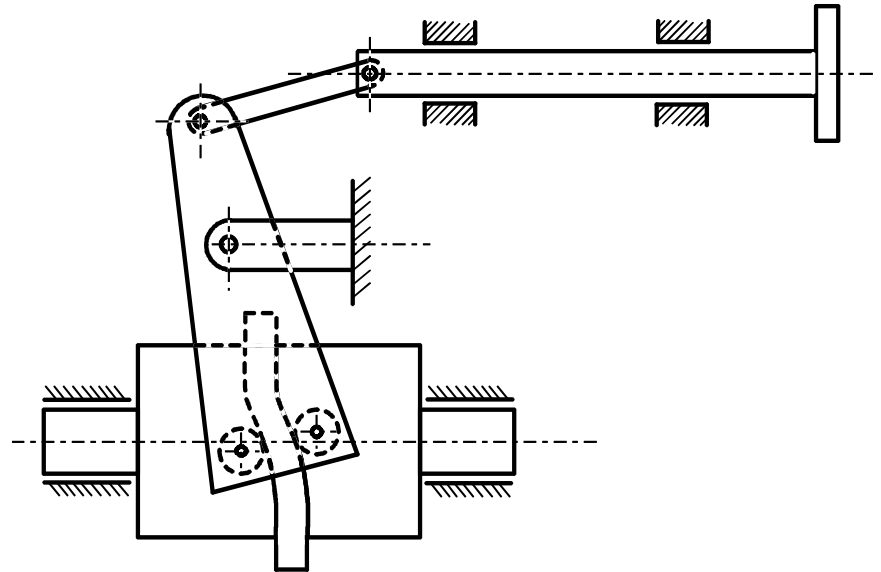
➤ Condizioni di prova

- ❑ Con riferimento alla coppia cinematica camma-rulli, sono state esaminate due condizioni:

- **Condizioni Normali**

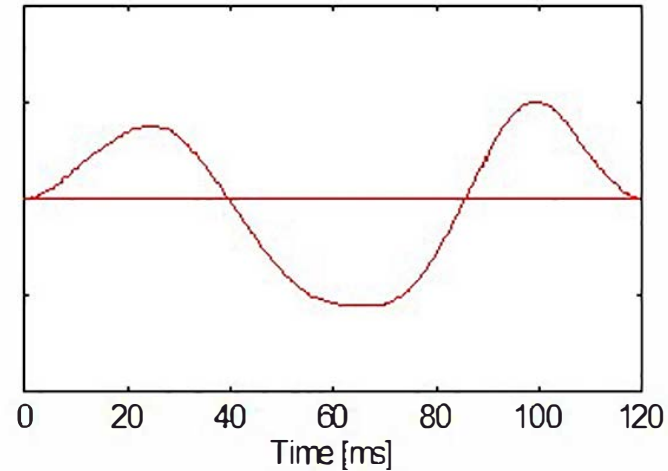
- **Gioco Incrementato**

- è stato introdotto artificialmente un gioco quattro volte superiore a quello in condizioni normali;
la condizione è ancora accettabile per il funzionamento in produzione ma richiede ispezioni più frequenti;
la condizione simula il malfunzionamento dovuto a usura.

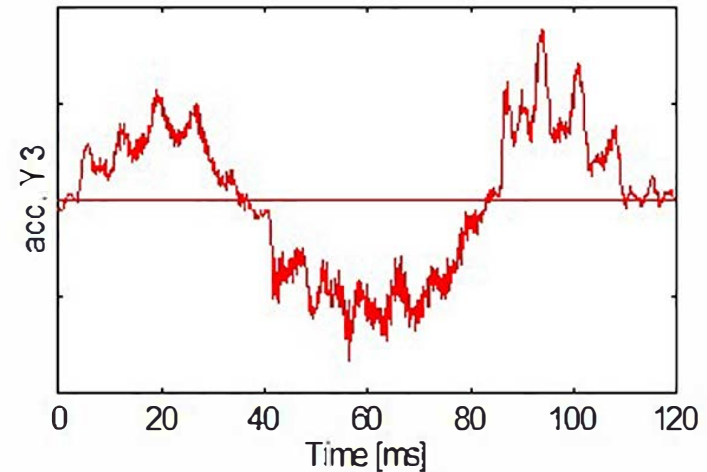
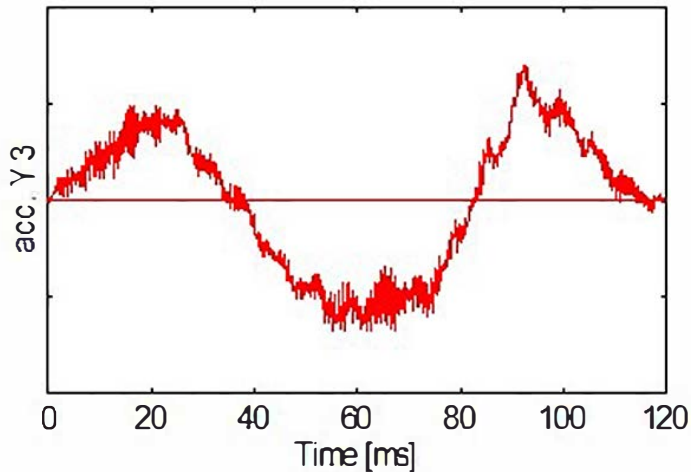


➤ Analisi Sperimentale

Legge di moto
Teorica

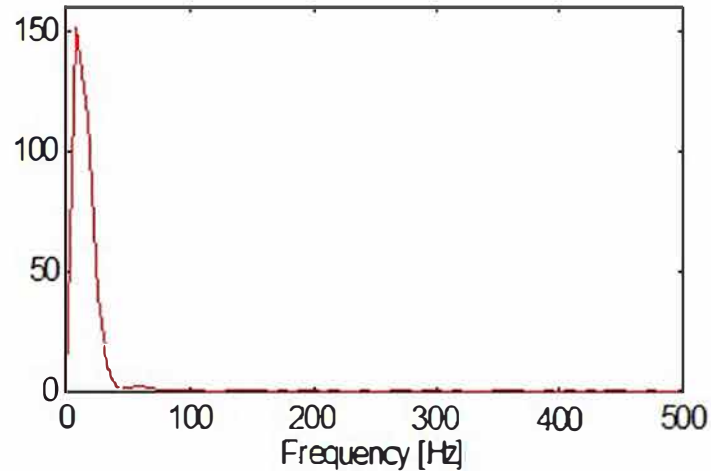


Legge di moto
Sperimentale del cedente

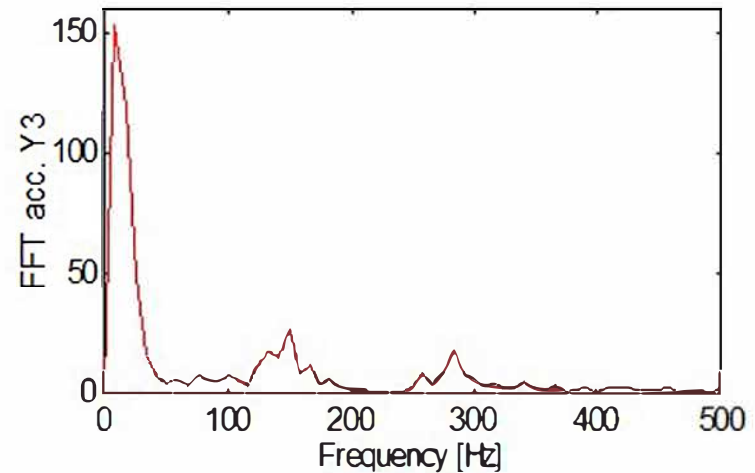
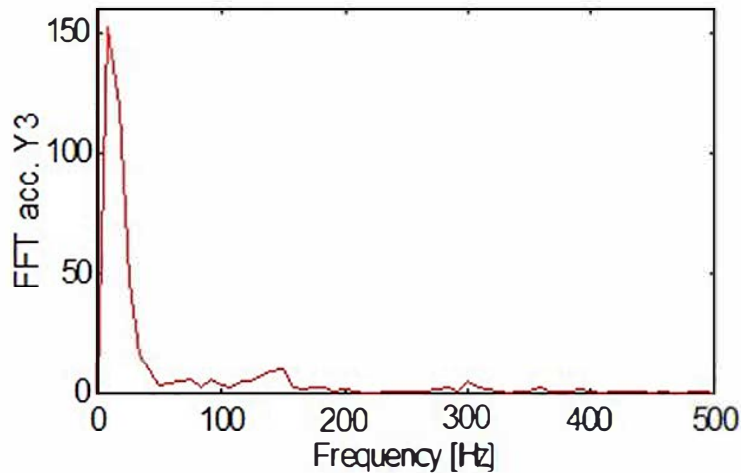


➤ Analisi Sperimentale in frequenza

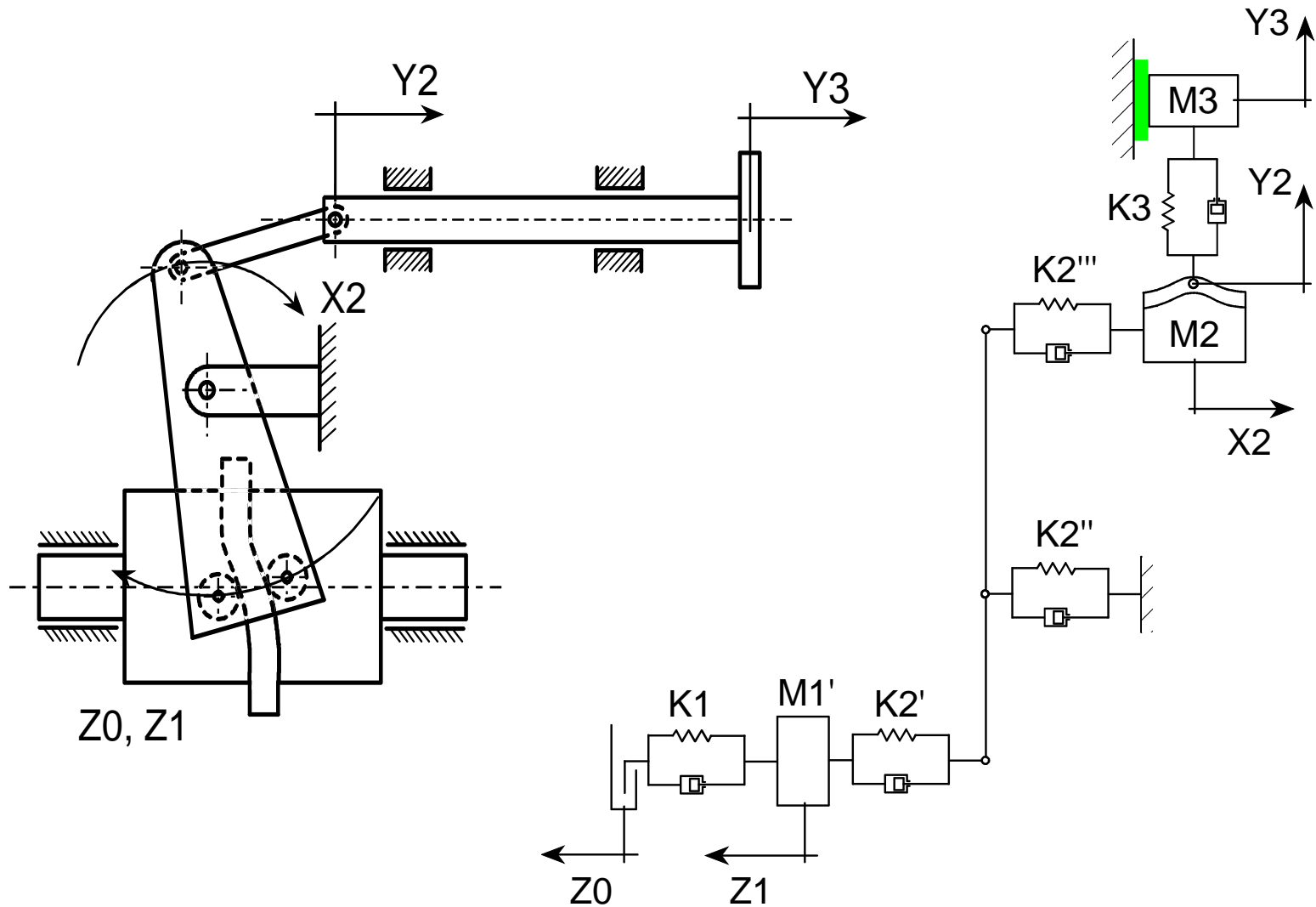
Legge di moto
Teorica



Legge di moto
Sperimentale del cedente

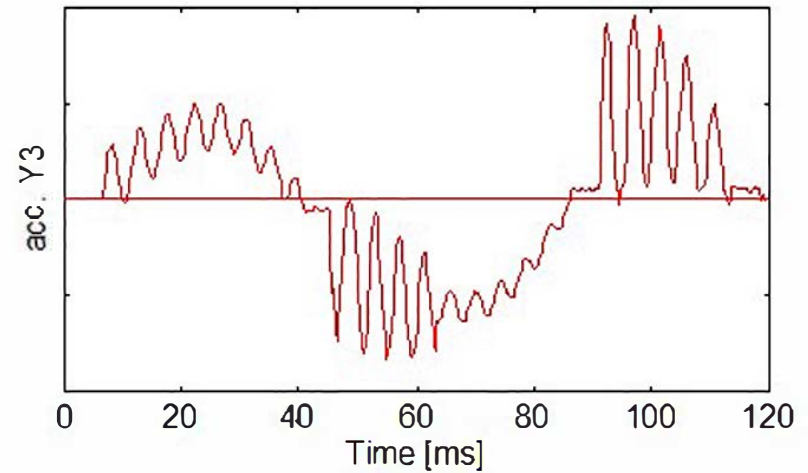
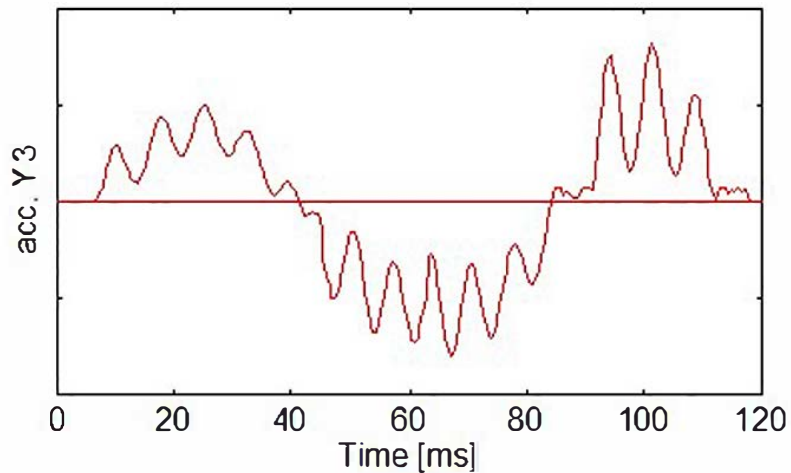
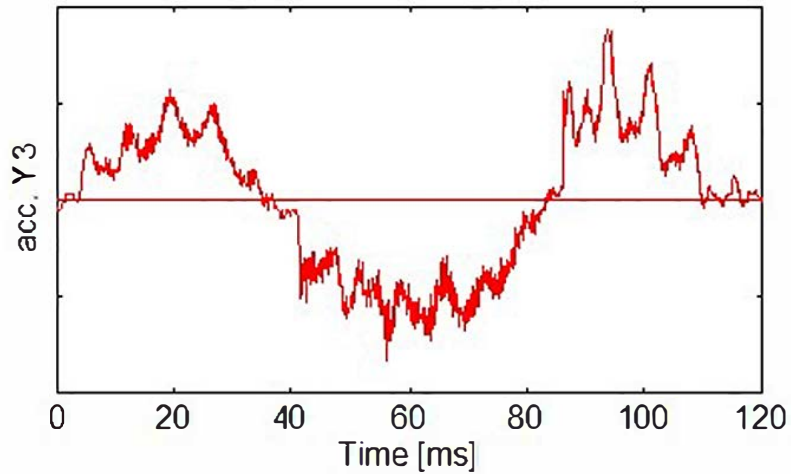


➤ Modello a Parametri Concentrati

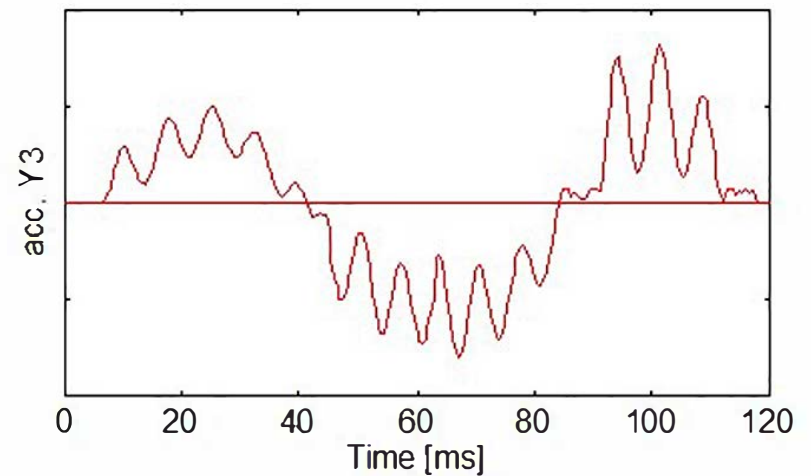
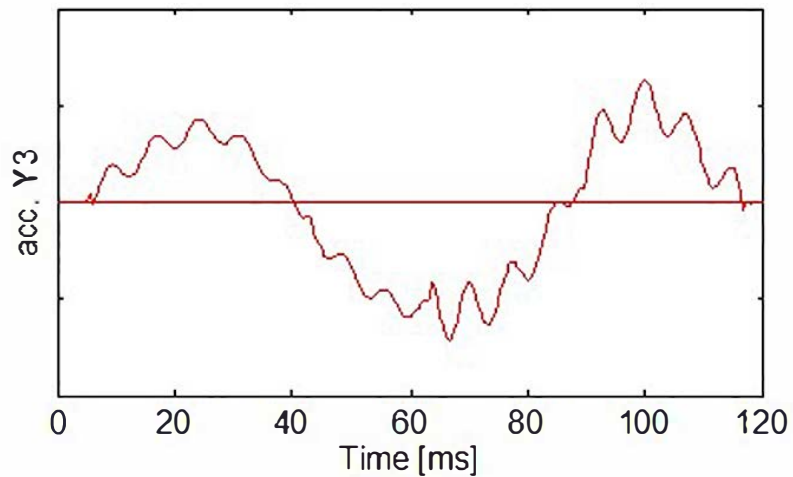
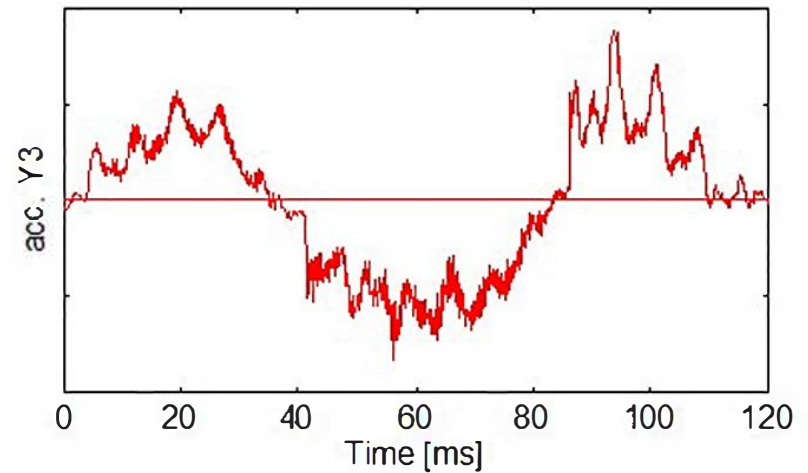
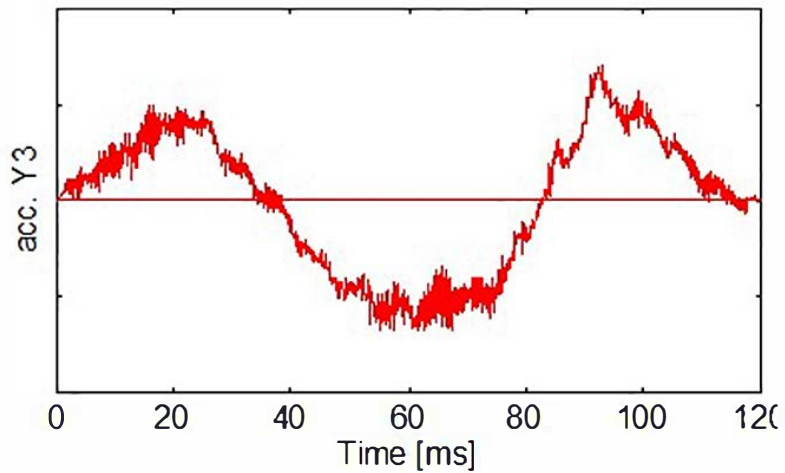


► Validazione

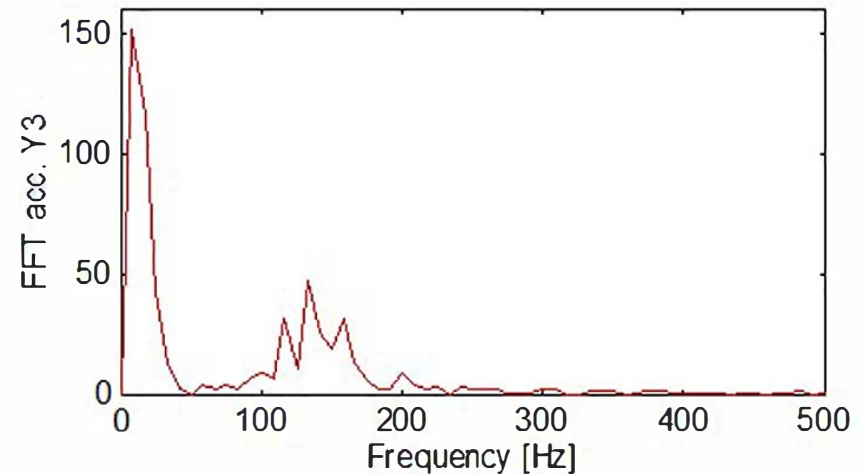
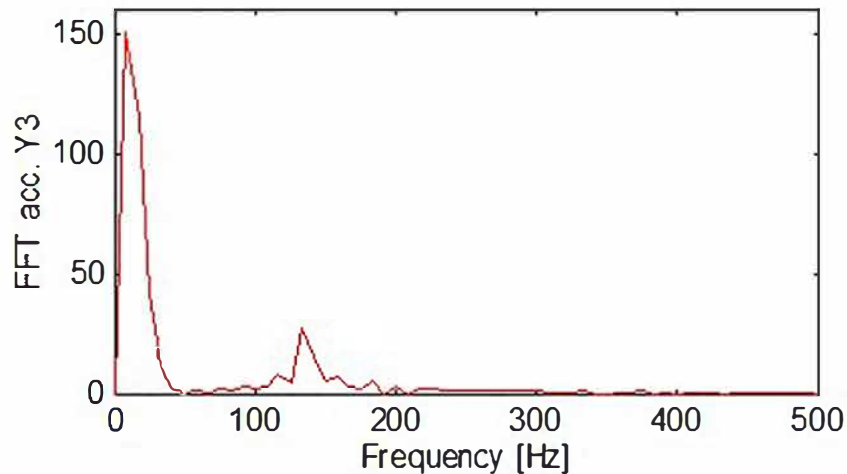
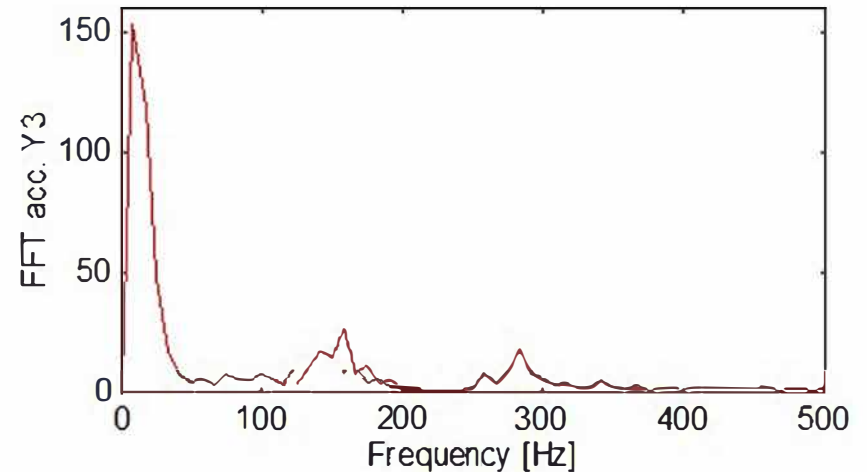
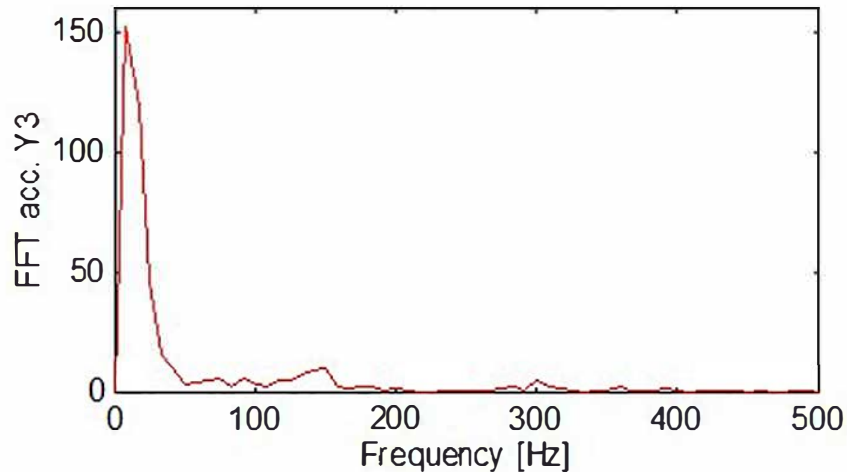
Velocità rotazione
camma: 500 rpm



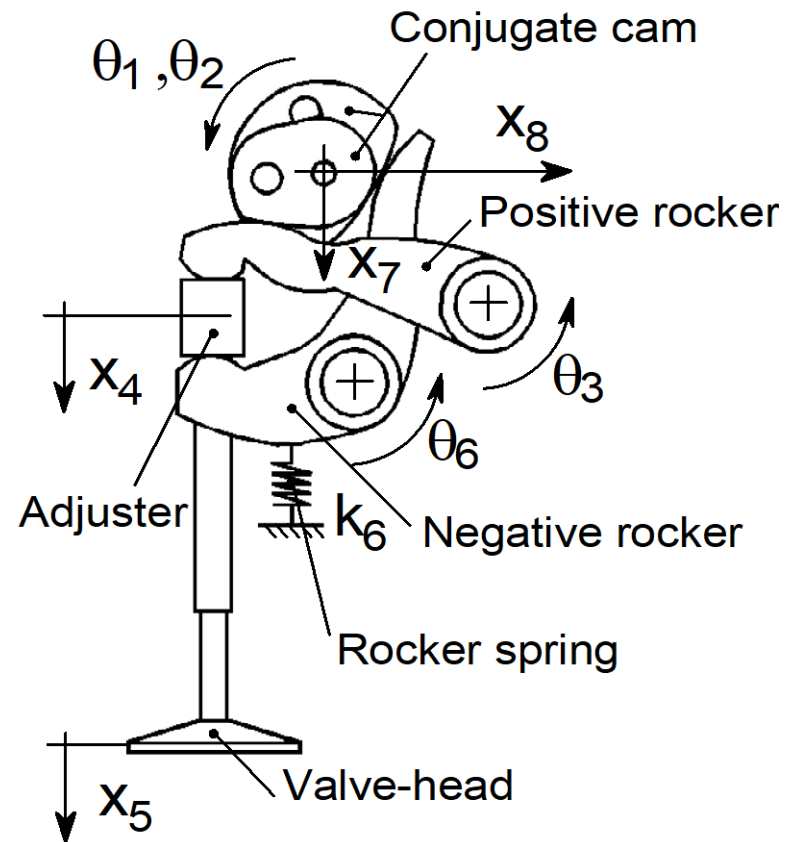
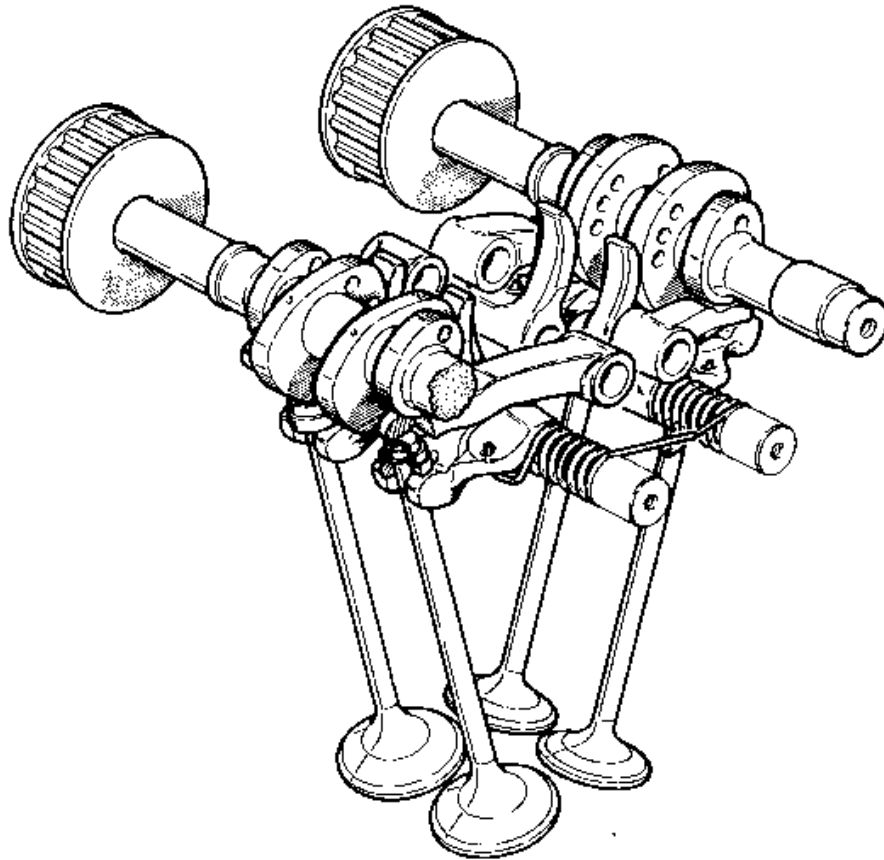
➤ Risultati: tempo



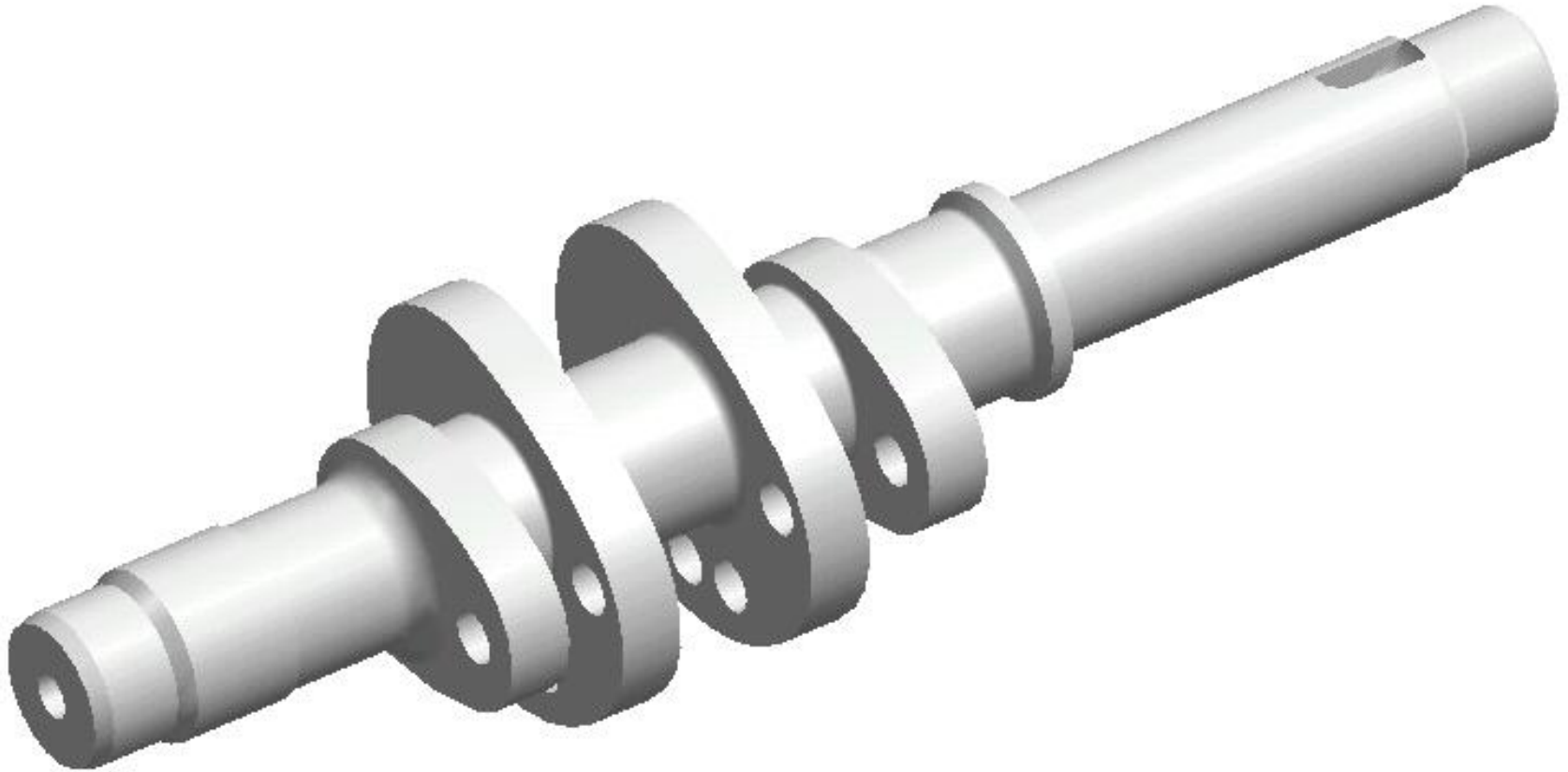
➤ Risultati: frequenza

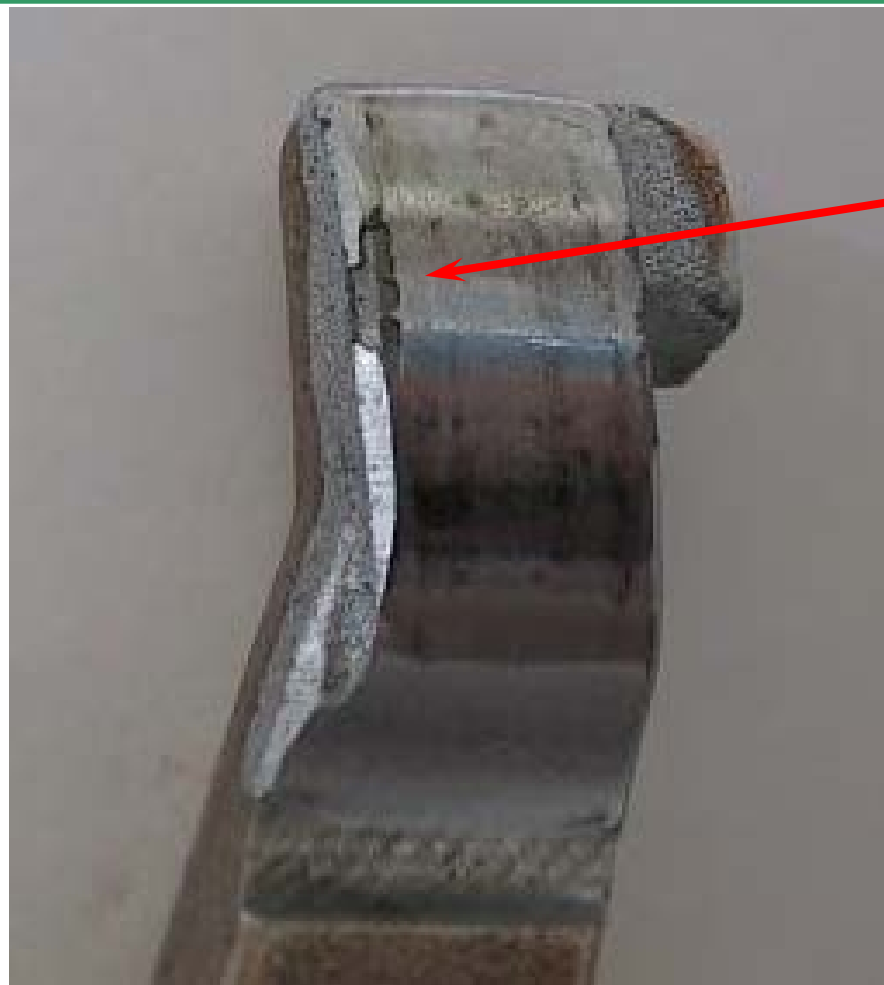


➤ 3° Esempio - Modellazione di una distribuzione desmodromica



➤ **Albero a camme**

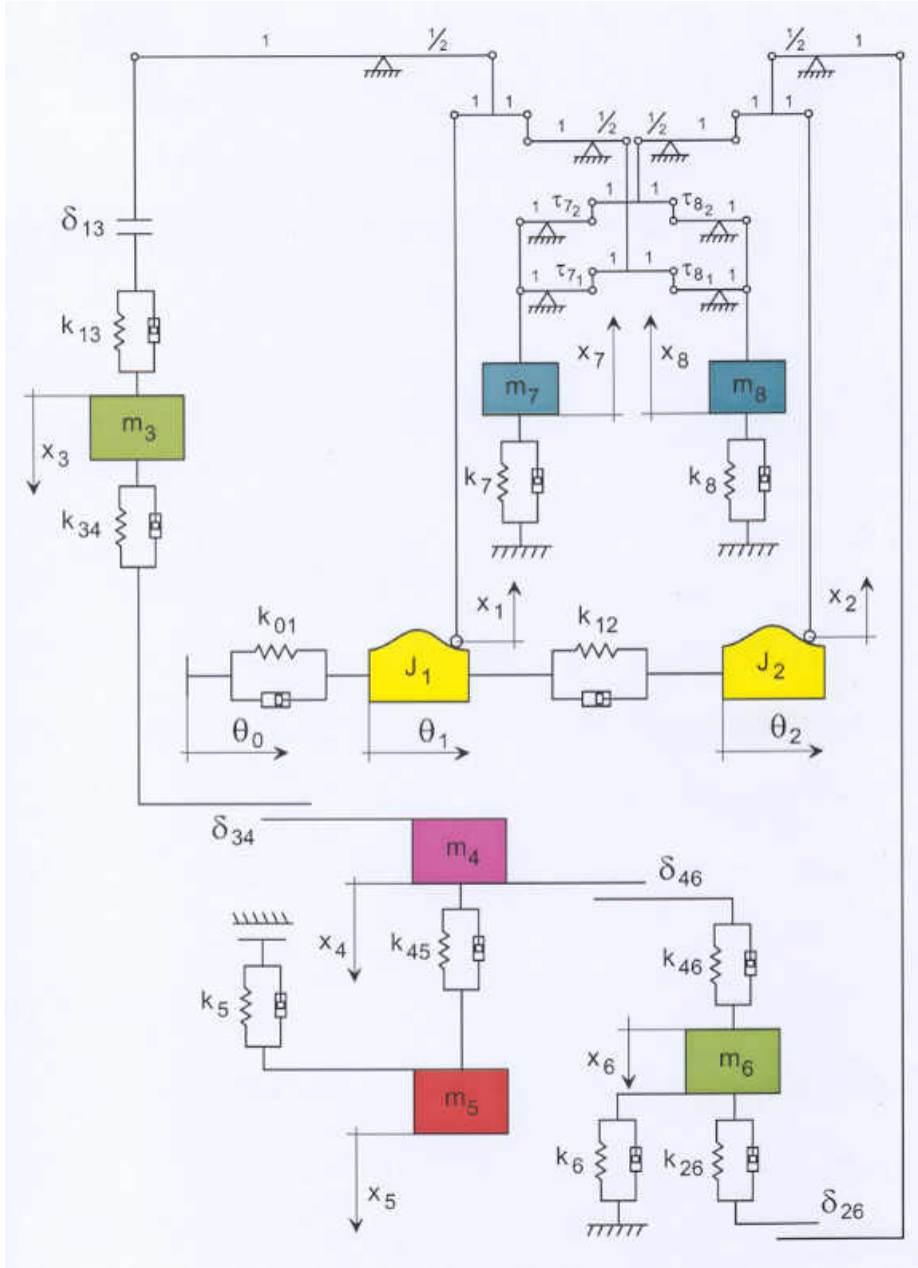




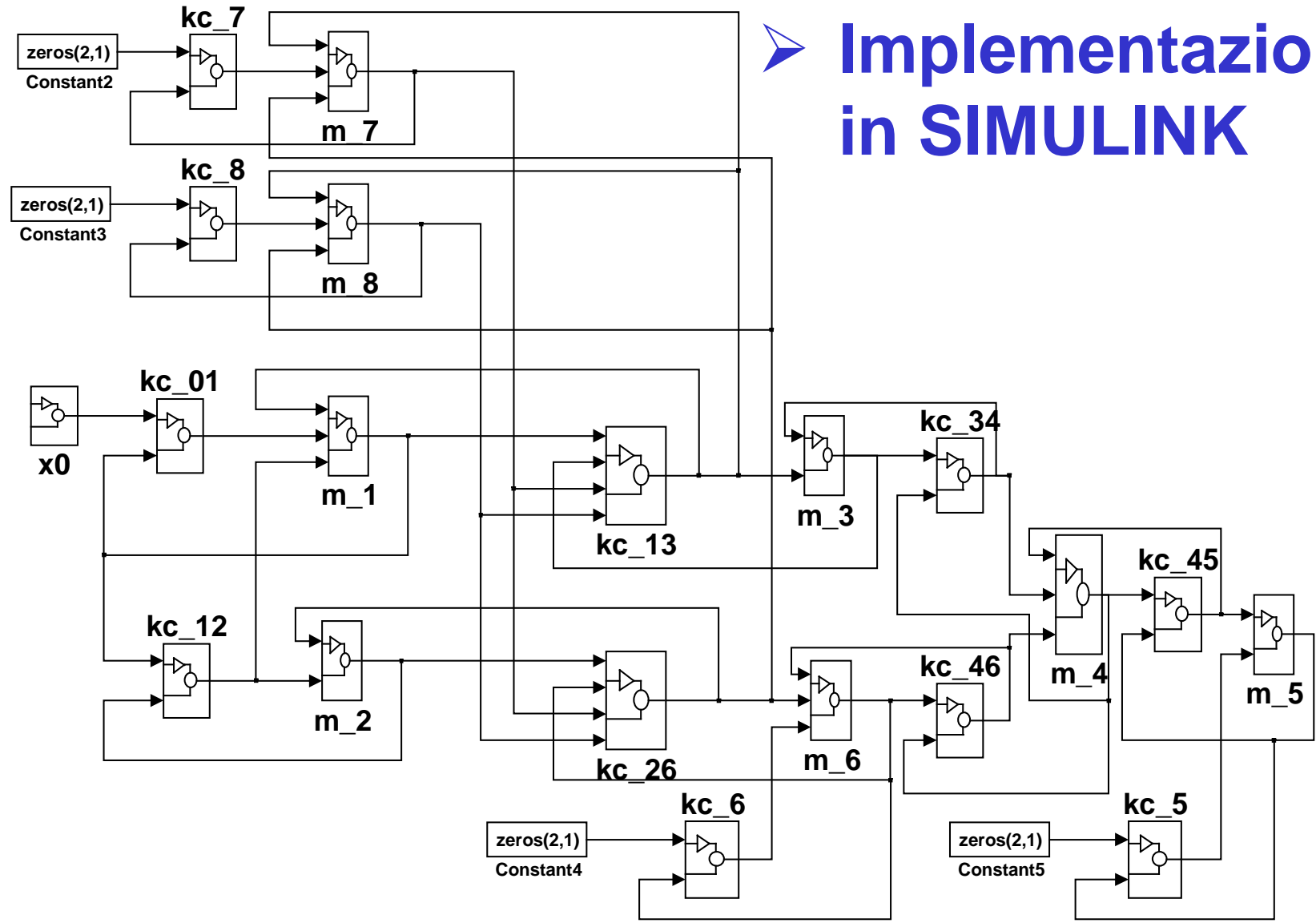
➤ **Danni e Rotture**



➤ **Modello a parametri concentrati**

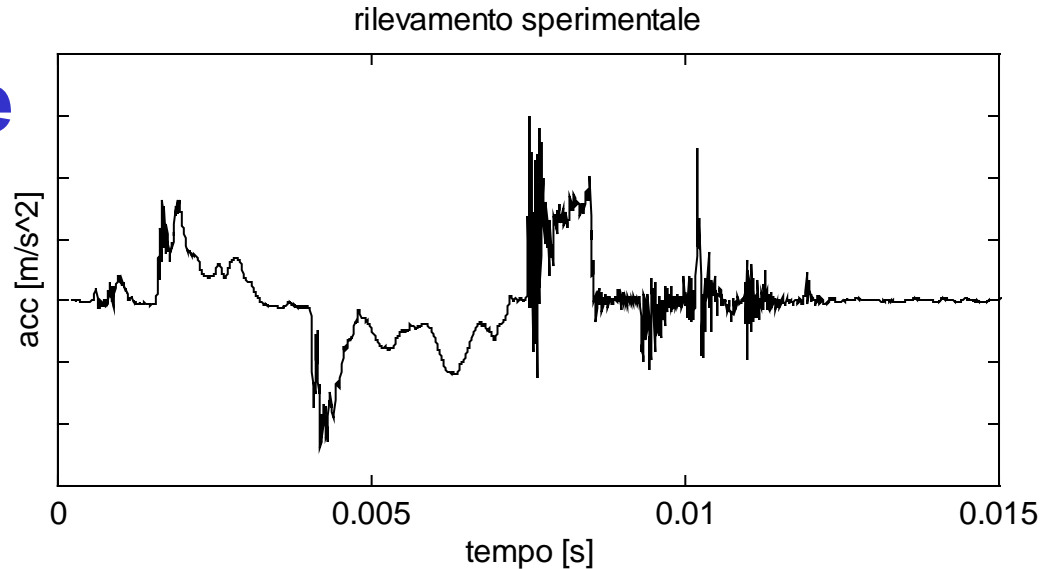


► Implementazione in SIMULINK

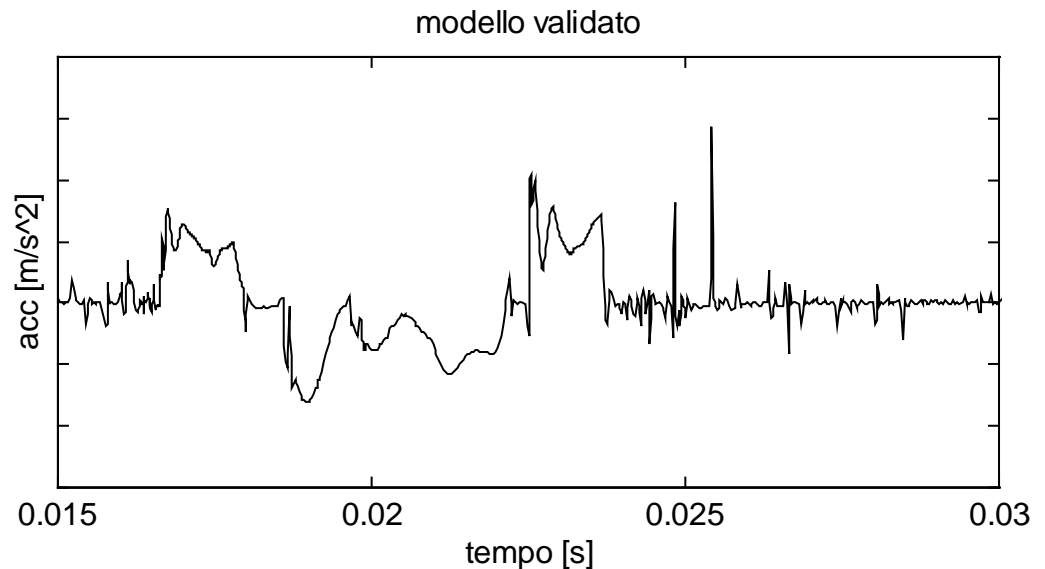


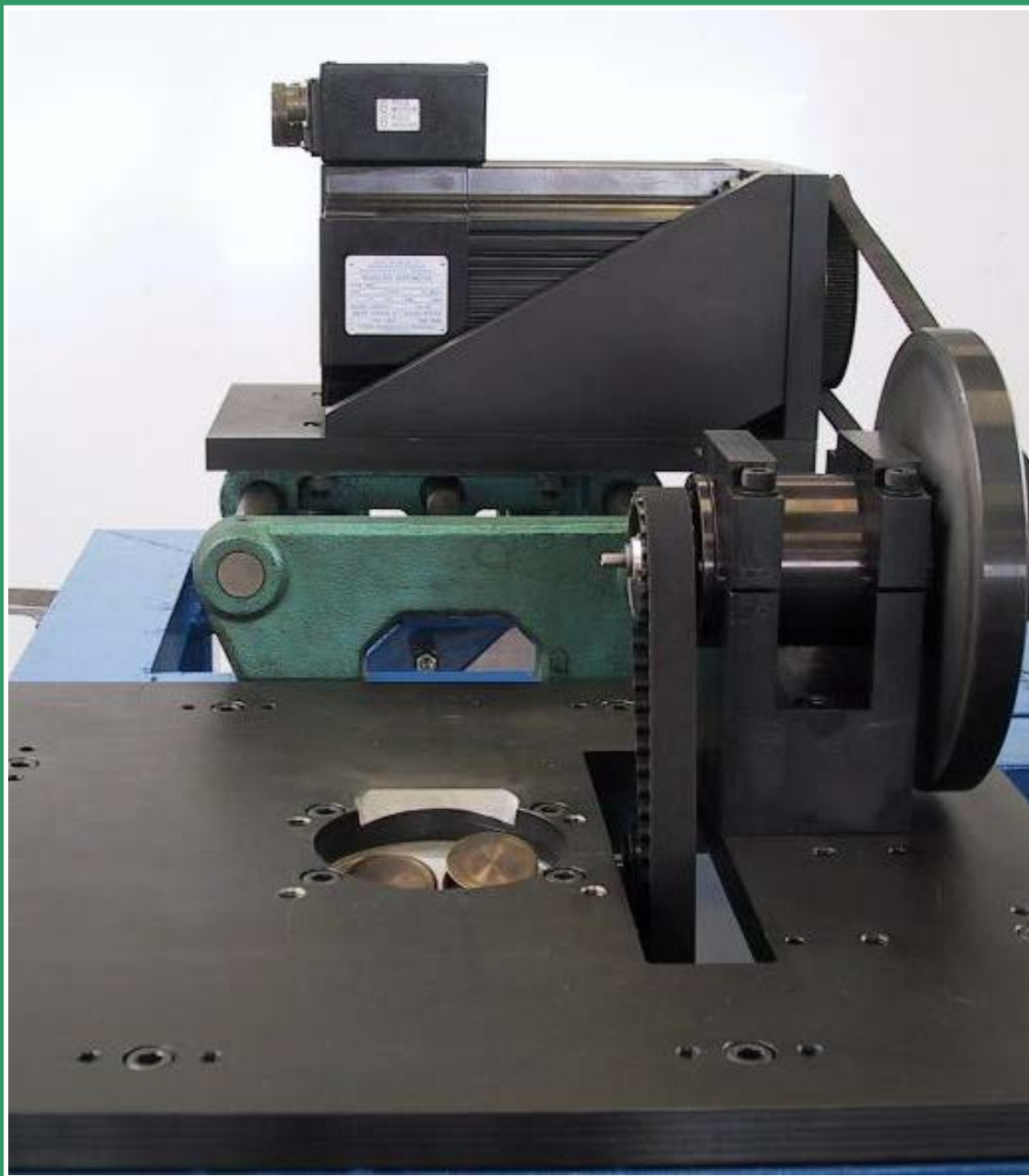
➤ Risultati: accelerazione valvola

Rilievo
sperimentale



Risultato
numerico





Modellazione a Parametri Concentrati di Meccanismi

Meccanica delle Vibrazioni – Modulo II

