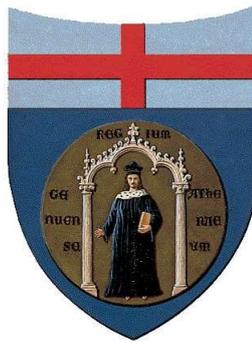


UNIVERSITA' DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica



TESI DI LAUREA

FEBBRAIO-MARZO 2016

AA 2014-15

**Caratterizzazione del coefficiente di smorzamento di un
sistema dinamico a un grado di libertà**

Relatore:

Chiar.^{mo} Prof. Ing. Alessandro Bottaro

Correlatore:

Dott. Ing. Andrea Freda

Allievi:

Filippo Delucchi

Edoardo Sotteri

Indice

1 Introduzione	3
2 Correnti parassite e freni magnetici	4
2.1 Legge di induzione di Faraday	
2.2 Freni magnetici	
2.2.1 Principio funzionamento freni magnetici	
2.2.2 Forza frenante	
2.2.3 Forme costruttive	
2.2.3.1 Freno magnetico ruotante	
2.2.3.2 Freno magnetico lineare	
3 Caratterizzazione vibrazioni di un sistema meccanico a un grado di libertà	9
3.1 Sistema massa-molla-smorzatore	
3.1.1 Molla	
3.1.2 Smorzatore	
3.1.3 Massa	
3.2 Risoluzione dell'equazione del moto	
3.2.1 Vibrazioni libere non smorzate	
3.2.2 Vibrazioni libere smorzate	
3.2.2.1 Smorzamento minore di quello critico	
4 Setup sperimentale	17
4.1 Montaggio del telaio	
4.2 Aggancio e pretensionamento delle molle	
4.3 Unione del modello agli organi di collegamento	
4.4 Fissaggio del corpo sulle boccole di supporto	
4.5 Posizionamento dei laser	
4.6 Acquisizione del segnale	
5 Processo di elaborazione dei dati tramite software MATLAB acquisiti durante le prove sperimentali effettuate nella galleria del vento	24
5.1 Elaborazione dati	
5.1.1 Ricerca dei valori dello zero per ogni laser	
5.1.2 Sottrazione del valore dello zero alle misure dei laser	
5.2 Filtraggio del segnale	
5.3 Valutazione dello smorzamento	
5.3.1 Metodo uno: Fit lineare	
5.3.2 Metodo due: Decremento logaritmico	
5.3.2.1 Introduzione al modus operandi	
5.3.2.2 Applicazione del metodo due al caso in esame	
5.4 Risultati	

5.4.1 Risultati metodo uno	
5.4.2 Risultati metodo due	
5.4.3 Confronto dei due metodi	

6 Conclusioni	50
Appendice A – Galleria del vento DICCA	51
Appendice B – Codice Matlab®	62
Appendice C – Rappresentazione grafica dei risultati	66
Bibliografia	77

Capitolo 1

Introduzione

Obiettivo di questa tesi di laurea è stata la caratterizzazione del fattore di smorzamento di un sistema meccanico a un grado di libertà, mediante la sola analisi dell'andamento oscillatorio del modello, senza conoscere i parametri fondamentali del sistema. Un sistema ad un singolo grado di libertà è definito come quel sistema costituito da una massa alla quale è concesso di traslare in una sola direzione.

Lo studio è stato effettuato su di un corpo a sezione quadrata libero di vibrare, collegato alle sue estremità ad un telaio d'alluminio tramite quattro molle. Come organo smorzatore è stato utilizzato un freno elettromagnetico costituito da una piastra d'alluminio immersa in un campo magnetico prodotto da un elettromagnete. Variando la corrente circolante in quest'ultimo, utilizzando due diversi metodi, si sono ricavate due equazioni capaci di descrivere l'andamento del coefficiente di smorzamento al variare dell'ampereaggio.

Questo studio è stato effettuato presso la galleria del vento della scuola Politecnica dell'Università di Genova, situata presso il laboratorio del DICCA (si veda descrizione nell'Appendice A), al fine di poter eseguire, successivamente, studi di fenomeni aeroelastici su sistemi liberi di vibrare, che avessero a parametro il valore dello smorzamento. In particolare se ne è usufruito per l'analisi del distacco di vortici su di un modello a sezione quadrata immerso in una corrente fluida per la determinazione della risposta in funzione della velocità del vento, al variare del fattore di smorzamento del sistema.

Una volta completato il setup sperimentale, ossia il montaggio del corpo al telaio tramite le rispettive molle, dell'organo smorzatore e dei laser necessari per la rilevazione di posizione, si è proceduto all'eccitazione del modello con un impulso di forza, ottenuto martellando lo stesso in mezzera. Eccitato il pezzo, i dati forniti dai laser sono stati acquisiti tramite l'impiego del software Labview® e, successivamente, elaborati con il programma Matlab®. Questa operazione è stata ripetuta variando, di volta in volta, la corrente circolante nell'elettromagnete, in un range compreso tra 0 A e 3.6 A, a intervalli regolari di 0.4 A. Conoscendo la soluzione dell'equazione del moto di un sistema meccanico sottosmorzato a un grado di libertà libero di vibrare, mediante la costruzione di algoritmi in Matlab®, si è potuto risalire al fattore di smorzamento ricercato.

Il capitolo due descrive il fenomeno delle correnti parassite e il suo sfruttamento nel campo dei freni elettromagnetici. Questa trattazione si è resa necessaria per poter comprendere il funzionamento, dal punto di vista fisico, dello smorzatore utilizzato durante questo studio. Il terzo capitolo descrive come sono state risolte le equazioni differenziali che governano il moto oscillatorio, sia per quanto riguarda i sistemi sottosmorzati, sia per i sistemi con smorzamento totalmente assente, in modo di dare la possibilità al lettore di capire in che modo sono stati costruiti gli algoritmi descritti nel quinto capitolo. Nel quarto capitolo vi è una descrizione del set-up sperimentale, nella quale sono illustrati tutti i passaggi riguardanti la messa a punto del modello. Il quinto capitolo, come enunciato precedentemente, descrive come sono stati costruiti quegli algoritmi necessari alla caratterizzazione dello smorzamento secondo due diversi metodi. Infine, nelle conclusioni, sono stati riportati i risultati ottenuti durante questo studio e alcune considerazioni riguardo a suoi possibili sviluppi futuri.

Capitolo 2

Correnti parassite e freni magnetici

Per analizzare il funzionamento dello smorzatore impiegato nella caratterizzazione del sistema dinamico e per fare chiarezza sul fenomeno inerente delle correnti parassite, si è deciso di ricordare i concetti salienti alla base dell'induzione magnetica.

2.1 LEGGE DI INDUZIONE DI FARADAY

Si consideri una spira di materiale conduttore sottoposta all'azione di un campo magnetico \mathbf{B} variabile; si può osservare che, ai suoi capi, si genera una **FEM** e di conseguenza una corrente, chiamate rispettivamente **FEM** indotta e corrente indotta.

Introducendo la grandezza flusso magnetico ϕ_B , secondo la definizione fornita dal volume "Fisica 1" di Halliday della legge di Faraday, si ha che:

$$Fem = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

$$\phi_B = \int B \, dA \quad (2.2)$$

Il problema relativo ai versi della **Fem** e della corrente indotta, viene risolto da Lenz con l'introduzione di una regola, esprimibile secondo l'enunciato: "La corrente indotta in una spira ha verso tale che il campo magnetico da lei generato si oppone alla variazione di campo magnetico che l'ha indotta; la FEM ha lo stesso identico verso della corrente".

Essendo la spira percorsa da corrente ed immersa in un campo magnetico, sarà sottoposta ad una forza, i cui verso e modulo sono dati dalla relazione:

$$\mathbf{F} = i\mathbf{L} \times \mathbf{B} \quad (2.3)$$

Si consideri l'esempio di Fig. 2.1, dove una spira è immersa in un campo magnetico costante. Se cerchiamo di muovere la spira per allontanarla dal campo, per i fenomeni descritti precedentemente, si instaureranno una corrente, e di conseguenza un campo, indotti (legge di Faraday rispettata, infatti spira e campo si trovano in moto relativo tra loro) di verso tale da generare una forza che si opponga al movimento.

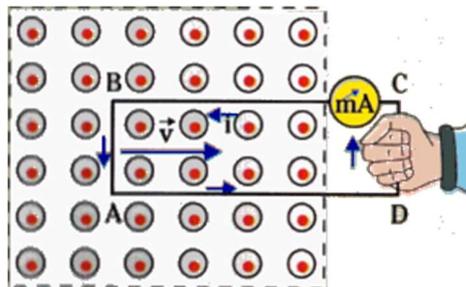


Figura 2.1
Tentativo di movimentazione di una spira immersa in un campo magnetico

Nel caso di conduttore non filamentare (vedi piastrina conduttrice utilizzata durante lo studio del caso in esame) la corrente indotta non segue un percorso forzato, ma percorre invece una traiettoria chiusa entro il materiale che costituisce la piastra, come se ruotasse in una sorta di mulinello. A questo fenomeno viene dato il nome di corrente parassita o corrente di Foucault.

E' dunque spiegato il principio di funzionamento dello smorzatore impiegato in questa tesi. Un'applicazione di fondamentale importanza, che si avvicina per finalità di utilizzo e modalità di funzionamento al sistema di smorzamento da noi utilizzato, è il freno magnetico o a correnti parassite.

2.2 FRENI MAGNETICI

Un **freno magnetico**, come un comune freno ad attrito, è un dispositivo utilizzato per rallentare un mobile, come un treno o un veicolo di una attrazione per parchi di divertimento. A differenza dei freni ad attrito, che applicano una forza fra due parti in movimento relativo, i freni magnetici rallentano un mobile generando correnti parassite per induzione elettromagnetica. La forza di rallentamento interviene senza contatto fra le parti, ed è dovuta alla trasformazione in calore delle correnti indotte. Il freno magnetico è quindi esente da usura.

I freni magnetici possono essere elettromagnetici o a magneti permanenti: nel secondo caso non è richiesto l'intervento di una fonte di energia per frenare.

2.2.1 PRINCIPIO FUNZIONAMENTO FRENI MAGNETICI

Quando una lastra di un metallo conduttore di elettricità (rame, alluminio etc.) si muove all'interno di un campo magnetico, ogni settore del disco viene attraversato da un flusso di campo magnetico in continua variazione e, di conseguenza, in esso, si generano delle forze elettromotrici indotte che causano la circolazione di correnti parassite (o correnti di Foucault). Queste generano un campo magnetico che, opponendosi a quello generato dall'elettromagnete o dai magneti permanenti, ha un effetto frenante che rallenta il movimento del disco. A causa della resistività elettrica della lastra conduttrice, le correnti parassite generano calore, e quindi il disco dissipa energia cinetica. La conducibilità elettrica del metallo conduttore ha un ruolo determinante sull'azione frenante.

2.2.2 FORZA FRENANTE

La forza frenante dipende da diversi parametri:

- La conducibilità del metallo: le correnti indotte sono direttamente proporzionali alla conducibilità elettrica del materiale. Tanto più il materiale ha una buona conducibilità elettrica, più verrà frenato per mezzo delle correnti parassite.
- Spessore della lastra: come per quanto riguarda la conducibilità elettrica, le correnti indotte sono direttamente proporzionali allo spessore del materiale.
- Intensità del campo magnetico: le correnti indotte sono proporzionali al quadrato dell'induzione magnetica. Più è potente il campo magnetico utilizzato maggiore risulterà l'effetto frenante.
- Direzione del campo magnetico: la massima azione frenante si ottiene quando il movimento avviene in direzione perpendicolare alle linee di forza di un campo magnetico per quanto possibile uniforme.
- Traferro del circuito magnetico: Un aumento dello spazio riservato al passaggio della lastra conduttrice (traferro), determina una diminuzione dell'intensità del campo magnetico che la attraversa e quindi, una diminuzione dell'azione frenante complessiva.
- Area della lastra intercettata dal campo magnetico: più è grande l'area della lastra che è sottoposta al campo magnetico, maggiore è la libertà di circolazione delle correnti indotte.
- Forma della lastra: la presenza di fori o intagli nella lastra conduttrice può impedire, fino a quasi annullare, l'effetto frenante.
- Velocità: l'effetto frenante è fortemente dipendente dalla velocità relativa fra campo magnetico e lastra conduttrice.

Per quanto riguarda la velocità, è opportuno approfondire quanto detto precedentemente. A basse velocità la forza frenante è proporzionale alla velocità stessa, quindi la frenata risulta di tipo viscoso. Alle alte velocità invece, la forza frenante raggiunge un massimo e poi decresce meno marcatamente, tendendo a zero per valori di velocità molto elevati. Una conseguenza di quanto precede è che il freno magnetico non offre alcuna resistenza a velocità nulla, cioè non è in grado di trattenere il veicolo all'arresto. Per converso esso è dotato di una naturale funzione tipo ABS, poiché non soffre dei problemi di scivolamento che possono presentare i freni ad attrito, ed è quindi particolarmente affidabile.

2.2.3 FORME COSTRUTTIVE

2.2.3.1 FRENO MAGNETICO RUOTANTE

Nei freni magnetici ruotanti, un disco di metallo conduttore, ruota all'interno di un campo magnetico generato da bobine o da magneti permanenti. Nel primo caso, la forza frenante può essere dosata regolando la corrente di alimentazione. Risultato dell'azione frenante è la generazione di calore nel disco, che va opportunamente disperso.



Figura 2.2
Esempio di freno magnetico ruotante

2.2.3.2 FRENO MAGNETICO LINEARE

Nel freno magnetico lineare la lastra conduttrice ed i magneti sono disposti lungo il percorso.

Sono possibili due principali forme costruttive:

Nella prima, il magnete si trova sul veicolo mentre la lastra conduttrice viene posizionata sulla via di corsa; un esempio di questa applicazione è individuabile nel funzionamento di alcuni treni, dove la lastra conduttrice è spesso costituita dal binario stesso.

Nella seconda, il magnete si trova sulla via di corsa mentre la lastra conduttrice risiede sul veicolo: questa soluzione evita di appesantire il veicolo, ma può essere più onerosa per l'impiego di un maggior numero di magneti.



*Figura 2.3
Applicazione del freno magnetico lineare in ambito ferroviario*

Capitolo 3

Caratterizzazione delle vibrazioni di un sistema meccanico a un grado di libertà

La vibrazione è il movimento oscillatorio di un sistema meccanico intorno ad una configurazione di equilibrio.

La configurazione di equilibrio è quella che il sistema assume se sottoposto alla sola forza peso o ad altri campi costanti. Nel caso in esame, la configurazione di equilibrio è stata ottenuta pretensionando le quattro molle, operazione necessaria per ottenere una corretta oscillazione del modello.

Per far oscillare il modello sono necessarie forze eccitatrici che governino e/o mantengano le vibrazioni. Nello studio condotto durante la nostra tesi, la forza eccitatrice è stata generata da un impulso che perturbasse istantaneamente il modello.

Dato che il modello in esame è un sistema ad un grado di libertà del secondo ordine, le equazioni che governano la dinamica di tale sistema sono esattamente quelle caratterizzanti un sistema massa-molla-smorzatore. Ecco perché abbiamo deciso di trattare la meccanica di suddetto sistema.

3.1 SISTEMA MASSA-MOLLA-SMORZATORE

In un sistema del primo ordine la costante di tempo è sufficiente a descrivere il comportamento del sistema sollecitato da uno dei segnali considerati (gradino, impulso, onda quadra ...).

In un sistema del secondo ordine vi sono due componenti che possono accumulare energia e una componente che la dissipa. La molla accumula energia elastica, la massa accumula energia potenziale e lo smorzatore introduce un attrito che tende a trasformare in calore non più riutilizzabile l'energia, che passa dalla massa alla molla e viceversa, e quindi a porre termine allo scambio di energia tra le due.

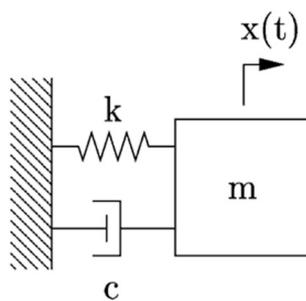


Figura 3.1

Schematizzazione grafica del sistema massa-molla-smorzatore

3.1.1 MOLLA

La molla rappresenta l'elasticità della struttura. Il legame tra la forza sollecitante F_s e lo spostamento relativo $x = x_2 - x_1$ dipende dalla rigidità k ed è espresso dalla relazione analitica:

$$F_s = kx = k(x_2 - x_1) \quad (3.1)$$

La rigidità rappresenta la forza capace di produrre uno spostamento relativo unitario. La rigidità si chiama anche rigidità o costante elastica della molla, mentre F_s prende il nome di forza elastica.

Il comportamento della molla può essere, oltre che lineare, anche non lineare. Nel primo caso (molla rigida), la forza capace di produrre un dato spostamento diviene progressivamente maggiore all'aumentare della deformazione.

Nel caso della molla tenera, invece, al crescere delle deformazioni si richiedono forze via via minori per produrre un dato incremento di spostamento.

Per semplificare i calcoli, talvolta si usa la molla lineare anche quando il comportamento della struttura è non-lineare.

3.1.2 SMORZATORE

Il dispositivo atto a rappresentare le caratteristiche di attrito e le perdite di energia del sistema prende il nome di smorzatore, dissipatore o ammortizzatore viscoso. Le forze corrispondenti prendono il nome di forze viscosi.

Si suppone che la forza viscosa F_d sia proporzionale alla velocità $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ attraverso la costante c :

$$F_d = c\dot{x} \quad (3.2)$$

che si chiama coefficiente di smorzamento viscoso, oppure costante viscosa.

Misurando la forza in newton (N) e la velocità in metro al secondo (m/s), il coefficiente di smorzamento si misura in N s/m.

Per la forza viscosa e lo smorzatore si possono fare considerazioni analoghe a quelle relative alla forza elastica e alla molla.

3.1.3 MASSA

La massa si misura in kg e si indica con un rettangolino nella schematizzazione di Fig. 3.1. La massa m può essere considerata la costante dell'equazione costitutiva $F = ma = m\ddot{x}$, che esprime la seconda legge della dinamica, essendo a l'accelerazione della massa m , ed F la risultante delle forze sulla massa medesima.

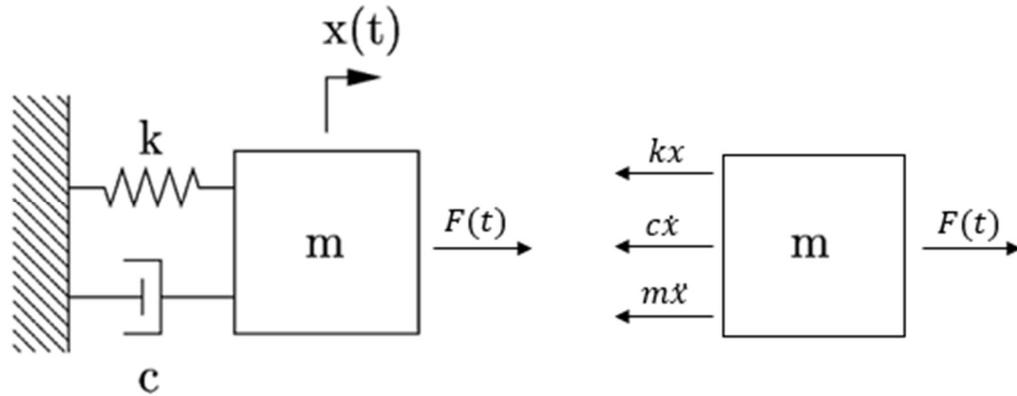


Figura 3.2
Rappresentazione dei vettori delle forze agenti sul modello

I tre parametri del sistema massa-molla-smorzatore sono detti anche parametri caratteristici del sistema lineare oggetto di studio.

3.2 RISOLUZIONE DELL'EQUAZIONE DI MOTO

3.2.1 VIBRAZIONI LIBERE NON SMORZATE

In assenza di forze esterne applicate e dello smorzamento, considerando le forze precedentemente introdotte ed effettuando un bilancio alla traslazione, si ottiene un'equazione differenziale del secondo ordine lineare omogenea a coefficienti costanti:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3.3)$$

Un integrale particolare dell'equazione omogenea Eq.(3.3) è del tipo:

$$x = Xe^{\lambda t} \quad (3.4)$$

In cui λ è un parametro da determinarsi, in genere complesso, e X rappresenta l'ampiezza, anch'essa genericamente complessa.

Sostituendo la Eq.(3.4) nella Eq.(3.3) si ottiene una equazione algebrica, omogenea, parametrica in λ :

$$(\lambda^2 m + k)X = 0 \quad (3.5)$$

che ammette come soluzione non banale quella per cui si annulla il polinomio caratteristico:

$$\lambda^2 m + k = 0 \quad (3.6)$$

Le soluzioni della Eq.(3.6) risultano:

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{-\frac{k}{m}} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}} = \pm i \omega_0 \quad (3.7)$$

Ove i è l'unità immaginaria e ω_0 è la pulsazione propria, o pulsazione naturale, del sistema non smorzato. Avendo la Eq.(3.6) due soluzioni distinte, la Eq.(3.3) avrà due integrali particolari linearmente indipendenti:

$$x(t) = X_1 e^{\lambda_1 t} + X_2 e^{\lambda_2 t} \quad (3.8)$$

Nel caso in esame, tenendo conto della Eq.(3.7) l'integrale generale diviene:

$$x(t) = X_1 e^{i\omega_0 t} + X_2 e^{-i\omega_0 t} \quad (3.9)$$

Sviluppando la Eq.(3.9) mediante la formula di Eulero, la stessa equazione può anche essere riscritta nella forma seguente:

$$x(t) = X_1 (\cos \omega_0 t + i \sin \omega_0 t) + X_2 (\cos \omega_0 t - i \sin \omega_0 t) \quad (3.10)$$

Eseguendo ulteriori passaggi si arriva alla formula seguente:

$$x(t) = X \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (3.11)$$

Dove φ è il simbolo che identifica la fasatura della funzione.

L'integrale generale di un sistema a un grado di libertà non smorzato è rappresentato da un'oscillazione armonica con pulsazione ω_0 (misurata in rad/s), caratterizzata da un periodo T_0 espresso in secondi pari a:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (3.12)$$

Si definisce come frequenza propria, o frequenza naturale,(espressa in hertz), il rapporto:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (3.13)$$

che definisce il numero di cicli (oscillazioni) che il sistema compie nell'unità di tempo.

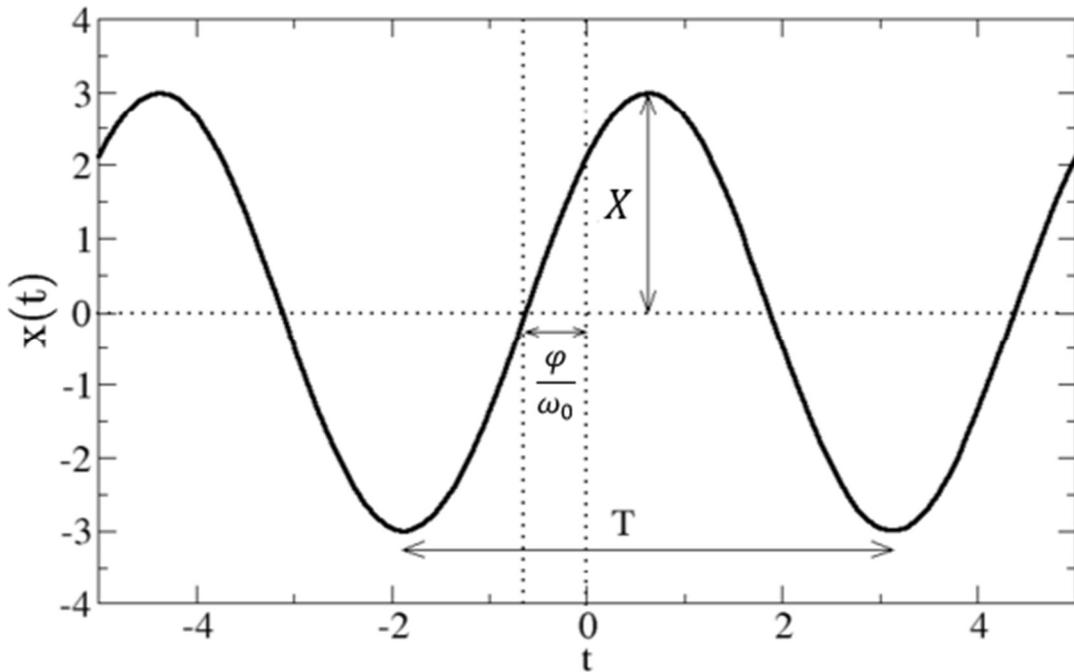


Figura 3.3
Rappresentazione del periodo di oscillazione

3.2.2 VIBRAZIONI LIBERE SMORZATE

Nei sistemi reali la condizione di moto libero ad ampiezza costante nel tempo non è verificata in quanto in tutti i sistemi vibranti esiste sempre una certa dissipazione di energia. Tale dissipazione può addebitarsi all'isteresi elastica del materiale o alla presenza di un effettivo smorzatore. Negli schemi analitici si tiene conto di tale circostanza introducendo nel modello elementi smorzanti equivalenti di tipo viscoso che esercitano una forza proporzionale alla velocità e in verso opposta a essa. Anche se tale schematizzazione non corrisponde all'effettivo meccanismo di dissipazione, è possibile determinare un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (obbiettivo di questa tesi) tale per cui, in ogni ciclo di oscillazione, si abbia la stessa quantità di energia dissipata nel sistema reale.

Tenendo conto dello smorzamento l'equazione del moto diventa:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.14)$$

la quale è una equazione differenziale del secondo ordine a coefficienti costanti. Posto:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (3.15)$$

la Eq.(3.14) può essere riscritta come:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3.16)$$

dalla quale è possibile ottenere le soluzioni non banali annullando il polinomio caratteristico:

$$\lambda^2 + \frac{c}{m} \lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (3.17)$$

le cui radici sono:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega_0^2} \quad (3.18)$$

Si hanno due radici distinte dell'equazione caratteristica. L'integrale generale che definisce il moto del sistema, è dato dalla combinazione dei due integrali particolari:

$$x(t) = X_1 e^{\lambda_1 t} + X_2 e^{\lambda_2 t} \quad (3.19)$$

L'andamento della soluzione dipenderà quindi dal segno del discriminante della Eq.(3.18). Si definisce "smorzamento critico" del sistema c_c , quel valore dello smorzamento c che annulla il discriminante

$$c_c = 2 m \omega_0 \quad (3.20)$$

Denominiamo con ξ il fattore di smorzamento, ossia il rapporto tra lo smorzamento effettivo del sistema e lo smorzamento critico:

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega_0} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.21)$$

La Eq.(3.18) può essere riscritta come:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c\omega_0}{2m\omega_0} \pm \sqrt{\left(\frac{c\omega_0}{2m\omega_0}\right)^2 - \omega_0^2} \quad (3.22)$$

dalla quale raccogliendo ω_0 e tenendo conto della Eq.(3.21) si può scrivere:

$$\lambda_{1,2} = \omega_0 \left(-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \quad (3.23)$$

Il problema si riduce nel distinguere i casi in cui $\xi < 1$ oppure $\xi > 1$. Nel primo si è in condizioni di sistema sotto-smorzato (caso di interesse di questa tesi), quindi il sistema tende a oscillare per poi arrivare a fermarsi, nel secondo si è in condizione di sistema sovra-smorzato dove il sistema tende ad arrestarsi immediatamente.

3.2.2.1 SMORZAMENTO MINORE DI QUELLO CRITICO

Nel caso di sistema con $\xi < 1$, il radicando della Eq.(3.23) è negativo e la rispettiva radice risulta quindi un numero immaginario. Le soluzioni $\lambda_{1,2}$ sono, per tale motivo, complesse coniugate con parte reale negativa:

$$\lambda_{1,2} = \omega_0(-\xi \pm i\sqrt{1 - \xi^2}) = -\alpha \pm i\omega \quad (3.24)$$

dove:

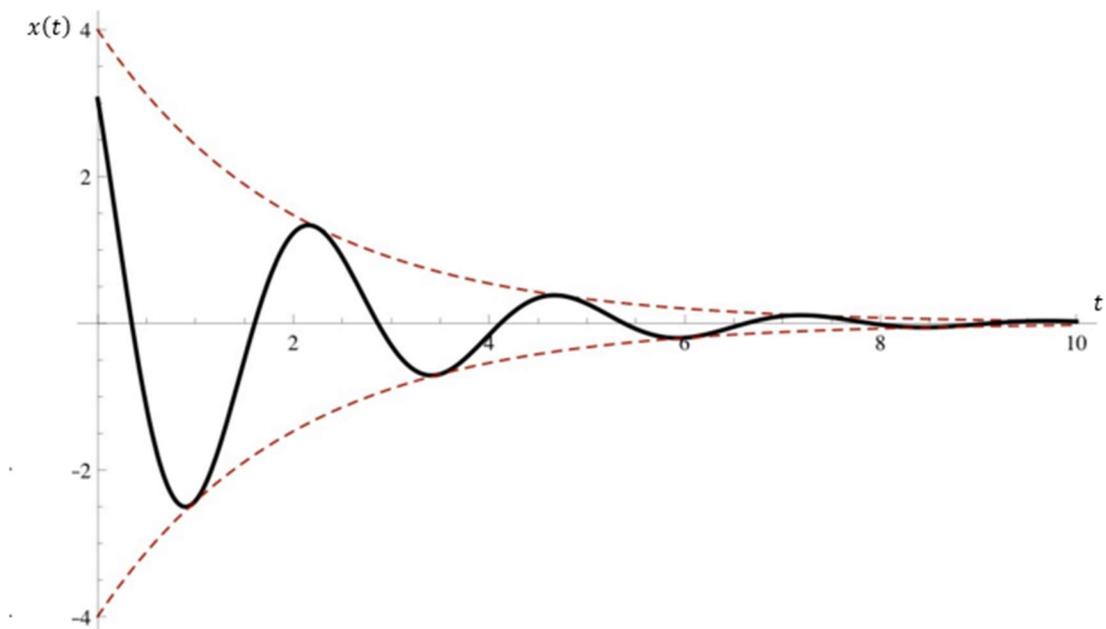
$$\omega = \omega_0\sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.25)$$

$$\alpha = \xi \omega_0 \quad (3.26)$$

essendo ω la pulsazione propria del sistema smorzato.

Sostituendo le soluzioni dell'equazione caratteristica nella Eq.(3.19) e omettendo alcuni passaggi si ottiene:

$$x(t) = X e^{-\xi\omega_0 t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.27)$$



*Figura 3.4
Andamento delle oscillazioni con $\xi < 1$*

Dalla Eq.(3.27) si vede come, in presenza di smorzamento minore dello smorzamento critico, il moto sia rappresentato da una oscillazione con pulsazione ω e ampiezza decrescente a causa della presenza dell'esponenziale negativo. Nel metodo di valutazione dello smorzamento applicato in questa tesi si è applicata la funzione logaritmo a tale

esponenziale ottenendo così un andamento lineare decrescente, quindi si è trovato il coefficiente angolare di quest'ultimo ed infine il fattore di smorzamento ξ .

Nel caso con basso valore dello smorzamento ($\xi \ll 1$), la pulsazione ω del moto smorzato e quella del moto non smorzato praticamente coincidono:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \approx \omega_0 \quad (3.28)$$

E' equivalente dire che la frequenza di oscillazione del sistema smorzato coincide con la frequenza naturale.

Capitolo 4

Setup sperimentale

Nel seguente capitolo verranno enunciate, in ordine cronologico, le fasi necessarie alla messa a punto dell'intero sistema utilizzato per effettuare una corretta acquisizione dei dati richiesti, utili alla caratterizzazione dello smorzamento. Tali operazioni sono state effettuate all'interno della galleria del vento dell'università di Genova (si veda appendice A), in quanto, questo setup sperimentale, è stato realizzato per il successivo studio di fenomeni aeroelastici.

4.1 MONTAGGIO DEL TELAIO

In prima fase si è eseguito il montaggio del telaio, composto da profilati d'alluminio, atto a supportare il sistema "corpo oscillante".

Volendo ottenere risultati il più possibile attendibili, si è cercato di rendere il supporto più rigido possibile, in modo da evitare, durante l'eccitazione del modello, che il telaio potesse vibrare o flettersi compromettendo i risultati. Per fare ciò, si sono disposti verticalmente quattro profilati e, longitudinalmente alla camera del vento, quattro profilati più corti che ricoprissero il ruolo di traverse. Come interasse tra due coppie di traverse si è considerata una distanza orizzontale pari alla lunghezza del corpo a sezione quadrata. Successivamente, alle traverse, sono stati uniti esternamente dei profilati che avessero una funzione di supporto per l'aggancio delle molle e per il posizionamento dei laser.

Per diminuire il disturbo provocato alla corrente fluida dal telaio circostante, sono stati aggiunti anche degli emplates.

4.2 AGGANCIAMENTO E PRETENSIONAMENTO DELLE MOLLE

Per poter avere, a modello montato, la sicurezza che sotto sollecitazione non si giungesse ad una situazione cosiddetta "a pacco delle molle" (che avrebbe influenzato le misurazioni successive), le quattro molle sono state allungate fino a metà della loro estensione massima. Quanto sopra si è potuto realizzare montando prima le traverse inferiori e agganciandovi il complesso molla-boccola-molla (necessario a supportare il corpo tozzo) e, successivamente, ancorando la molla superiore alla traversa superiore, la quale è stata lasciata libera di scorrere lungo il telaio. Con l'ausilio di una barra filettata si è eseguito il pretensionamento delle quattro molle, fissando, una volta che il corpo avesse raggiunto metà dell'altezza della galleria del vento, le traverse superiori (si veda Fig.4.2)

Chiaramente, le traverse inferiori, all'inizio del pretensionamento, sono state fissate in modo che, conoscendo l'allungamento delle due molle, una volta pretensionato il complesso in modo che le due molle avessero una estensione pari a metà dell'estensione massima, il modello risultasse a metà dell'altezza della galleria del vento.



Figura 4.1
Complesso molla-boccola-molla



Figura 4.2
Vista in prospettiva del setup dove si possono osservare due dei quattro profilati verticali e due traverse orizzontali. Si noti inoltre il complesso molla-boccola-molla



Figura 4.3
Particolare degli agganci inferiore e superiore delle molle alle traverse

4.3 UNIONE DEL MODELLO AGLI ORGANI DI COLLEGAMENTO

Dopo l'operazione di pretensionamento delle molle si è passati al montaggio sul corpo di organi di collegamento che permettessero l'unione alle boccole. Avendo il corpo sezione quadrata cava, ha permesso il passaggio al suo interno di due barre filettate necessarie per l'accoppiamento con gli organi di collegamento. Inoltre, all'estremità di una delle due barre filettate, sono state collegate le due biforcazioni di un cavo d'acciaio collegato a sua volta alla piastra d'alluminio, componente principale dell'organo smorzatore (si veda Fig.4.4)



Figura 4.4
Corpo oscillatore collegato alla piastra d'alluminio

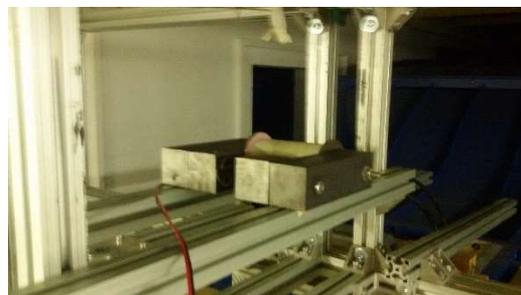


Figura 4.5
Elettromagnete a forma di 'ferro di cavallo' dove, all'interno del traferro, è stata collocata la piastra d'alluminio

4.4 FISSAGGIO DEL CORPO SULLE BOCCOLE DI SUPPORTO

Unito il corpo agli organi di collegamento, questi sono stati accoppiati con le boccole di supporto. Prima di effettuare il bloccaggio all'interno di quest'ultime, si è posizionata la piastra nel traferro dell'elettromagnete, collegandola superiormente al telaio principale della galleria del vento, tramite due molle di rigidità trascurabile.

Prima di procedere al bloccaggio nelle boccole, con l'ausilio di una bolla digitale, si è verificato che l'inclinazione trasversale e longitudinale del corpo fosse nulla. Tale inclinazione è stata imposta nulla sia per avere una simmetria di azione della forze agenti durante l'impulso di eccitazione, sia per avere, nei successivi studi dei fenomeni aeroelastici, un angolo di attacco con la corrente fluida pari a zero.

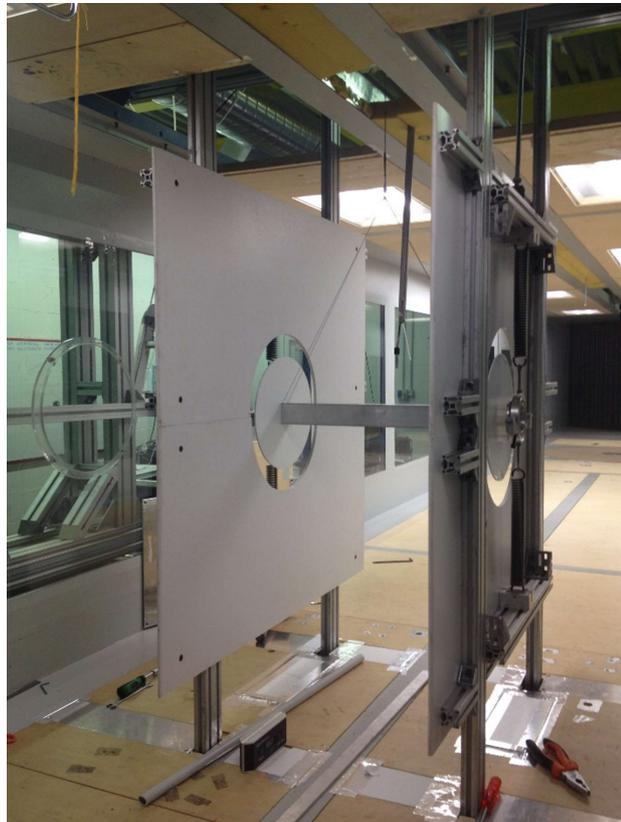


Figura 4.6
Modello montato sul telaio

4.5 POSIZIONAMENTO DEI LASER

Su piastre lunghe circa trenta centimetri sono stati fissati i laser. Successivamente, si sono ancorate le piastre al telaio,

in modo da posizionare l'occhio del laser a una distanza di 120 millimetri da un blocchetto di riferimento solidale al corpo oscillatore. Terminato il posizionamento, si sono collegati i laser al calcolatore per poter effettuare, tramite software **Labview**, l'acquisizione dei dati.



*Figura 4.7
Particolare dei laser montati*

4.6 ACQUISIZIONE DEL SEGNALE

Terminato il montaggio della struttura portante, del modello e dei laser per l'acquisizione delle oscillazioni dello stesso, sono stati acquisiti i valori dei tre laser in configurazione di riposo, al fine di rilevare la misura dello zero. Per effettuare questa prima acquisizione (e poi le successive altre), si è usato il programma Labview® (si veda interfaccia grafica in Fig.4.8), il quale salva i dati in un file di tipo binario.

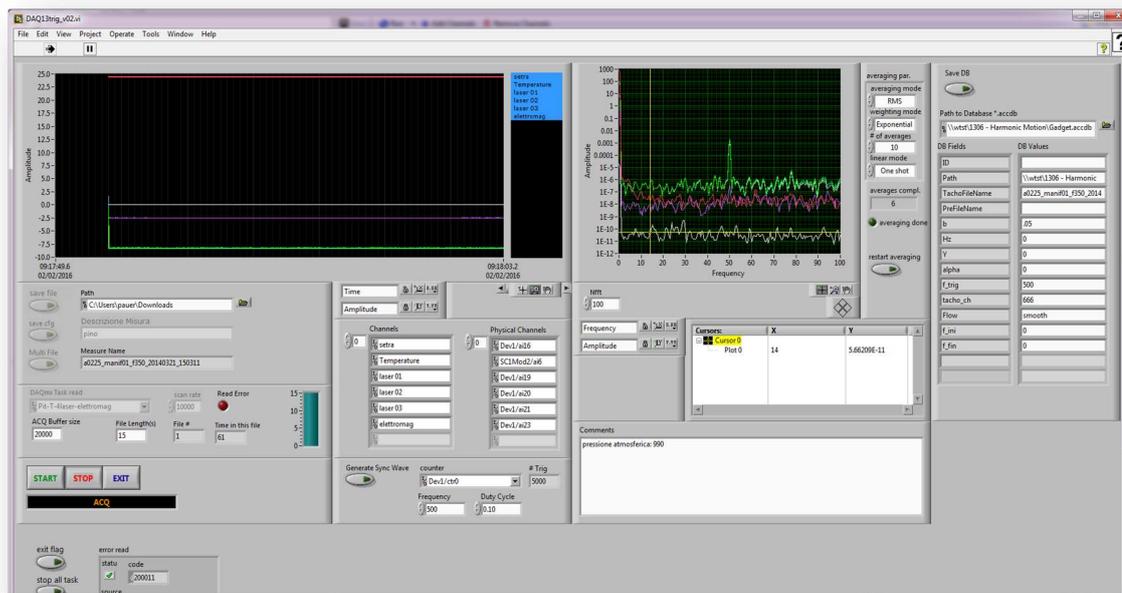


Figura 4.8
Interfaccia grafica del software Labview®

A questo punto partendo da un valore di 0 A circolante nell'elettromagnete, si è urtato (utilizzando un martello gommato) il modello nella sua direzione ortogonale, in modo tale che quest'ultimo iniziasse a vibrare, fermando l'acquisizione quando le oscillazioni fossero state di entità trascurabile.

Questa procedura è stata poi applicata a tutti i valori di amperaggio. La corrente circolante nell'elettromagnete è stata controllata tramite un regolatore analogico di amperaggio.

Capitolo 5

Processo di elaborazione dei dati acquisiti tramite software Matlab®

Per l'analisi relativa ai dati acquisiti durante il lavoro svolto presso la galleria del vento, si è deciso di sfruttare le potenzialità del software Matlab® (abbreviazione di MATrix LABoratory).

“Matlab® è un linguaggio di alto livello e l'ambiente interattivo usato da milioni di ingegneri e scienziati in tutto il mondo. Consente di esplorare, visualizzare idee e di collaborare in diverse discipline, incluse l'elaborazione di segnali, di immagini, i sistemi di telecomunicazione e il progetto del controllo. Consente inoltre di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, creare grafici e interfacciarsi con altri programmi”.

5.1 ELABORAZIONE DATI

5.1.1 RICERCA DEI VALORI DELLO ZERO PER OGNI LASER

Con l'ausilio di Matlab, è stato richiamato il file relativo ai valori dello zero, mediante una funzione che rendesse possibile sul programma l'utilizzo di file binari, trasformando questi in una matrice di sei colonne e di righe pari al prodotto tra la frequenza di acquisizione (2000 hertz) e il tempo (in secondi) impiegato per l'acquisizione (circa 33 secondi).

Lavorando su questa matrice ci si è focalizzati sulle colonne 3,4 e 5, cioè quelle relative ai dati acquisiti dai laser, le quali forniscono un valore espresso in millimetri. Pur essendo i valori di ogni singola colonna pressoché identici per ogni singola riga, si è fatta la media di tutti i valori sulle 3 colonne, utilizzando la funzione Matlab® **mean**, ottenendo quindi un valore mediato di zero per ogni singolo laser.

Righe di comando utilizzate:

```
filename='zero_20151116_095424_001_fast.dat'  
ph='C:\Users\Edoardo\Desktop\Universita\TESI  
LAUREA\Matlab\caratterizzazione smorzamento\  
[mi, Dt2, zz] = load_bin_13([ph filename(1:end-4)]);  
  
zero=mi(:,3:5);  
zero_media=mean(zero);
```

	1	2	3	4	5	6
1	0.0057	24.1179	1.2794	-0.3235	-0.8436	2.5108
2	0.0069	24.1306	1.2714	-0.3704	-0.8175	2.5059
3	0.0059	24.1391	1.3070	-0.3393	-0.8370	2.5124
4	0.0062	24.1349	1.3180	-0.3109	-0.8331	2.5059
5	0.0059	24.1391	1.3152	-0.2523	-0.8009	2.5034
6	0.0056	24.1179	1.3422	-0.4636	-0.8235	2.5041
7	0.0051	24.1349	1.2317	-0.4813	-0.8460	2.5063
8	0.0056	24.1391	1.2868	-0.3692	-0.8468	2.5050
9	0.0059	24.1306	1.3374	-0.3077	-0.8077	2.5011
10	0.0051	24.1222	1.2584	-0.2295	-0.7783	2.5063
11	0.0059	24.1306	1.2918	-0.4088	-0.7579	2.5048
12	0.0057	24.1603	1.2672	-0.3480	-0.8267	2.5049
13	0.0051	24.1349	1.2464	-0.3143	-0.8205	2.5089
14	0.0044	24.1306	1.3737	-0.3658	-0.8436	2.5054
15	0.0068	24.1391	1.3040	-0.3588	-0.8432	2.5038
16	0.0051	24.1349	1.2277	-0.3848	-0.8233	2.5042
17	0.0042	24.1391	1.3100	-0.3950	-0.8370	2.5044

Figura 5.1
 Matrice ottenuta dal file binario nella quale sono evidenziate le tre colonne relative ai laser (si sono evidenziate solo le prime 17 righe)

	1	2	3
1	1.2737	-0.3777	-0.8405
2			

Figura 5.2
 Valori dei tre zeri ottenuti

5.1.2 SOTTRAZIONE DEL VALORE DELLO ZERO ALLE MISURE DEI LASER

Per ogni valore di amperaggio si è ottenuto un file di tipo binario ogni 30 secondi circa di acquisizione. Ovviamente, visto che, per bassi valori di amperaggio della corrente circolante nell'elettromagnete e quindi bassi valori di smorzamento, una volta dato l'impulso (martellata), il modello oscillerà per un tempo maggiore rispetto ad alti valori di amperaggio, sono stati creati da un massimo di 4 ad un minimo di 1 file di acquisizione proporzionalmente all'aumento di amperaggio. La struttura della matrice ottenuta da ogni singolo file è la stessa di quella che è stata ottenuta per il valore dello zero.

Nel caso in cui i file fossero stati in numero maggiore di uno, mediante un ciclo **for**, si è creata una matrice **MI** contenente le matrici relative ad ogni singolo file.

Righe di comando utilizzate:

```
fails=dir([ph num2str(AMP*10, '%03d') 'A_*_fast.dat']);
MI=[];
for i =1:numel(fails)
    neim= fails(i).name(1:end-4);
    [mi, Dt, zz] = load_bin_13([ph neim]);
    MI= [MI; mi];
end
```

A questo punto, è stato sottratto il valore dello zero alle colonne relative alle misurazioni dei laser. Quindi, per ogni acquisizione ottenuta dai tre laser, è stata fatta la media, ottenendo un vettore di lunghezza pari al numero di acquisizioni ottenute nell'arco temporale.

Dovendo plottare un grafico con, in ascisse, il tempo e, in ordinate, il valore mediato dei tre laser, si è costruito un vettore tempo, moltiplicando il numero di righe della matrice **MI** per il periodo di acquisizione.

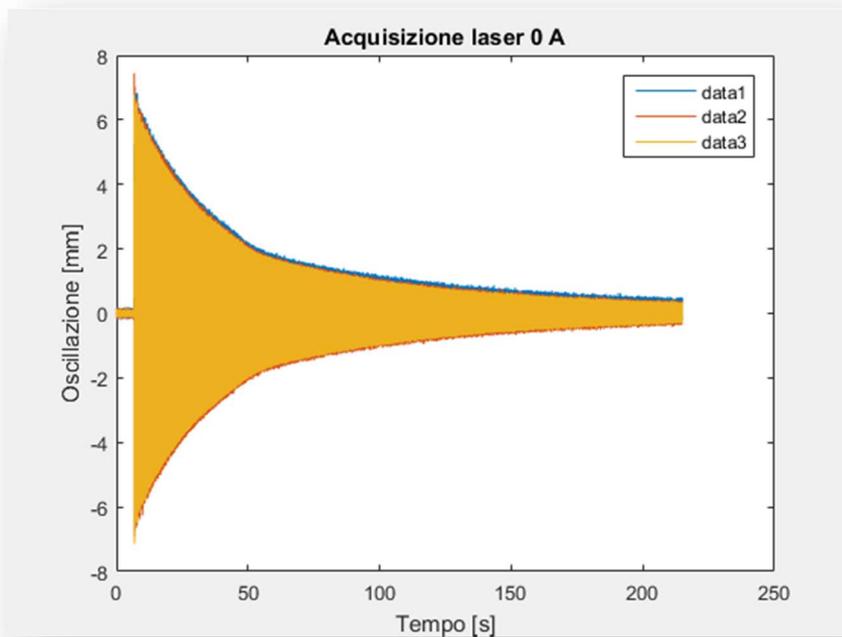


Figura 5.3
Grafico dei tre diversi laser con amperaggio pari a 0

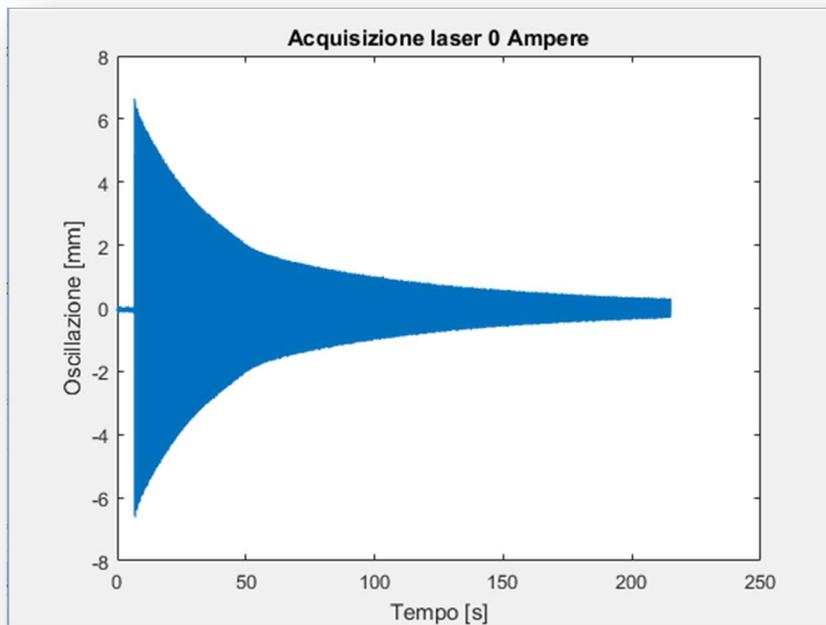


Figura 5.4
Grafico oscillazione-tempo ottenuto mediando i tre laser per il valore di amperaggio uguale a 0

5.2 FILTRAGGIO DEL SEGNALE

Essendo il segnale di risposta dei laser relativamente disturbato dal rumore, occorre filtrarlo con un filtro “passa-basso”, ossia un filtro che permetta il passaggio delle basse frequenze, del tipo “Butterworth”. Nel caso in esame è stato imposto come tetto massimo alle frequenze il valore di 20 hertz.

Il filtro è stato creato usando un tool di Matlab® chiamato “Filter Design & Analysis”, che permette anche la creazione di filtri del tipo “passa-alto”, “passa-banda”, etc.

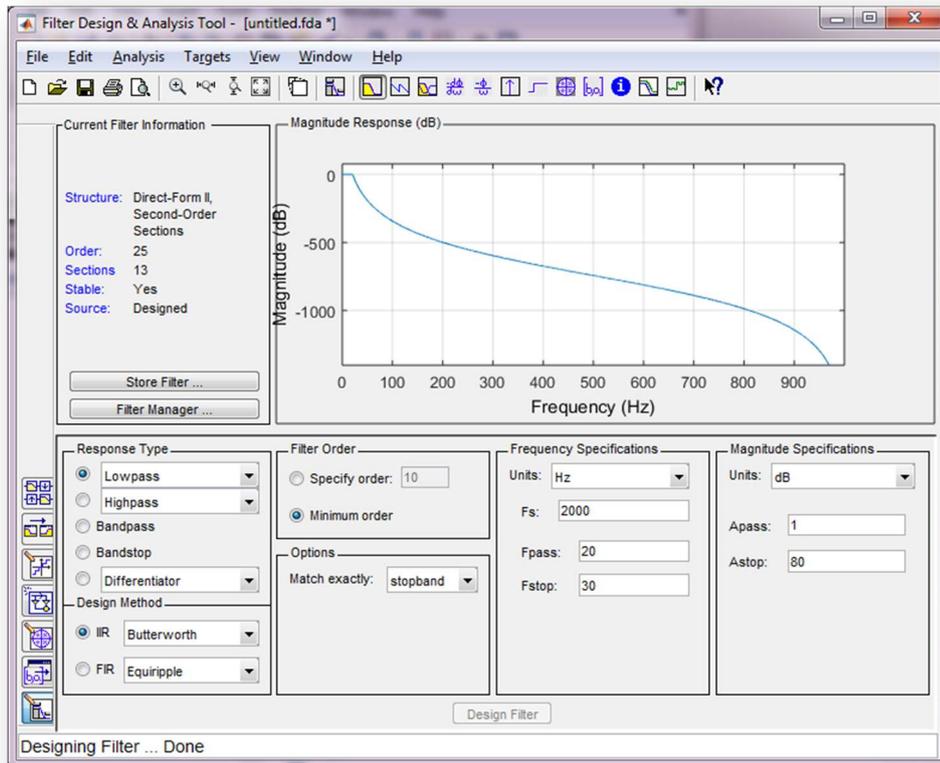


Figura 5.5
Esempio di interfaccia grafica di Matlab® per la creazione di filtri

5.3 VALUTAZIONE DELLO SMORZAMENTO

Per eseguire questa analisi si sono considerati valori di amperaggio compresi nell'intervallo 0-3.6 A, con un passo di 0.4 A. Ovviamente, per ogni valore della corrente, si è ottenuto un grafico come quello di Fig. 5.4, dove, all'aumentare dell'amperaggio, l'ampiezza iniziale risulta diminuire sotto l'impulso di un carico pressoché costante. Si noti che, questi grafici, hanno tutti andamento decrescente pseudo-periodico, secondo le curve $e^{-\xi\omega_n t}$, dove ξ è definito coefficiente di smorzamento e ω_n pulsazione naturale.

Per caratterizzare lo smorzamento, si è deciso di utilizzare due metodi diversi e confrontarne i risultati.

5.3.1 METODO UNO: FIT LINEARE

Il primo metodo è stato applicato ai grafici dei segnali filtrati, per ogni valore di amperaggio considerato. L'idea principale è stata quella di approssimare l'andamento decrescente dei picchi positivi con una curva esponenziale e, successivamente, utilizzando la funzione logaritmo, ottenere un andamento lineare; ciò permette di trovare il coefficiente angolare della suddetta retta, dal quale si può ricavare, dividendo per $-\omega_n$, il coefficiente di smorzamento.

Tramite la funzione Matlab® **ginput**, viene chiesto all'utente di selezionare due punti, uno di inizio e uno di fine intervallo, nel dominio del tempo. Nello specifico, questa funzione, richiede la costruzione del grafico, in modo tale che si possano selezionare direttamente con il mouse del computer i due o più punti di interesse. **ginput** costruisce due vettori contenenti rispettivamente i valori di ascisse e ordinate dei punti selezionati, di cui solo il primo è di interesse per la trattazione. Come criterio di scelta del punto di inizio è consigliabile selezionare un istante di tempo che permetta di tagliare fuori dall'intervallo gli istanti iniziali della misurazione in quanto potrebbero presentarsi oscillazioni di tipo casuale dovute all'imprecisione dell'impulso manuale.

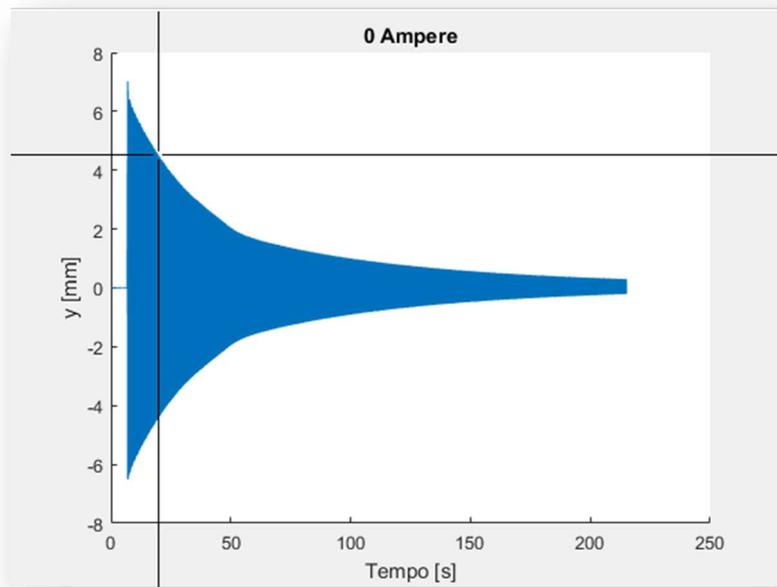


Figura 5.6
Selezione del punto iniziale dell'intervallo di interesse

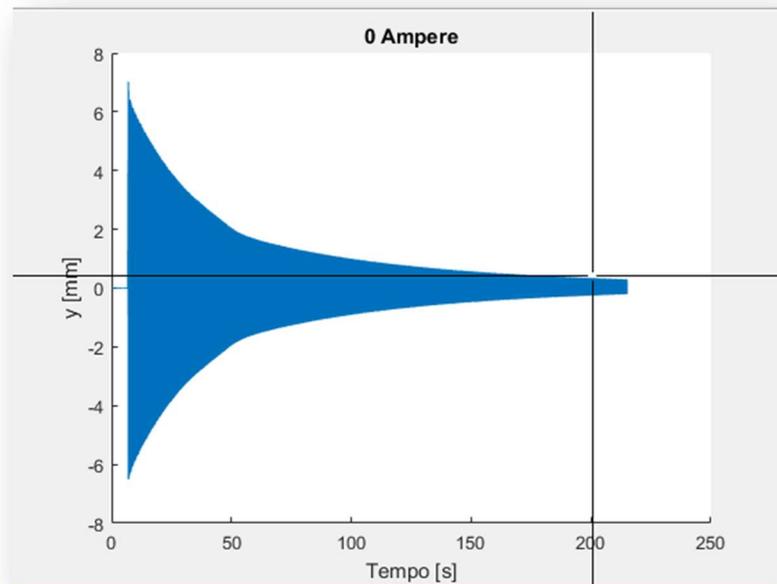


Figura 5.7
Selezione del punto finale dell'intervallo di interesse

Successivamente si è calcolata la frequenza media delle oscillazioni, calcolando la distanza tra i singoli picchi del grafico, facendone la media e trovandone il reciproco ($f=1/T$), arrivando al valore di circa 13,18 hertz. Per il calcolo della distanza tra i singoli picchi si è sfruttata la funzione Matlab® **findpeaks**, che restituisce due vettori contenenti, rispettivamente, i valori di ordinate e ascisse di ogni singolo picco presente nell'intervallo considerato e, successivamente, tramite l'ausilio di un ciclo **for**, si sono calcolate le distanze e se ne è fatta la media.

Righe di comando utilizzato:

```
T_ciclo=[]
    for n=1:(length(locsk)-1)
        ampiezza=pksk(1);
        periodo=locsk(n+1)-locsk(n);
        T_ciclo=[T_ciclo periodo];

    end
    ampiezza=pksk(1);
    Ampiezza=[Ampiezza ampiezza];
    T_medio_ciclo=mean(T_ciclo);
    T=[T T_medio_ciclo];
    omega_ciclo=(2*pi)/T_medio_ciclo;
    frequenza_ciclo=1/T_medio_ciclo;
```

Visto che, approssimare l'andamento decrescente dei picchi dell'intervallo con una singola curva, e quindi ottenere un solo coefficiente di smorzamento, sarebbe risultato impreciso, si è preferito procedere nel seguente modo.

Si è deciso di suddividere l'intero intervallo in 50 sotto-intervalli, che contenessero ciascuno 50 picchi e, quindi, per ogni valore di amperaggio, effettuare 50 fit lineari differenti, in modo da ottenere 50 diversi valori di smorzamento. Questi sono stati poi mediati al fine di ottenere un singolo valore di smorzamento per ogni amperaggio

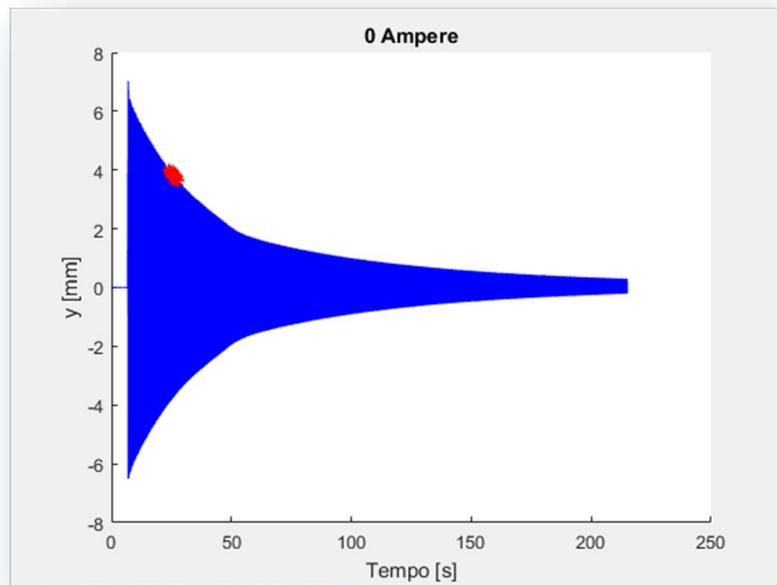


Figura 5.8
Evidenziati in rosso i 50 picchi del primo dei cinquanta intervalli

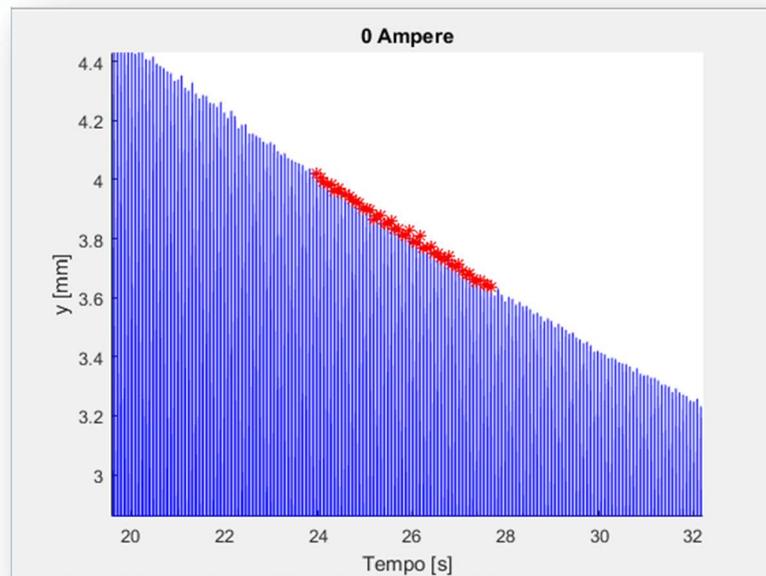


Figura 5.9
Zoom di Fig. 5.8

Per calcolare il tempo in cui si sviluppano 50 picchi, si è diviso il numero di cicli (50 cicli corrispondono a 50 picchi) per la frequenza precedentemente calcolata, ottenendo un valore circa pari a circa 3,8 secondi. Quindi si è costruito un vettore **tt1**, formato da 50 elementi, sottoinsieme del vettore tempo **t**, tramite la funzione matlab **linspace**.

Questa funzione permette la creazione di un vettore di n elementi equidistanti l'uno dall'altro, tra i punti iniziale e finale scelti dall'utente. Nel caso in esame l'estremo iniziale dell'intervallo corrisponde al punto scelto graficamente dall'utente, mentre l'estremo finale corrisponde al secondo punto sempre scelto dall'utente al quale viene però sottratto il tempo in cui si sviluppano 50 picchi (3,8 s).

Inoltre si è costruito anche un vettore **tt2**, della stessa dimensione del vettore **tt1**, che ha, come primo elemento, il punto iniziale scelto dall'utente, a cui viene sommato il tempo necessario allo sviluppo di 50 cicli, e, come punto finale, l'estremo finale scelto graficamente dall'utente.

$$\mathbf{tt2}=\mathbf{tt1}+3,8\mathbf{s}$$

Righe di comando utilizzate:

```
cicli=50;
display('seleziona istante iniziale e finale ')
[tinifin zz]=ginput(2);

freq=13.18; %hz
taimcicli=cicli/freq; %tempo in cui ci sono 50 picchi

quanti = 50;
tt1=linspace(tinifin(1),tinifin(2)-taimcicli,quanti);
tt2=tt1+taimcicli;
```

Visto che si è deciso di dividere l'intero intervallo in 50 sotto-intervalli, è stato conveniente utilizzare un ciclo **for**; questo, trovando la posizione sul vettore **t** dell' k-esimo elemento di **tt1** e **tt2**, mediante la funzione **findpeaks**, ha permesso di trovare i 50 picchi compresi tra **tt1(k)** e **tt2(k)**.

L'indice k viene fatto variare tra 1 e la dimensione dei vettori **tt1** e **tt2** che è 50.

La funzione **findpeaks** ha anche restituito un vettore chiamato **pksk**, contenente i valori dei 50 picchi contenuti nell'intervallo. Quindi, sfruttando il fatto che le curve hanno andamento $e^{\xi\omega_n t}$, si è applicato il logaritmo naturale a tale vettore.

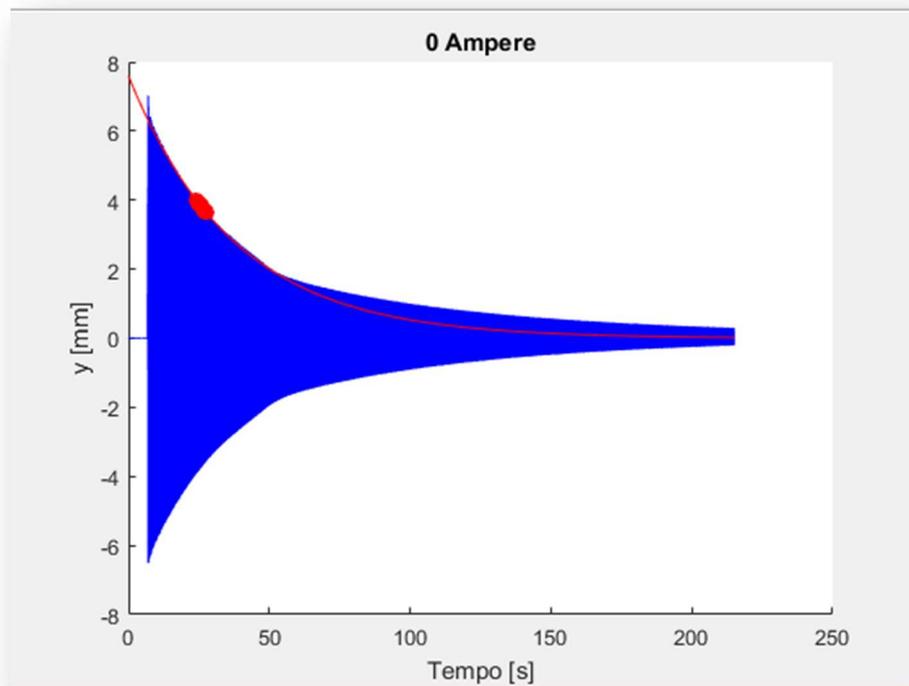


Figura 5.10

Decremento esponenziale dei primi 50 picchi; si noti che sono compresi in un intervallo di circa 3.8 s

All' interno dello stesso ciclo **for** si deve procedere trovando una retta che approssimi l'andamento appena riportato; ciò è reso possibile dall'impiego della funzione matlab **polyfit**. Quest'ultima ritorna all'utente un vettore con i coefficienti del polinomio di grado n , che meglio approssima l'andamento dei punti ottenuti sperimentalmente. Nel vettore ottenuto, i coefficienti sono in ordine di potenza decrescente e la dimensione del vettore è $n+1$ (nel caso in esame, volendo approssimare l'andamento con una retta, la dimensione è risultata pari a due).

Successivamente è stata utilizzata la funzione **polyval**, la quale ritorna un vettore contenente i valori del polinomio costruito precedentemente su tutto l'arco temporale dell'intera prova.

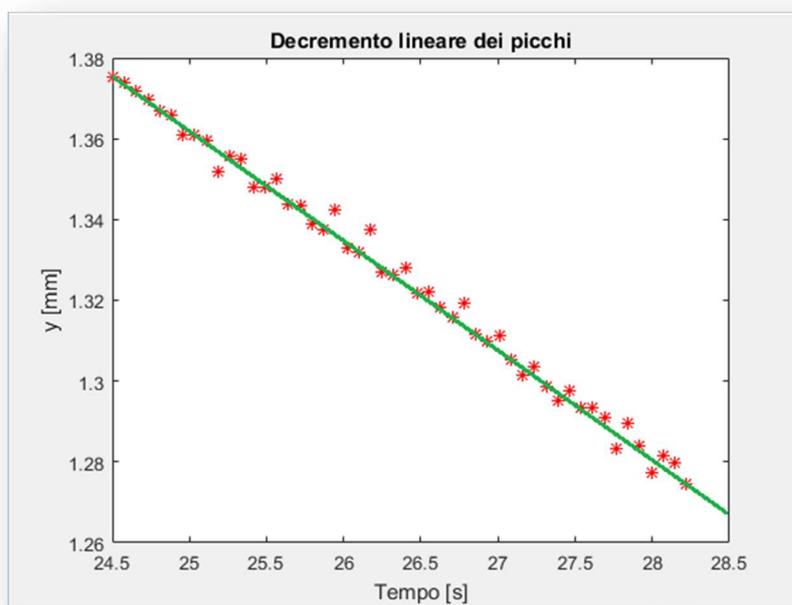


Figura 5.11
*In verde, la retta costruita con le due funzioni Matlab® **polyfit** e **polyval**, in rosso, l'insieme dei picchi compresi nel primo dei 50 intervalli*

Si deve notare che, essendo il polinomio ottenuto con la funzione **polyval**, di primo grado, il vettore ottenuto dalla funzione **polyfit** conterrà soltanto due elementi, di cui il primo risulta corrispondere al coefficiente angolare della retta appena disegnata. Tale coefficiente sarà pari a $-\omega_n \xi$.

Quindi, dividendo il coefficiente angolare per $-\omega_n$, si può ricavare il primo dei 50 fattori di smorzamento ξ .

Quindi, al termine di ogni fase del ciclo **for**, si ottiene un diverso valore di ξ , il quale, viene salvato in un vettore che, nel caso in esame, è stato chiamato **Z_fit_50**.

Righe di comando utilizzate:

```
p=polyfit(loclk,pksk_log,1);
    damp=polyval(p,t);
plot(t,exp(damp),'r')
    plot(t,(damp),'g')
    zc=p(1);    %coefficiente angolare retta, per ogni
amperaggio

    T_ciclo=[]
    for n=1:(length(loclk)-1)
        ampiezza=pksk(1);
        periodo=loclk(n+1)-loclk(n);
        T_ciclo=[T_ciclo periodo];

    end
    ampiezza=pksk(1);
    Ampiezza=[Ampiezza ampiezza];
    T_medio_ciclo=mean(T_ciclo);
    T=[T T_medio_ciclo];
    omega_ciclo=(2*pi)/T_medio_ciclo;
    frequenza_ciclo=1/T_medio_ciclo;
    z=(-zc)/omega_ciclo;
    Z_fit_50=[Z_fit_50 z];
```

Al termine del ciclo **for**, il vettore **Z_fit_50** sarà composto da 50 diversi elementi.

Facendone la media si otterrà il valore desiderato, cioè il coefficiente di smorzamento riferito all'amperaggio in esame. Modificando poi il valore della corrente in entrata e ripetendo quanto detto finora per ogni singolo incremento di 0.4 Ampere, si otterrà un valore diverso per ogni amperaggio.

5.3.2 METODO DUE: DECREMENTO LOGARITMICO

5.3.2.1 INTRODUZIONE AL MODUS OPERANDI

Un intelligente misura del grado di smorzamento di un sistema a un singolo grado di libertà è misurare lo scarto di altezza alla fine di un ciclo di vibrazione.

Per illustrare l'idea possiamo considerare un andamento oscillatorio smorzato come quella di Fig.5.12.

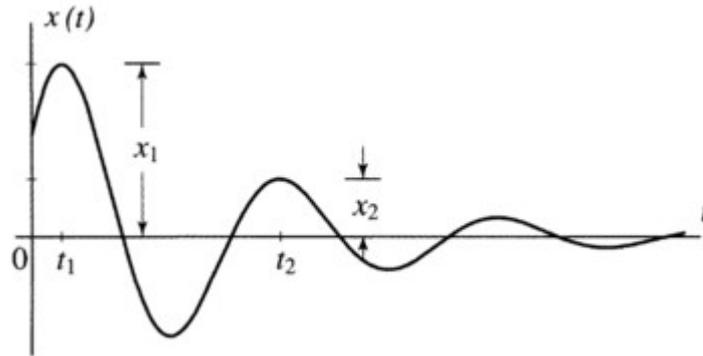


Figura 5.12

Esempio di andamento oscillatorio di un sistema smorzato

Tale andamento oscillatorio avrà equazione:

$$x(t) = C e^{-\xi \omega_n t} \cos(\omega t - \phi) \quad (5.1)$$

Si noti che t_1 e t_2 sono gli istanti temporali corrispondenti ai primi due picchi, mentre x_1 e x_2 corrispondono alle rispettive altezze.

Si introduca il rapporto x_1/x_2 :

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{C e^{-\xi \omega_n t_1} \cos(\omega t_1 - \phi)}{C e^{-\xi \omega_n t_2} \cos(\omega t_2 - \phi)} = \frac{e^{-\xi \omega_n t_1} \cos(\omega t_1 - \phi)}{e^{-\xi \omega_n t_2} \cos(\omega t_2 - \phi)} \quad (5.2)$$

Data la periodicità della funzione $x(t)$, risulta:

$$t_2 = t_1 + T \quad (4.3)$$

Da cui:

$$\begin{aligned} \frac{x_1}{x_2} &= \frac{e^{-\xi \omega_n t_1} \cos(\omega t_1 - \phi)}{e^{-\xi \omega_n (t_1 + T)} \cos(\omega (t_1 + T) - \phi)} = \frac{e^{\xi \omega_n T} \cos(\omega t_1 - \phi)}{\cos(\omega t_1 - \phi + 2\pi)} = e^{\xi \omega_n T} = e^{\frac{\xi \omega_n 2\pi}{\omega}} \\ &= e^{\xi 2\pi / \sqrt{1 - \xi^2}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Applicando la funzione logaritmo naturale a entrambi i membri dell' Eq.(5.4), si ottiene:

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (5.5)$$

Dove δ viene chiamato **decremento logaritmico**. Il risultato della Eq.(5.5) rispetto a ξ è dato dalla seguente equazione:

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (5.6)$$

Che, per sistemi sotto-smorzati, dove $\xi \ll 1$, dalla Eq.(5.5) si ottiene:

$$\xi \cong \frac{\delta}{2\pi} \quad (5.7)$$

Quindi si è ricavata l'espressione del fattore di smorzamento in funzione dell'altezza dei picchi consecutivi.

5.3.2.2 APPLICAZIONE DEL METODO DUE AL CASO IN ESAME

Anche nel secondo metodo, si è proceduto chiedendo all'utente di selezionare un punto di inizio e un punto di fine relativi all'intervallo scelto sul dominio del tempo. Procedendo nel modo riportato per il metodo del fit lineare, tale intervallo è stato suddiviso in 50 sotto-intervalli, contenenti ognuno 50 picchi. Il primo passo è stato costruire, attraverso l'ausilio di un ciclo **for**, un vettore contenente i rapporti di ogni picco rispetto al successivo, all'interno di ogni sotto-intervallo. Ovviamente, considerando ogni singola fase del ciclo **for**, il vettore, chiamato **Dlin**, conterrà 49 elementi.

Successivamente, procedendo come mostrato nell'introduzione al metodo utilizzato, si è applicata la funzione logaritmo naturale ai 49 elementi del vettore **Dlin** (si veda Eq.(5.5)).

Dividendo ciascun elemento per la quantità 2π (si veda Eq.(5.7)), si sono ottenuti 49 diversi valori del fattore di smorzamento che, mediati tramite la funzione **mean**, hanno fornito il valore del coefficiente di smorzamento riferito al primo dei 50 sotto-intervalli.

Righe di comando utilizzate:

```
Dlin=[]
    for h=1:(length(locsk)-1)
        dlin=pksk(h)/pksk(h+1);
        Dlin=[Dlin dlin];
    end
    Dlog=log(Dlin);
    z_eng=Dlog/(2*pi);
    Z_eng_50=[Z_eng_50 mean(z_eng)];
close(k)
end
```

Considerando lo stesso procedimento per i restanti 49 sotto-intervalli, si è ricavato un valore di smorzamento per ogni singolo sotto-intervallo. Mediando, i 50 fattori così ottenuti, grazie alla funzione **mean**, si è ricavato un singolo ξ per il valore di amperaggio considerato.

5.4 RISULTATI

Entrambi i metodi appena illustrati, sono stati applicati a diversi valori di corrente circolante nell'elettromagnete; si ricorda che si sono considerati valori di corrente compresi tra 0 A e 3.6 A ad intervalli di 0.4 A. Infatti per ogni amperaggio considerato, si sono dovuti scegliere sempre un punto iniziale e un punto finale, al fine di determinare l'intervallo temporale di acquisizione dati da elaborare (si veda Fig.5.6 e Fig.5.7). Anche in questo caso per poter rendere possibile tale procedura, è stato necessario costruire un ciclo **for**, il quale indice è stato fatto variare nell'intervallo di corrente considerato con passo di 0.4.

Righe di comando utilizzate:

```
for nn=0:0.4:3.6

    AMP=n
    fails=dir([ph num2str(AMP*10, '%03d') 'A_*_fast.dat']);
    MI=[];
    for i =1:numel(fails)
        neim= fails(i).name(1:end-4);
        [mi, Dt, zz] = load_bin_13([ph neim]);
        MI= [MI; mi];
    end
```

Per quanto riguarda i file ottenuti, relativi ai diversi valori di corrente, durante l'acquisizione dati tramite il software Labview®, nel rinominarli è stato inserito il valore dell'amperaggio corrispondente. Nelle righe di comando utilizzate, si vede la funzione Matlab® **num2str**, utilizzata per poter far riconoscere al programma il file da elaborare, in modo del tutto automatico. La funzione **num2str** converte un array numerico in una stringa.

Quindi all'interno di questo ciclo **for** sono stati inseriti i codici Matlab® riferiti al metodo uno e due. Al termine di ogni iterazione del suddetto ciclo, si sono ottenuti due fattori di smorzamento, corrispondenti rispettivamente ai due metodi utilizzati. Per ogni valore di corrente applicata, si è costruita una matrice di due righe e cinquanta colonne nella quale si sono inseriti i valori di smorzamento di ognuno dei cinquanta sotto-intervalli dei due rispettivi metodi. Facendo una media per colonne di quest'ultima matrice, si è ottenuto un vettore di cinquanta elementi, contenente la media del fattore di smorzamento di ogni sotto-intervallo. Una volta effettuata la media di tale vettore si è ricavato il valore medio di smorzamento riferito al valore di amperaggio, corrispondente all'indice n del ciclo precedentemente introdotto. Notare che non si è ottenuto un valore di smorzamento riferito alla media dei due metodi, ma si sono ottenuti altri due valori dello smorzamento, corrispondenti ai due metodi utilizzati.

Righe di comando utilizzate:

```
Z_matrice=[Z_fit_50;Z_eng_50];  
Z_media=mean(Z_matrice);  
Z_tot=mean(Z_media);  
Z_fit=mean(Z_fit_50);  
Z_eng=mean(Z_eng_50);
```

Le righe di comando appena riportate sono state utilizzate per la costruzione della matrice contenente i valori di smorzamento di ogni sotto-intervallo, per la costruzione del vettore media di tale matrice ed infine per effettuare la media del medesimo, dalla quale si ottiene il valore dello smorzamento mediato sui due metodi.

Nelle ultime due righe i valori di smorzamento ricavati dai due metodi

I valori ricercati nell'ambito di questa tesi sono le ultime tre righe del codice di comando utilizzato:

Z_fit: Valore di smorzamento trovato con il metodo uno.

Z_eng: Valore di smorzamento trovato con il metodo due.

Z_tot: Valore di smorzamento risultato dalla media tra i due metodi.

Tali valori, insieme al vettore rappresentante l'intervallo di corrente considerato, al termine del ciclo **for** principale, sono stati salvati mediante la funzione Matlab® **save**.

Righe di comando utilizzate:

```
save(['A_Z_finale_' num2str(AMP)  
'.mat'], 'Z_tot', 'Z_fit', 'Z_eng', 'AMP')
```

Una volta acquisiti i tre risultati principali per ogni valore di amperaggio, al fine di poterli rappresentare, utilizzando la funzione Matlab® **load**, si sono caricati i file precedentemente salvati. Questa procedura è stata svolta sempre con l'ausilio di un ciclo **for**, il quale per ogni valore di corrente applicata, caricasse il rispettivo file, e costruisse quattro vettori contenenti rispettivamente: smorzamento metodo uno, smorzamento metodo due, smorzamento media dei due metodi, vettore rappresentativo dell'intervallo di corrente esaminato.

Righe di comando utilizzate:

```
clear all;clc;
Ampere=[];
Z=[];
Z_e=[];
Z_f=[];
for n=0:0.4:3.6;
load(['A_Z_finale_' num2str(n) '.mat'])
Z=[Z Z_tot];
Z_e=[Z_e Z_eng];
Z_f=[Z_f Z_fit];
Ampere=[Ampere AMP];
end
```

5.4.1 RISULTATI METODO UNO

Ottenuti i dati di interesse, si è proceduto alla rappresentazione grafica degli stessi. Per quanto riguarda il primo metodo, ossia quello dal quale si sono ottenuti i risultati mediante un fit lineare, i vettori di interesse sono: **Ampere**, **Z_f**.

Quindi, usando la funzione Matlab® **plot**, si sono rappresentati graficamente tali vettori.

Ovviamente i risultati ottenuti variano a seconda dell'intervallo temporale preso in considerazione, e, soprattutto, dall'ampiezza iniziale d'oscillazione di tale intervallo. Infatti osservando la Fig. 5.4, riferita al valore 0 A, che ha uno smorzamento molto basso, si nota che si possono distinguere due differenti gradi di riduzione dell'ampiezza di oscillazione lungo le curve esponenziali negative. Nei primi istanti si vede una rapida diminuzione dell'ampiezza in quanto vi è una componente smorzante dovuta all'attrito del corpo con l'aria; questa componente di smorzamento risulta trascurabile per valori di ampiezza di oscillazione inferiori a 2 mm. Questo è anche uno dei motivi per il quale si è deciso di suddividere l'intervallo in cinquanta sotto-intervalli. In un primo momento si è ipotizzato di dividere l'intervallo in due o tre sotto-intervalli, ma, tale soluzione, non è stata presa in considerazione in quanto si è voluto ottenere un grado di approssimazione migliore.

Di seguito si riporta il grafico contenente i risultati del metodo uno.

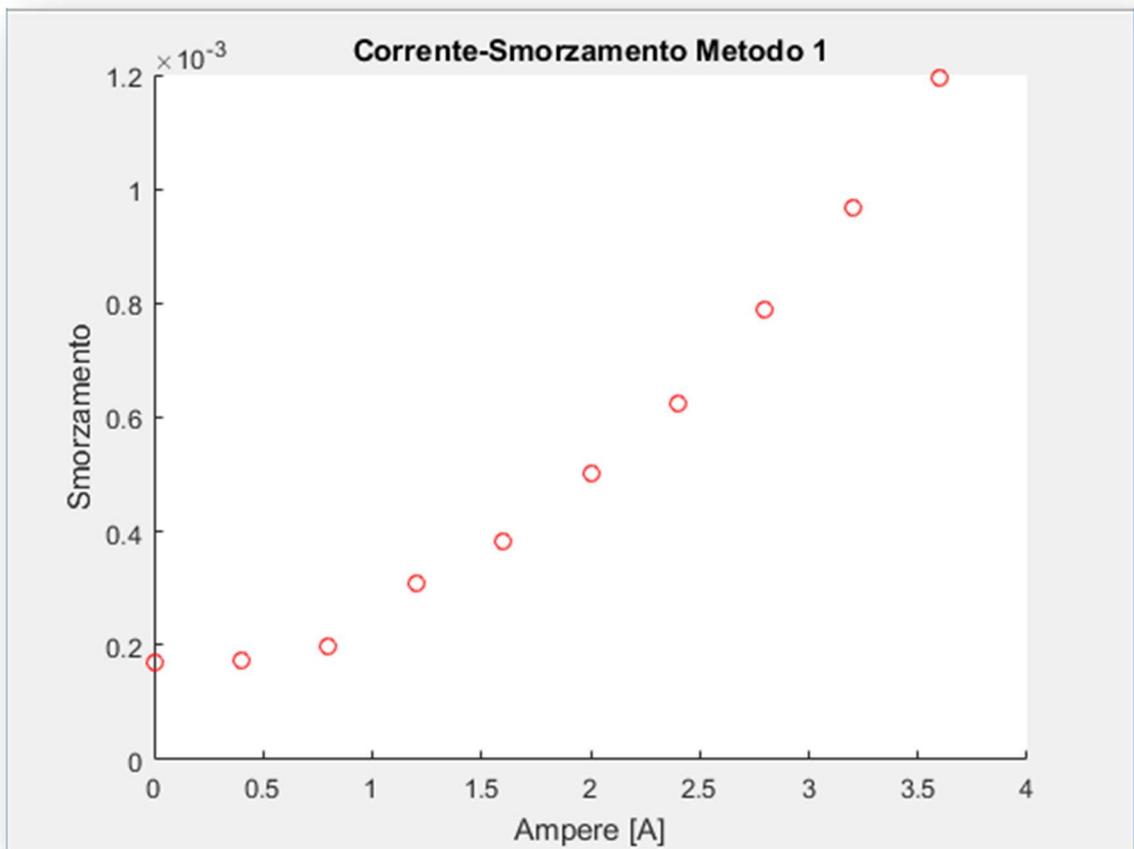


Figura 5.13

Andamento dello smorzamento in funzione della corrente ottenuto col metodo uno

Dall'andamento del grafico si può notare che lo smorzamento in funzione della corrente ha un andamento parabolico. Si è voluto cercare una funzione che approssimasse in maniera ottimale tale andamento.

$$f(A) = a_1A^2 + a_2A + a_3 \quad (5.8)$$

Nell'Eq. (5.8), A rappresenta i valori di corrente. Per trovare i valori dei coefficienti a_1 , a_2 , a_3 , si è utilizzata la funzione Matlab® **polyfit**, la quale trova proprio i valori di questi coefficienti. Successivamente utilizzando la funzione matlab **polyval** si è graficata tale funzione.

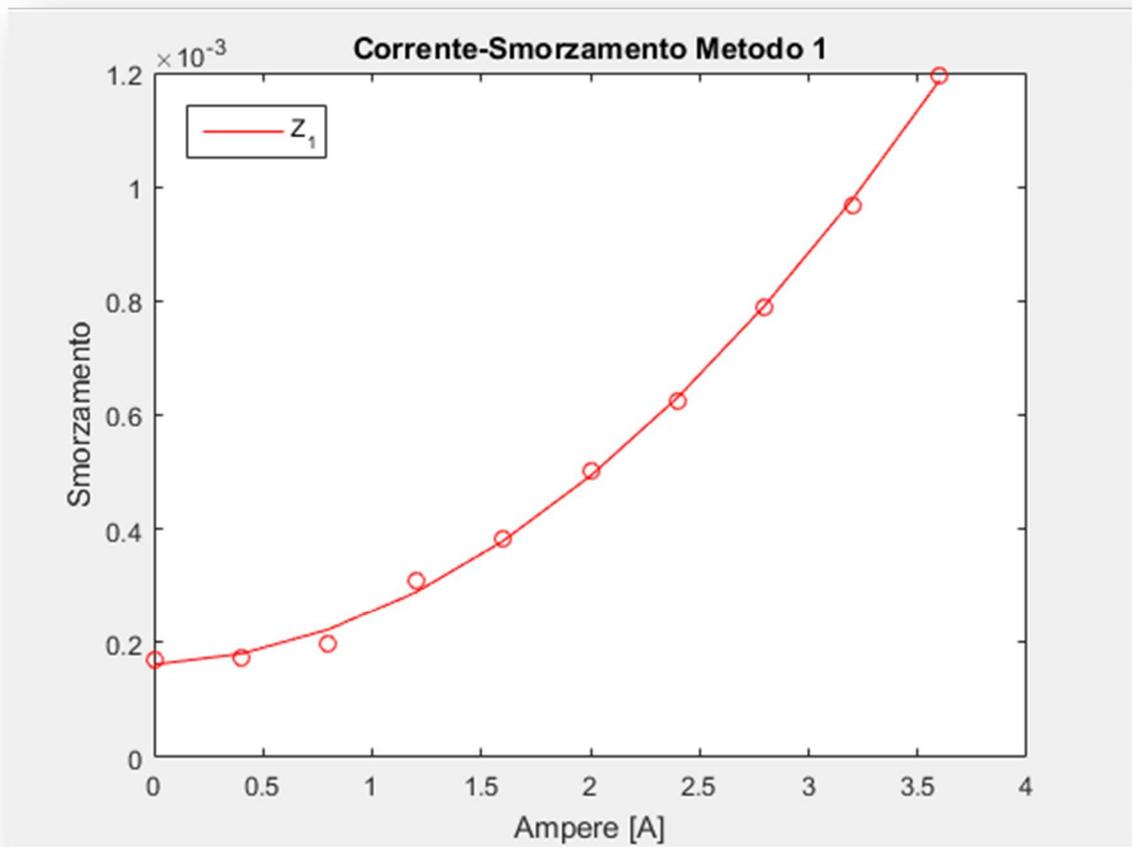


Figura 5.14
Rappresentazione grafica della funzione, che meglio approssima l'andamento dello smorzamento in funzione della corrente

Il risultato ottenuto per il metodo uno è rappresentato dalla seguente funzione:

$$f(A) = (7.43777 * 10^{-5})A^2 + (1.6974 * 10^{-5})A + (1.6162 * 10^{-4}) \quad (5.9)$$

Come detto precedentemente i valori dei coefficienti della Eq.(5.9) sono stati ottenuti dalla funzione **polyfit**.

5.4.2 RISULTATI METODO DUE

Per quanto riguarda il metodo due, i risultati di interesse sono stati ottenuti, come spiegato nei paragrafi precedenti, effettuando un decremento logaritmico dei picchi d'oscillazione, presenti nell'intervallo preso in considerazione. Ovviamente tale procedimento è stato eseguito per ogni amperaggio. In questo caso, per la rappresentazione dei risultati, si sono presi in considerazione i vettori: **Z_e**, **Ampere**.

Sempre utilizzando la funzione Matlab® **plot**, è stato possibile tracciare i risultati.

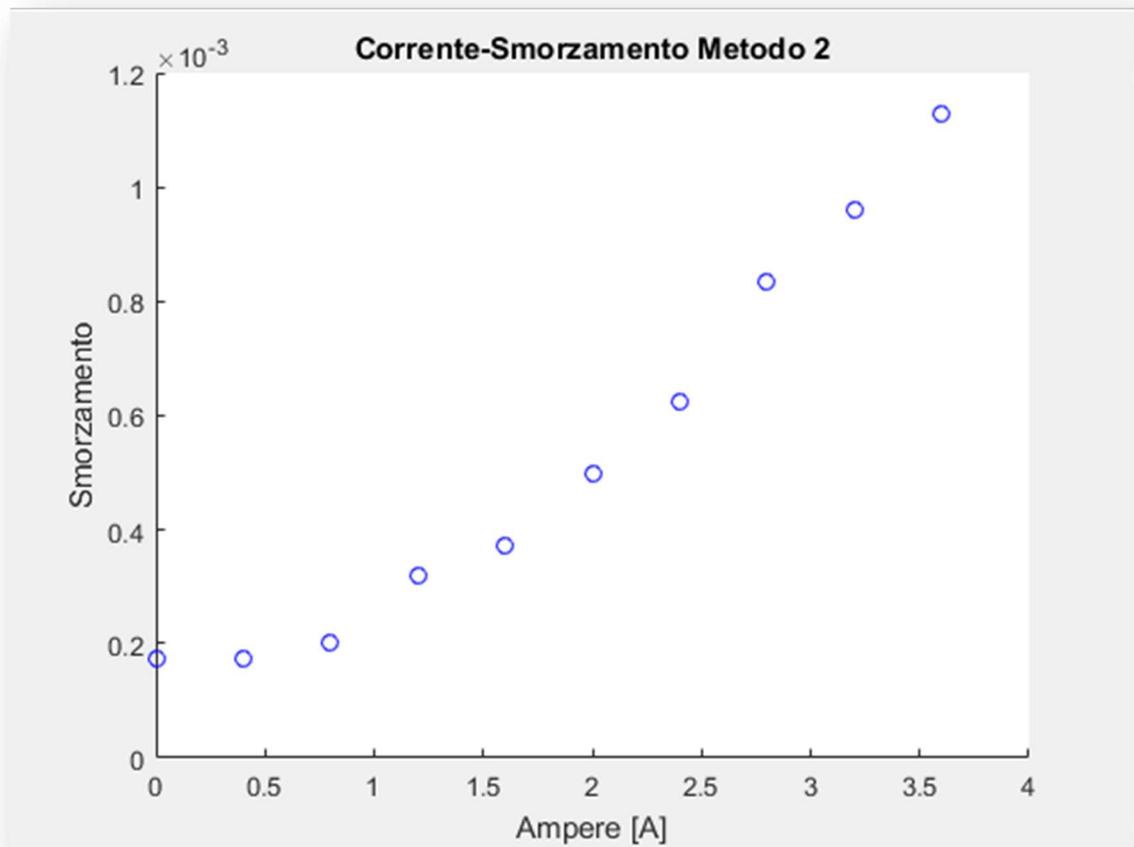


Figura 5.15

Grafico dell'andamento dello smorzamento in funzione della corrente, ottenuto col metodo due

Anche in questo caso si vede come l'andamento dello smorzamento in funzione della corrente circolante nell'elettromagnete sia del tipo parabolico. Quindi analogamente a come si è proceduto per il metodo uno, si è cercata, mediante l'utilizzo delle funzioni Matlab® **polyfit** e **polyval**, la funzione che approssimasse in modo ottimale tale andamento.

$$f(A) = a_4 A^2 + a_5 A + a_6 \quad (5.10)$$

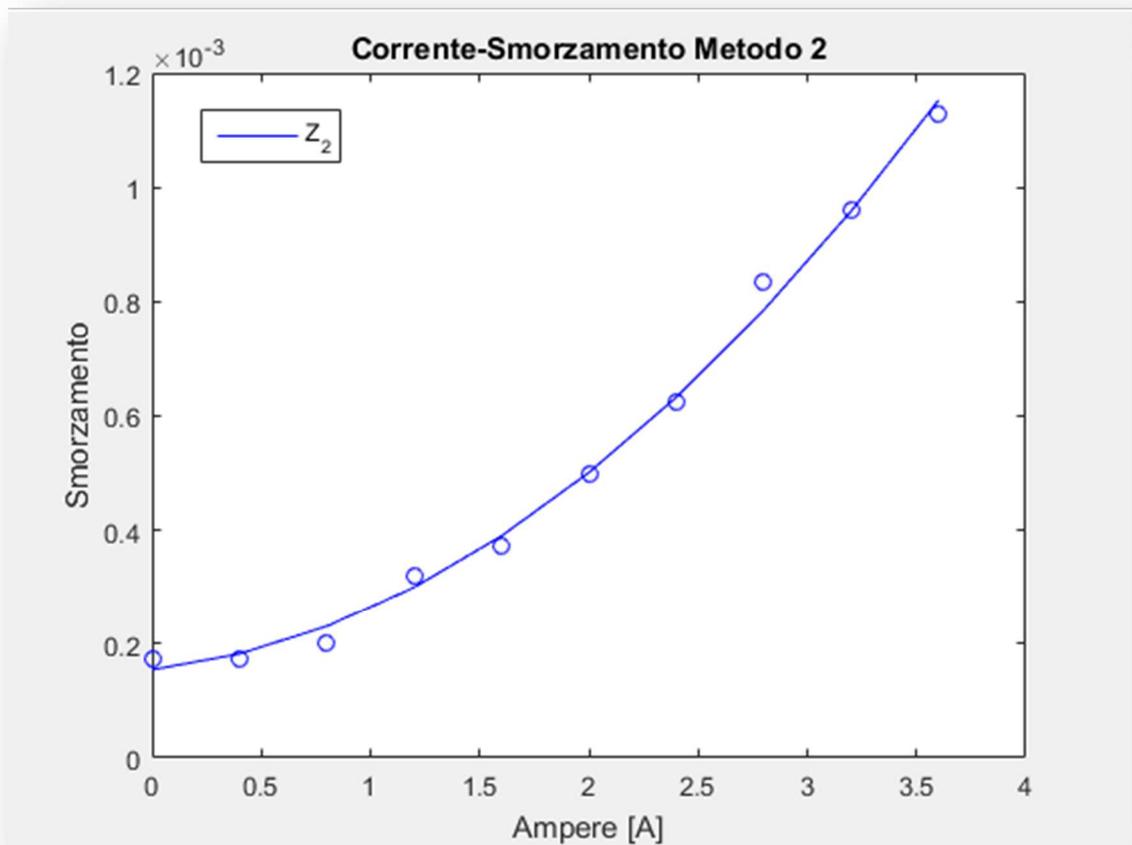


Figura 5.16
Rappresentazione grafica della funzione che meglio approssima l'andamento dello smorzamento in funzione della corrente

Il risultato ottenuto con il metodo due è rappresentato dalla seguente funzione:

$$f(A) = (6.4801 * 10^{-5})A^2 + (4.6864 * 10^{-5})A + (1.5422 * 10^{-4}) \quad (5.11)$$

5.4.3 CONFRONTO DEI DUE METODI

Per il calcolo del fattore di smorzamento, si è visto come l'andamento dei risultati ottenuti sia del tipo parabolico in entrambi i casi. Successivamente si è verificato di quanto si discostassero tra loro i risultati ottenuti tramite i due diversi metodi. Notare come questo fosse già osservabile attraverso i coefficienti presenti nelle equazioni ricavate (Eq.(5.9), Eq.(5.11)). Si veda come questi, pur avendo valori diversi, siano dello stesso ordine di grandezza. Per avere un'idea di quanto differissero tra loro i risultati ottenuti, si sono paragonate graficamente le due curve ottenute.

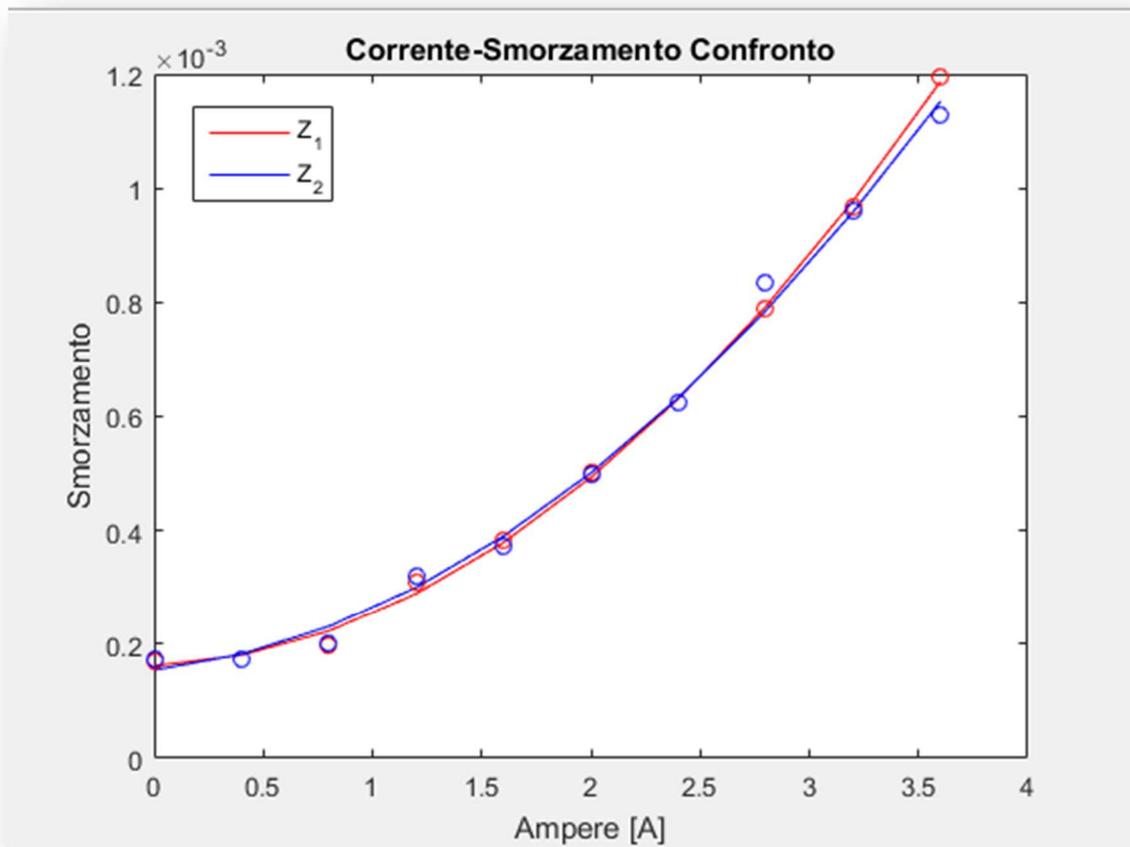


Figura 5.17
Confronto delle due curve ottenute: notare l'elevata somiglianza

Si è pensato, come introdotto precedentemente, di effettuare una media dei risultati ottenuti con i due diversi metodi. Questa non è stata effettuata sui valori riferiti al singolo valore di amperaggio, ma sui valori dello smorzamento ottenuti nei singoli sotto-intervalli; con l'avanzare del ciclo **for** si è costruita una matrice di due righe e cinquanta colonne contenente i diversi valori di smorzamento di ogni sotto-intervallo. Facendo la media di ogni colonna della matrice e, mediando ulteriormente i valori del vettore ottenuto, si è ricavato il valore medio di smorzamento riferito a un determinato amperaggio. Naturalmente questa operazione è stata eseguita per ogni valore di corrente. Come per i due metodi precedenti,

anche per lo smorzamento medio si è tracciato l'andamento con l'ausilio delle funzioni **polyfit** e **polyval**.

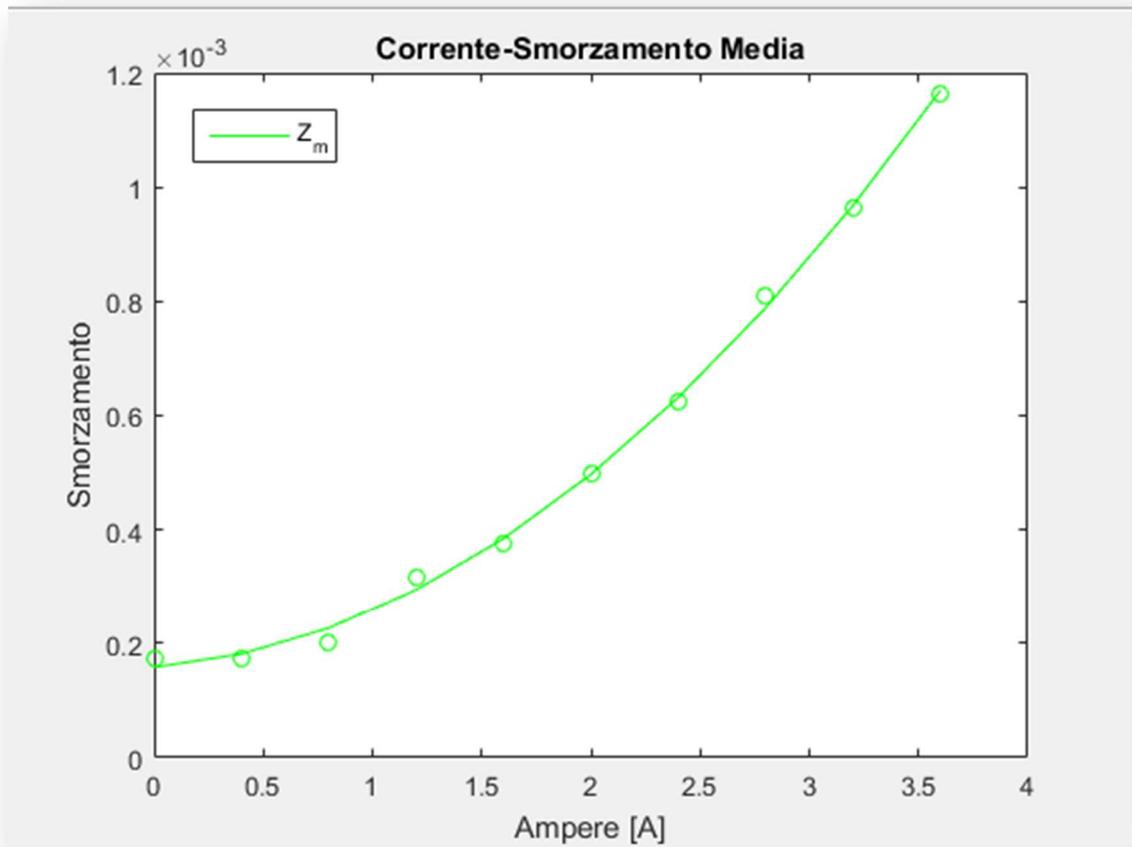


Figura 5.18
Andamento dello smorzamento ottenuto mediando i due metodi

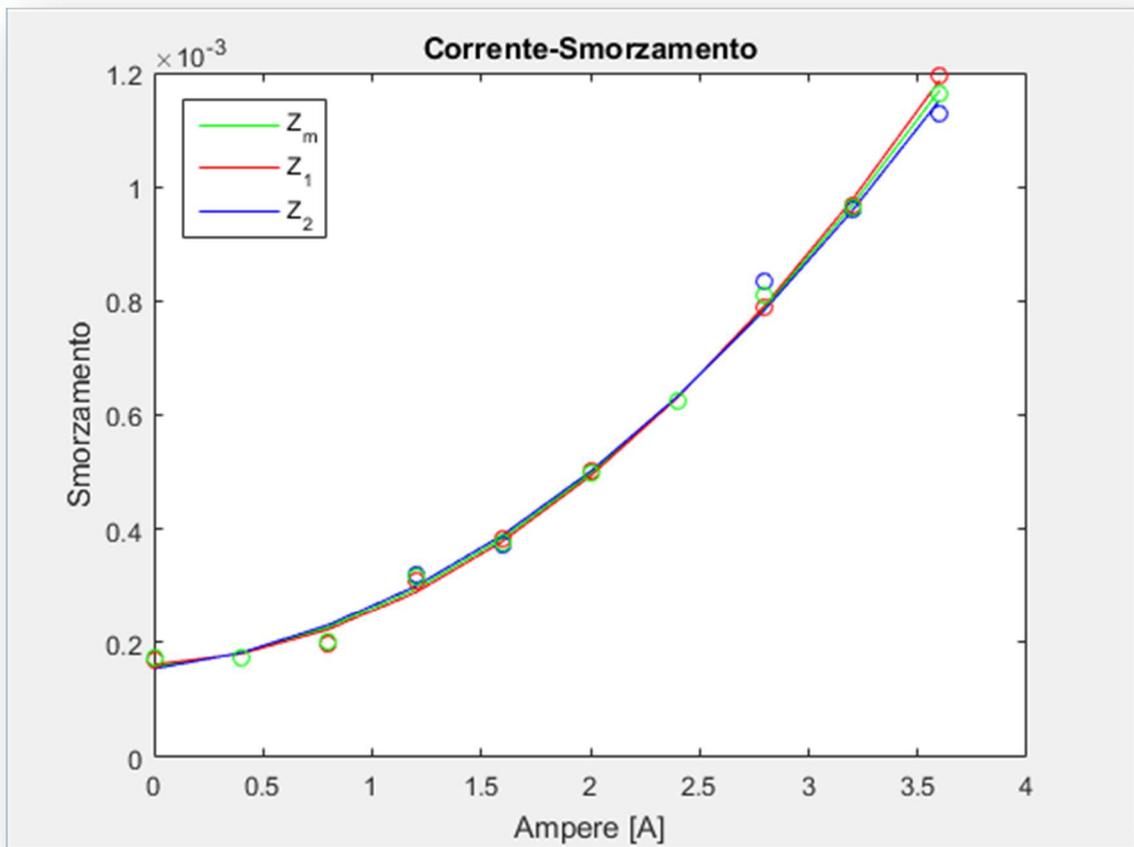


Figura 5.19
Andamento dei risultati ottenuti

In Appendice B si è riportato il codice Matlab® completo utilizzato durante questa tesi.

Capitolo 6

Conclusioni

Il fattore di smorzamento ξ è fortemente influenzato dalla massa del modello e dalla rigidità della molla equivalente. L'obiettivo di questa tesi di laurea è stato quello di fornire un codice Matlab® che permettesse la caratterizzazione dello smorzamento di un sistema meccanico ad un singolo grado di libertà, smorzato da un freno elettromagnetico, al variare della corrente circolante in quest'ultimo. Tale caratterizzazione è stata effettuata mediante la sola osservazione dell'andamento oscillatorio del modello in esame. Inoltre si sono confrontati due metodi di analisi per la valutazione del fattore di smorzamento, ottenendo dei risultati quasi coincidenti.

I valori di smorzamento ottenuti, relativi a ciascun valore di corrente, valutati considerando identico l'impulso eccitante iniziale (martellata), sono da ritenersi validi esclusivamente per il sistema studiato, avente una determinata massa m e presentando una rigidità della molla equivalente k .

Nel caso in cui la caratterizzazione del coefficiente di smorzamento dovesse essere effettuata su di un modello avente parametri fisici differenti, bisognerà ricostruire l'andamento oscillatorio eccitando il nuovo modello con un impulso iniziale e , al variare della corrente circolante nell'elettromagnete, acquisire i dati tramite software Labview® per poi elaborarli con il codice Matlab® fornito nell'ambito di questa tesi. Il codice fornito è utilizzabile per qualsiasi set-up sperimentale, in quanto, nella programmazione, non sono stati considerati i particolari parametri fisici del sistema, ma si è analizzato soltanto l'andamento pseudo-periodico della posizione $x(t)$ del corpo oscillante.

Il lavoro svolto è stato finalizzato al successivo studio del fenomeno del *Vortex Shedding*, riguardante la determinazione della risposta del modello in funzione della velocità del vento. Nel capitolo 5, si è riportata la procedura operativa adottata per caratterizzare lo smorzamento, considerando, come dato fondamentale, l'andamento della posizione del corpo oscillante nel caso in cui non circolasse corrente nell'elettromagnete. In Appendice C si riportano i grafici dell'andamento oscillatorio, per tutti i diversi valori di amperaggio, per quanto riguarda un modello di massa $m = 2 \text{ kg}$ e $k_{tot} = 18.84 \text{ N/mm}$.

Un possibile sviluppo futuro di tale tesi potrà essere la caratterizzazione dello smorzamento per modelli di massa differente e la successiva ricerca di possibili correlazioni tra le diverse prove.

Appendice A – La galleria del vento DICCA

La galleria del vento della scuola Politecnica dell'Università di Genova, situata presso il laboratorio del DICCA, è un impianto a circuito chiuso (Figura 1) realizzato in carpenteria metallica, il cui ingombro in pianta è di 8x21 m². La tipologia a circuito chiuso (Figura 2) ha l'effetto di migliorare la qualità del flusso (rispetto agli impianti a circuito aperto) e il vantaggio di operare con una camera di prova a pressione ambiente. La galleria presenta alcuni aspetti innovativi per quanto concerne lo schema generale e i parametri dimensionali e prestazionali. La Tabella 1 e la Tabella 2 riportano sinteticamente le dimensioni principali e le prestazioni dell'impianto. I paragrafi seguenti illustrano i componenti dell'impianto suddivisi per tipologia.

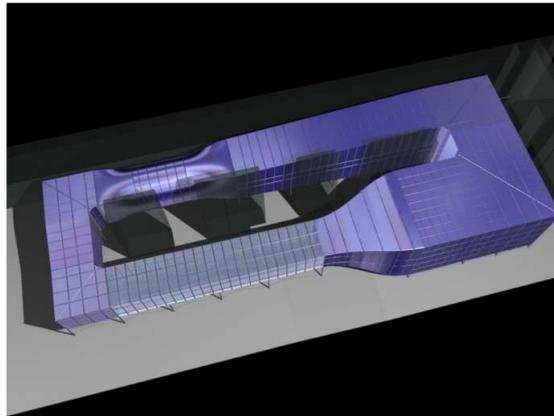


Figura 1
Vista dall'alto dell'impianto

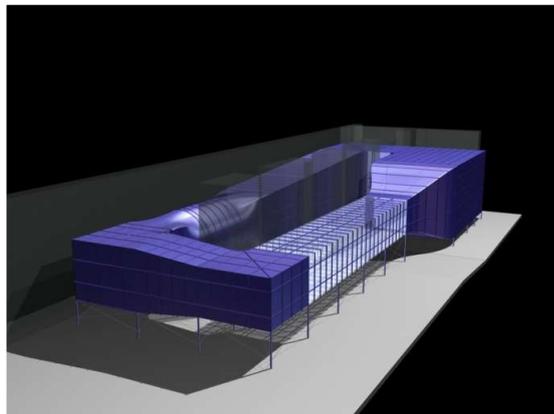


Figura 2
Vista laterale dell'impianto

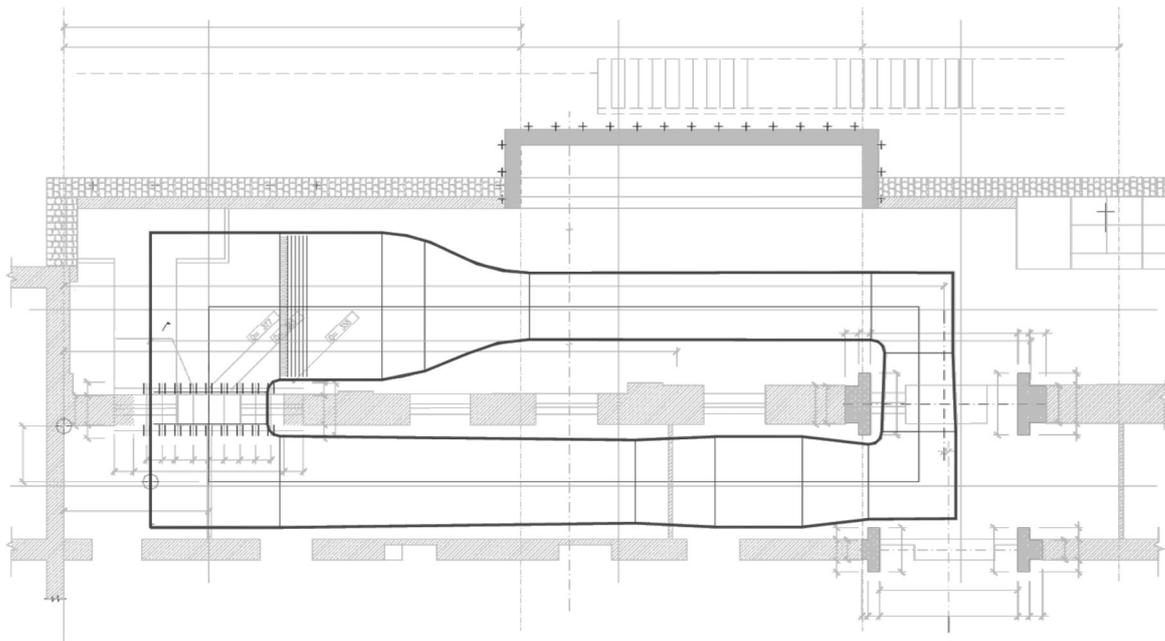


Figura 3
 Planimetria dell'impianto e sua collocazione all'interno del laboratorio

Tabella 1 Dimensioni principali dell'impianto.

<i>Dimensioni</i>	
Larghezza (m)	8
Lunghezza (m)	21
Altezza (m)	3.5
Sezione camera di prova (m)	1.7 x 1.35
Lunghezza camera di prova (m)	8.8
Rapporto di contrazione	5
Diametro del Ventilatore (m)	2.2

Tabella 2 Prestazioni dell'impianto.

<i>Prestazioni</i>	
Velocità di progetto camera di prova (m/s)	30
Velocità massima camera di prova (m/s)	40
Potenza necessaria a 40 m/s (kW)	100
Potenza installata (kW)	132
Perdita di potenza dell'impianto (Power factor)	0.774

CAMERA DI PROVA E SEZIONI DI MISURA

La camera di prova è lunga 8.8 m (Figura 4). La sezione trasversale della camera di prova è di 1.7 x 1.35 m². Al suo interno si collocano due distinte sezioni di misurazione.



Figura 4

Camera di prova: particolare del telaio di contrasto nella prima sezione di misura



Figura 5

Camera di prova: vista dall'interno

La prima sezione di misura, situata all'imbocco della camera, 1.5 m a valle del convergente, è rivolta a misure in flusso omogeneo. Di base, essa è caratterizzata da valori ridottissimi dell'indice di turbolenza; è comunque previsto l'impiego di griglie per creare, se necessario, flussi turbolenti.

La sezione è utilizzata soprattutto per prove aerodinamiche e aeroelastiche su modelli sezionali di elementi e porzioni strutturali quali impalcati da ponte, conci di torre o componenti di costruzioni industriali.

La seconda sezione di misura, nella parte terminale della camera di prova, è dotata di una tavola rotante ed è rivolta a misure in condizioni di flusso tali da riprodurre le proprietà dello strato limite atmosferico mediante generazione artificiale del profilo della velocità media e della struttura della turbolenza, compatibilmente con le dimensioni della sezione e i rapporti di scala che si renderanno di volta in volta opportuni. Lo sviluppo dello strato limite, favorito mediante dispositivi passivi (blocchi di rugosità e guglie), è favorito dalla lunghezza della camera di prova. La parte terminale, prima del primo angolo, è posta in comunicazione con l'ambiente mediante un setto poroso che ha il compito di equalizzare la pressione statica. Il riequilibrio della pressione statica è inoltre favorito dalla presenza di una fessura longitudinale, anch'essa porosa, lungo tutto il soffitto della camera di prova.

GRUPPO MOTORE

Immediatamente dopo il primo divergente e il secondo angolo, a valle del cambio di forma da sezione rettangolare a sezione circolare, si trova il ventilatore (Figura 6). Il ventilatore (assiale) ha una girante di 2.2 m ed è alimentato da un motore asincrono da 132 kW collocato in posizione anteriore e protetto da un'ogiva. La potenza installata è stata dimensionata in base alla valutazione delle perdite di carico dell'impianto, con lo scopo di attuare in camera di prova una velocità superiore a 40 m/s, assumendo un rendimento complessivo del ventilatore pari a 0.7. Il ventilatore, il motore ed il raddrizzatore di flusso (statore), sono collocati su un basamento in acciaio mediante *silent-blocks* (Figura 5); il basamento è ancorato mediante tirafondi a una fondazione rigida in calcestruzzo armato, isolata dal resto della pavimentazione.

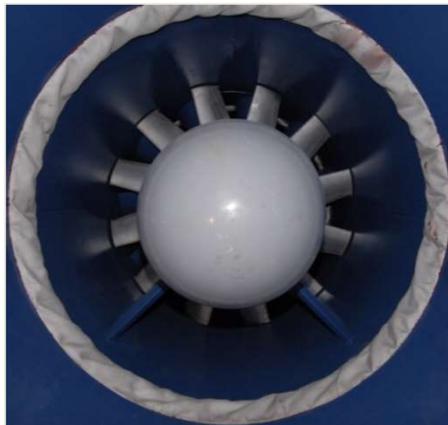


Figura 6
Vista del ventilatore dal cambio di forma a monte



Figura 7
Vista del basamento su fondazione rigida

Il ventilatore, la cui velocità massima è di 900 giri/minuto, è comandato da un convertitore in frequenza che permette di regolare con continuità la velocità in camera di prova con precisione pari a ± 0.1 m/s; il suo raffreddamento è ad aria, ed è affidato a un ventilatore centrifugo ausiliario collocato all'esterno della galleria. Il blocco motore è meccanicamente isolato dai cambi di forma, tanto a monte quanto a valle, mediante giunti elastici che impediscono la trasmissione di vibrazioni alle altre sezioni della galleria del vento.

DIVERGENTI

Per aumentare la lunghezza della camera di prova, non è stato collocato alcun divergente a valle della seconda sezione di misura. Il primo diffusore, della lunghezza di 1.65 m, è successivo al primo angolo ed è realizzato con un divergente bidimensionale con un angolo massimo di 3° , ottenuto con un setto orizzontale divisorio (Figura 8-a). A valle del ventilatore, dopo il raddrizzatore di flusso e il cambio di forma, si trova il secondo canale di espansione (Figura 8-b-c) di lunghezza pari a 8.9 m; esso è completamente foderato di materiale fonoassorbente ed è caratterizzato da un angolo di divergenza massimo di 3.3° . Tra il terzo e il quarto angolo si trova infine un modesto diffusore che funge principalmente da elemento di raccordo tra gli angoli.

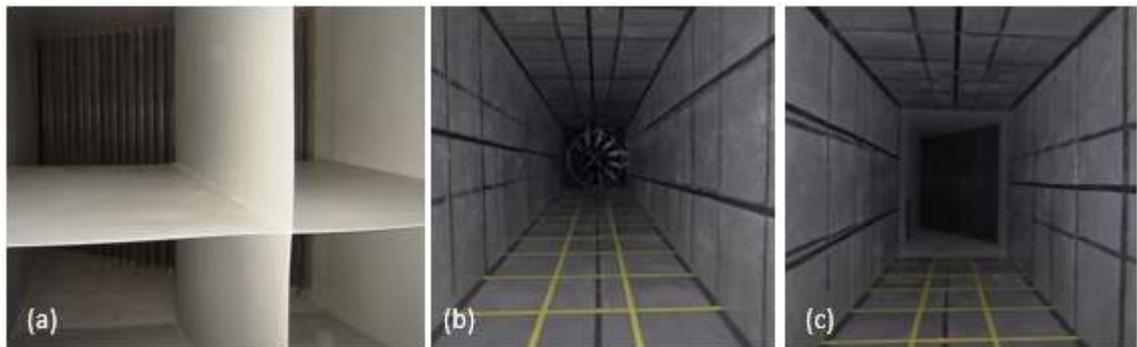


Figura 8

Primo divergente e, sullo sfondo il secondo angolo (a), vista del ventilatore (b) e del terzo angolo (c)

ANGOLI

Per ottimizzare gli ingombri e massimizzare la lunghezza della camera di prova, non sono stati posti in opera divergenti rapidi, tanto a monte della camera di ristagno, quanto a valle della camera di prova. Gli angoli sono stati quindi progettati in modo innovativo, dando luogo a un'espansione del flusso. In ciascuno dei quattro angoli si trova una batteria di alette con interasse di 81 mm. Per minimizzare la separazione e ridurre quanto più è possibile le perdite di carico, le alette sono state realizzate con profili alari studiati appositamente per l'uso in galleria del vento; essi sono caratterizzati da un'elevata curvatura e da una rifinitura a spigolo vivo al bordo d'uscita. L'interasse tra le alette è il compromesso ottimale tra la necessità di evitare la separazione (alette troppo distanziate potrebbero indurre lievi separazioni al bordo d'uscita) e di non aumentare eccessivamente la resistenza di attrito (legata alla superficie bagnata delle alette).

CAMERA DI CALMA E CONVERGENTE

All'uscita del quarto angolo, nella camera di calma, sono alloggiati una struttura a nido d'ape e un sistema di cinque reti. Essi attuano una progressiva riduzione delle scale della turbolenza concorrendo, assieme agli accorgimenti utilizzati nel dimensionamento dei divergenti e degli angoli, a garantire un'elevata qualità del flusso prima del suo ingresso in camera di prova. L'*honeycomb* e le reti, realizzate senza alcuna discontinuità, sono state calate dall'alto attraverso una botola nel soffitto (Figura 9-a). La maglia dell'*honeycomb* ha dimensione M pari a 6.35 mm; la batteria di reti è a maglia decrescente, variabile da 3.2 a 0.7 mm. La Tabella 3 riporta le dimensioni principali caratterizzanti gli schermi: d è il diametro degli elementi, M è la dimensione caratteristica della maglia, $\phi=(1-d/M)^2$ è il rapporto di solidità.



Figura 9

Installazione del pannello a nido d'ape e delle reti (a); vista del convergente e della prima sezione di misura (b)

Tabella 3 Dimensioni dell'honeycomb e delle reti: diametro d , larghezza della maglia M , rapporto di solidità φ

<i>Elemento</i>	d (mm)	M (mm)	φ
honeycomb	0.1	6.35	0.97
Rete 1	0.71	3.2	0.61
Rete 2	0.56	2.4	0.58
Rete 3	0.56	2.4	0.58
Rete 4	0.16	0.7	0.61
Rete 5	0.16	0.7	0.61

A valle delle reti si colloca la camera di calma; essa ha il compito di ristabilire nel flusso un regime di turbolenza isotropa, prima che questo giunga nel convergente. Il convergente (Figura 9-b), dimensionato per evitare fenomeni di separazione o ispessimento indesiderato dello strato limite, ha un fattore di contrazione pari a 5.

CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE DELL'IMPIANTO

In fase progettuale, ogni singolo componente dell'impianto è stato oggetto di analisi finalizzate a verificarne il corretto dimensionamento. Dal punto di vista fluidodinamico, particolare attenzione è stata posta nella verifica delle perdite di carico che si realizzano nelle diverse sezioni. La Tabella 4 riporta, per tutti i componenti dell'impianto, l'area della sezione, la velocità corrispondente a una velocità di 40 m/s in camera di prova, e i coefficienti di perdita locali e cumulativi; essi forniscono il valore della potenza installata necessari Al fine di evitare qualsivoglia sottodimensionamento, le perdite di carico sono state valutate ipotizzando la presenza di uno scambiatore di calore (non installato allo stato attuale).

Tabella 4 Proprietà delle sezioni dell'impianto, velocità relative alla velocità in camera di prova e coefficienti di perdita.

<i>Sezione</i>	<i>Area (m²)</i>	<i>Velocità ingresso (m/s)</i>	<i>Coefficiente di perdita</i>	
			<i>locale</i>	<i>Cumulativo</i>
<i>Camera di Prova</i>	2.375	40	0.0520	0.0520
<i>Primo angolo</i>	2.375	39.33	0.0480	0.1000
<i>Primo Diffusore</i>	3.222	39.33	0.0455	0.1455
<i>Secondo angolo</i>	3.222	28.99	0.0480	0.1935
<i>Ventilatore</i>	3.98	28.99	0.1520	0.3455
<i>Secondo diffusore</i>	6.716	23.47	0.0184	0.3639
<i>Scambiatore di calore</i>	6.716	-	0.1000	0.4639
<i>Terzo angolo</i>	8.662	13.92	0.0044	0.4683
<i>Terzo diffusore</i>	8.901	10.49	0.0005	0.4688
<i>Quarto angolo</i>	11.483	8.3	0.0025	0.4713
<i>Honeycomb</i>	11.483	-	0.0237	0.4950
<i>Rete 1</i>	11.483	-	0.0400	0.5350
<i>Rete 2</i>	11.483	-	0.0447	0.5797
<i>Rete 3</i>	11.483	-	0.0447	0.6244
<i>Rete 4</i>	11.483	-	0.0535	0.6779
<i>Rete 5</i>	11.483	8.3	0.0535	0.7314
<i>Camera di calma</i>	11.483	8.13	0.0004	0.7317
<i>Convergente</i>	2.295	41.4	0.0420	0.7737

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La velocità di riferimento del flusso all'interno della galleria è rilevata mediante un *tubo di Pitot-statico* (Figura 10) posto a circa 20 cm dal tetto della camera di prova, e posizionato a monte della sezione impegnata dal modello in una regione indisturbata dalla presenza dello stesso. La pressione cinetica è ottenuta come differenza tra la pressione totale e la pressione statica, ed è misurata attraverso un manometro differenziale con range 0-5 inWC. Il segnale elettrico è filtrato, digitalizzato e salvato alla frequenza di 100 Hz.

Il valore della densità dell'aria utilizzato per convertire la misura di pressione cinetica nel corrispondente valore di velocità è valutata sulla base della temperatura dell'aria misurata in camera di prova.

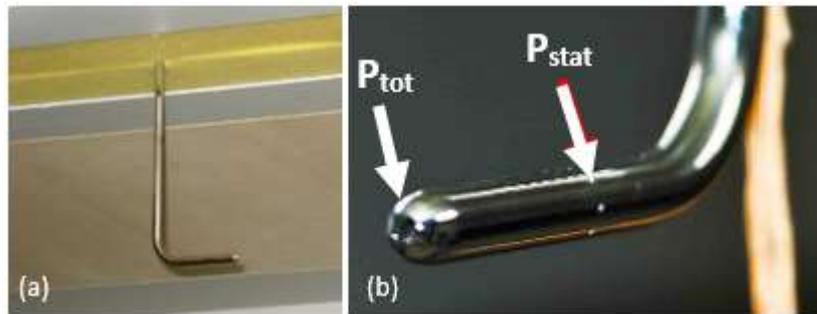


Figura 10

Tubo di Pitot posizionato in galleria del vento (a) e dettaglio con indicazione della misura della pressione totale e statica

Oltre ai tubi di Pitot-statici, la galleria del vento DICCA dispone di 2 sonde multiforo *TFI* (4 fori, Figura 11-a) di tipo “cobra” in grado di misurare le tre componenti di velocità, e la pressione statica locale nella banda 0-4kHz all'interno di un cono di accettazione con apertura $\pm 45^\circ$, e di una sonda “omniprobe” a 12 fori avente un cono di accettazione di $\pm 150^\circ$.

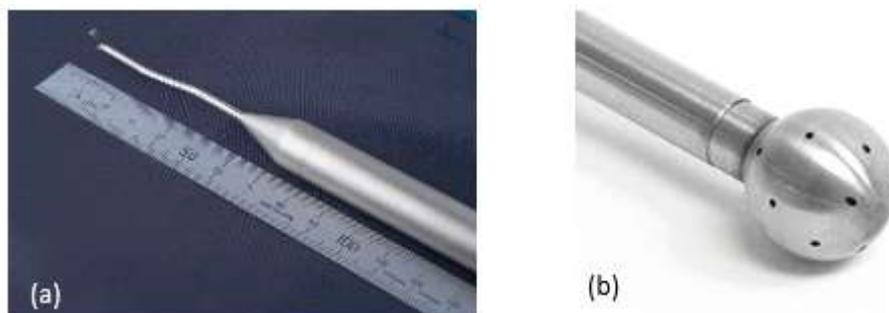


Figura 11

Sonda multiforo “cobra” (a) e “omniprobe” (b)

Per quanto riguarda le misure di spostamento, la galleria è dotata di 4 sensori laser il cui range di lettura è $\pm 25\text{mm}$, con lo zero a 120mm dal sensore, e di 1 sensore con range $\pm 2\text{ mm}$.



Figura 12
Sensore di spostamento laser

Appendice B – Codice Matlab®

Di seguito si riporta il codice Matlab® completo per lo svolgimento di questa tesi:

```
clear all
clc
ph0= 'C:\Users\Edoardo\Desktop\Universita\TESI
LAUREA\Matlab\';
ph=[ ph0 'caratterizzazione smorzamento\'];
load([ ph0 'zeri.mat']);

    for nn=0:0.4:3.6

        AMP=nn
        fails=dir([ph num2str(AMP*10, '%03d') 'A_*_fast.dat']);
        MI=[];
        for i =1:numel(fails)
            neim= fails(i).name(1:end-4);
            [mi, Dt, zz] = load_bin_13([ph neim]);
            MI= [MI; mi];
        end

        MI=MI(:, [3:6]);
        MI=MI-ones(length(MI),1)*zero_media;
        t=(0:length(MI)-1)*Dt;
        las=MI(:,1:3);
        tens=MI(:,4);
        las=mean(las');
        hold on
        load('filtroACQ2000_stop20.mat');
        las_f=filter(Hd,las);
        plot(t,las_f)
        title([num2str(AMP) ' ' 'Ampere'])
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('y [mm]')

        Ampiezza=[]      %ampiezza iniziale dei 50 intervalli

        Z_fit_50=[]
        Z_eng_50=[]
        T=[]

        % METODO 1

        cicli=50;
        display('seleziona istante iniziale e finale ')
        [tinifin zz]=ginput(2);
```

```

freq=13.18; %hz
taimcicli=cicli/freq; %tempo in cui ci sono 50 picchi

quanti = 50;
tt1=linspace(tinifin(1),tinifin(2)-taimcicli,quanti);
tt2=tt1+taimcicli;
for k=1:numel(tt1)      %da 1 a 50

    [butto_pos1]= min(abs(t-tt1(k)));

    [butto_pos2]= min(abs(t-tt2(k)));
    [pksk,locsk] =
findpeaks(las_f(1,pos1:pos2),t(1,pos1:pos2));
    figure(k)
    plot(t,las_f,'b')
    hold on
    plot(locsk,pksk,'r*')
    pksk_log=log(pksk);
    plot(locsk,exp(pksk_log),'ro')
    p=polyfit(locsk,pksk_log,1);
    damp=polyval(p,t);
plot(t,exp(damp),'r')
    plot(t,(damp),'g')
    zc=p(1);

    T_ciclo=[]
    for n=1:(length(locsk)-1)
        ampiezza=pksk(1);
        periodo=locsk(n+1)-locsk(n);
        T_ciclo=[T_ciclo periodo];

    end
    ampiezza=pksk(1);
    Ampiezza=[Ampiezza ampiezza];
    T_medio_ciclo=mean(T_ciclo);
    T=[T T_medio_ciclo];
    omega_ciclo=(2*pi)/T_medio_ciclo;
    frequenza_ciclo=1/T_medio_ciclo;
    z=(-zc)/omega_ciclo;
    Z_fit_50=[Z_fit_50 z];

% METODO 2

Dlin=[]
for h=1:(length(locsk)-1)
    dlin=pksk(h)/pksk(h+1);

```

```

        Dlin=[Dlin dlin];
    end
    Dlog=log(Dlin);
    z_eng=Dlog/(2*pi);
    Z_eng_50=[Z_eng_50 mean(z_eng)];
    close(k)
end

plot(Ampiezza,Z_fit_50*10e2,'ro',Ampiezza,Z_eng_50*10e2,'g*')

Z_matrice=[Z_fit_50;Z_eng_50];
Z_media=mean(Z_matrice);
Z_tot=mean(Z_media);
Z_fit=mean(Z_fit_50);
Z_eng=mean(Z_eng_50);

save(['A_Z_finale_' num2str(AMP)
'.mat'],'Z_tot','Z_fit','Z_eng','AMP')

    end

clear all;clc;
Ampere=[];
Z=[];
Z_e=[];
Z_f=[];
for n=0:0.4:3.6;
load(['A_Z_finale_' num2str(n) '.mat'])
Z=[Z Z_tot];
Z_e=[Z_e Z_eng];
Z_f=[Z_f Z_fit];
Ampere=[Ampere AMP];
m=polyfit(Ampere,Z,2)
damp=polyval(m,Ampere)
u=polyfit(Ampere,Z_f,2);
dampf=polyval(u,Ampere);
p=polyfit(Ampere,Z_e,2);
dampe=polyval(p,Ampere);

plot(Ampere,damp,'g',Ampere,dampf,'r',Ampere,dampe,'b')

    legend('Z_m','Z_1','Z_2')
    hold on

```

```
    plot(Ampere,Z_f,'ro',Ampere,Z_e,'bo')
    plot(Ampere,Z,'go')
title('Corrente-Smorzamento')
ylabel('Smorzamento')
xlabel('Ampere [A]')
```

Appendice C – Rappresentazione grafica dei risultati

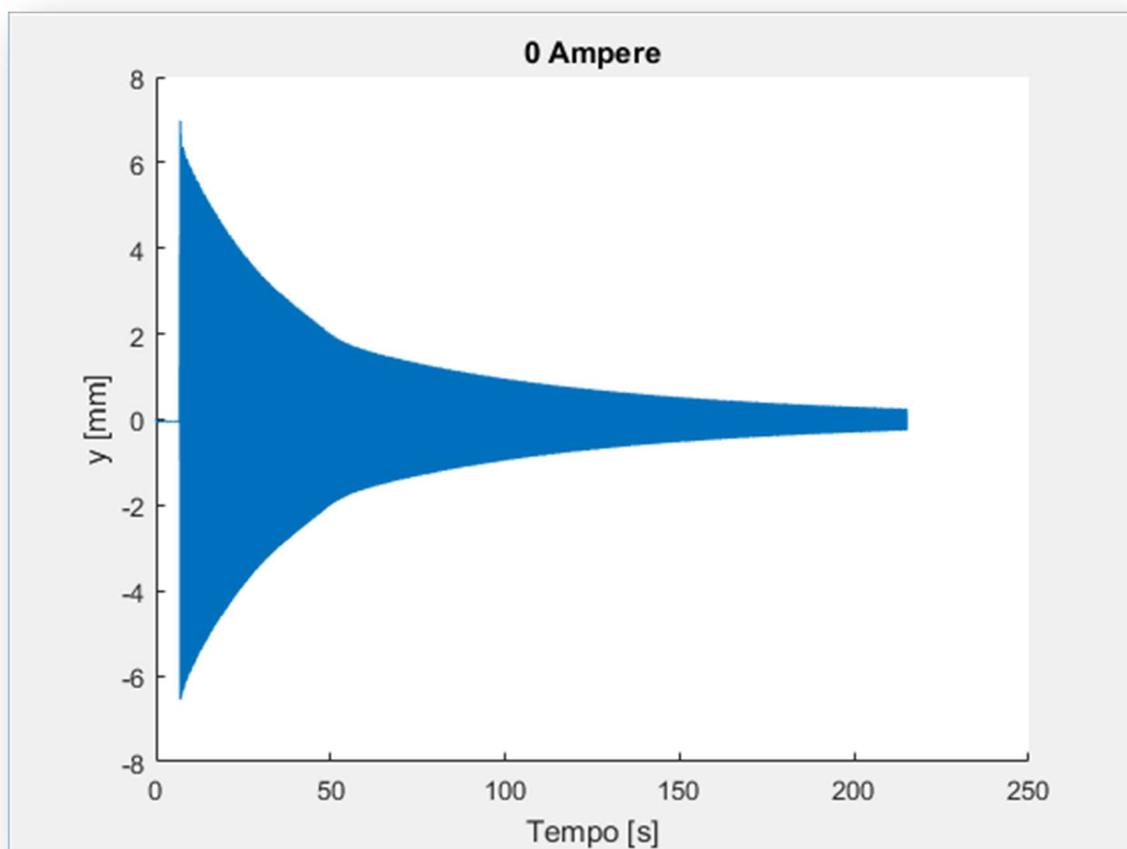


Figura C.1

- $Z_1 = 1.7015 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 1.7378 * 10^{-4}$
- $Z_m = 1.7197 * 10^{-4}$

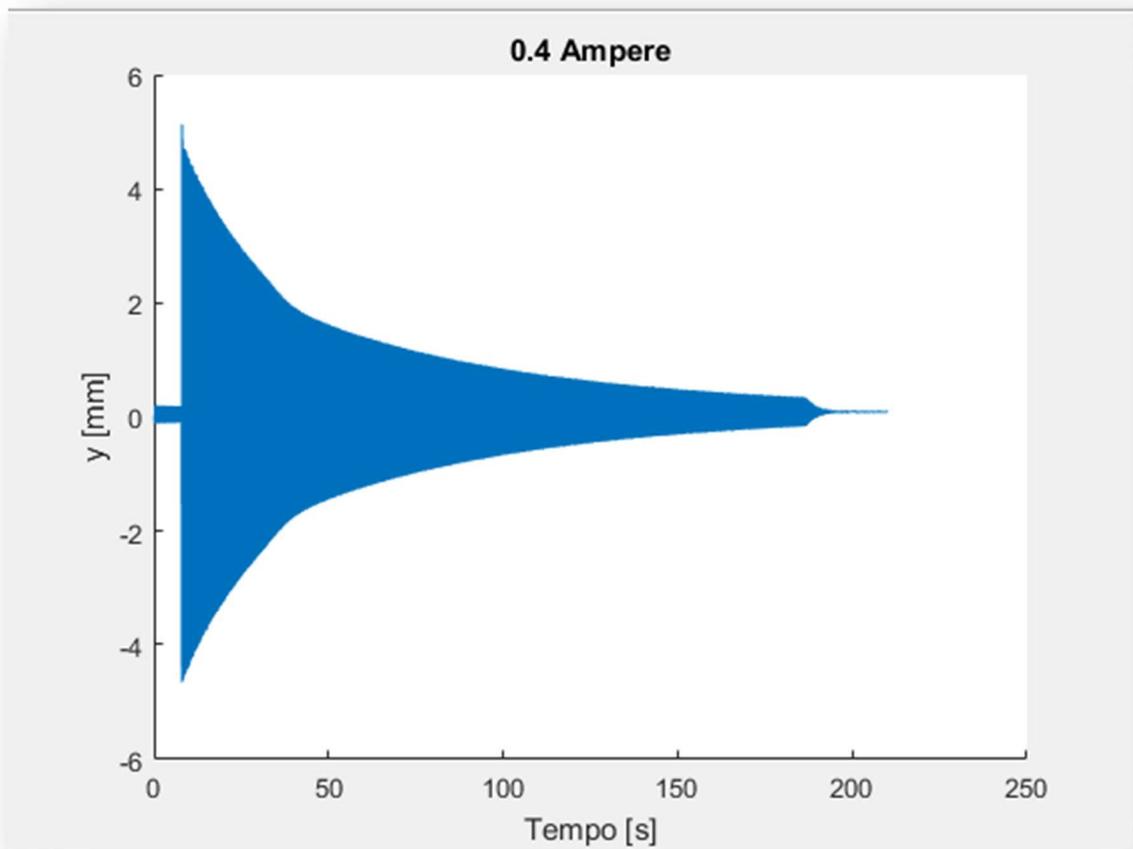


Figura C.2

- $Z_1 = 1.7416 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 1.7400 * 10^{-4}$
- $Z_m = 1.7408 * 10^{-4}$

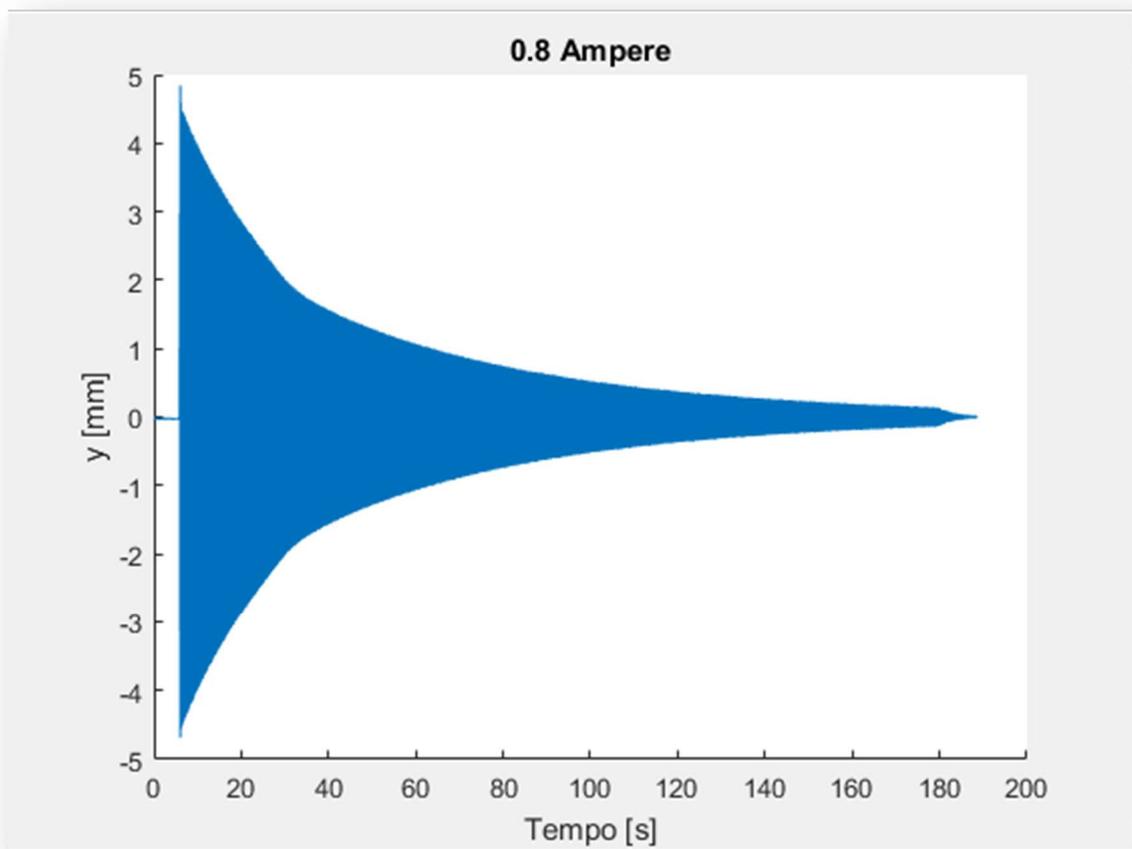


Figura C.3

- $Z_1 = 1.9803 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 2.0252 * 10^{-4}$
- $Z_m = 2.0028 * 10^{-4}$

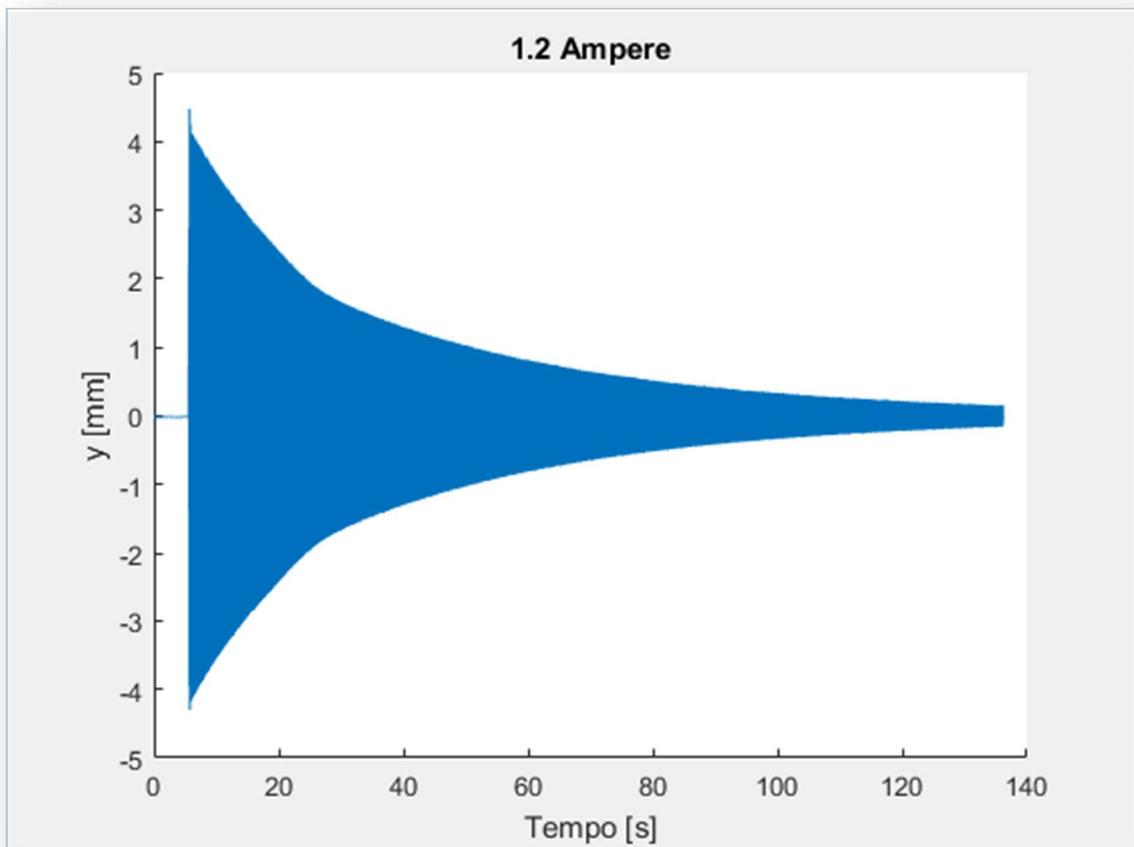


Figura C.4

- $Z_1 = 3.1046 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 3.1964 * 10^{-4}$
- $Z_m = 3.1505 * 10^{-4}$

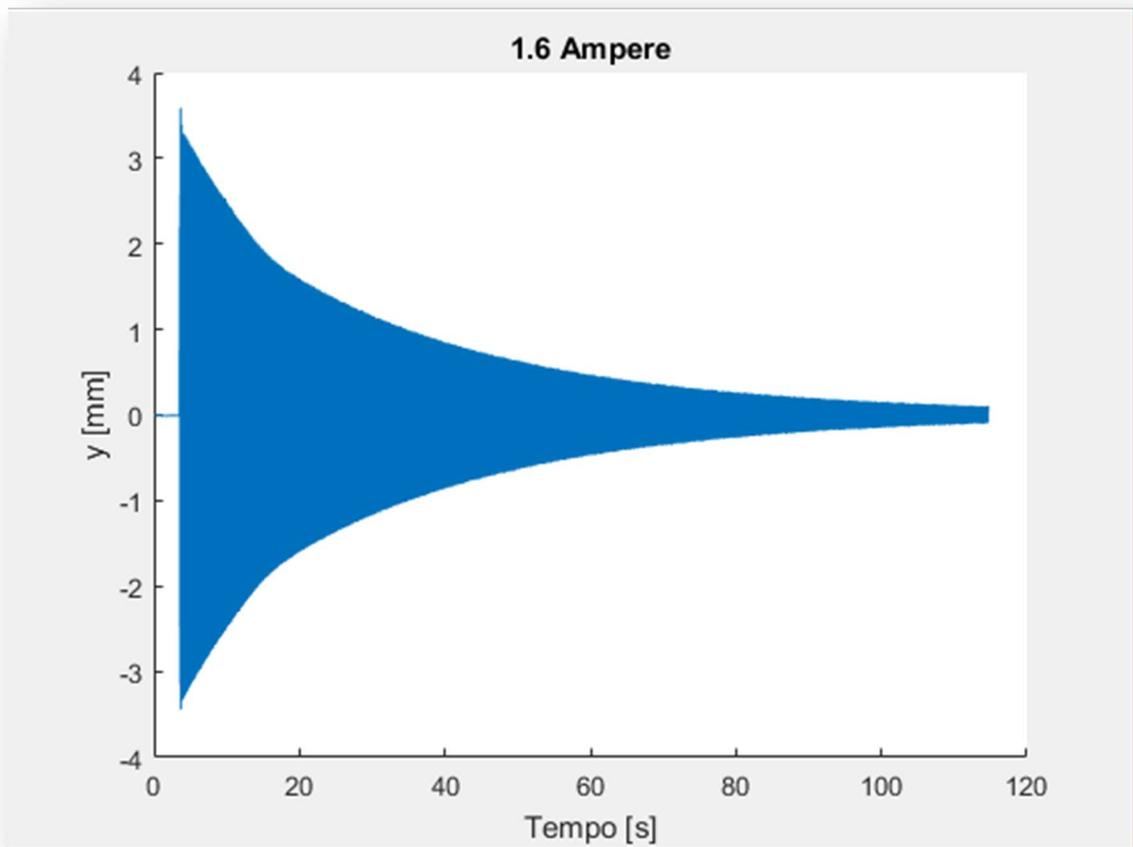


Figura C.5

- $Z_1 = 3.8270 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 3.7269 * 10^{-4}$
- $Z_m = 3.7770 * 10^{-4}$

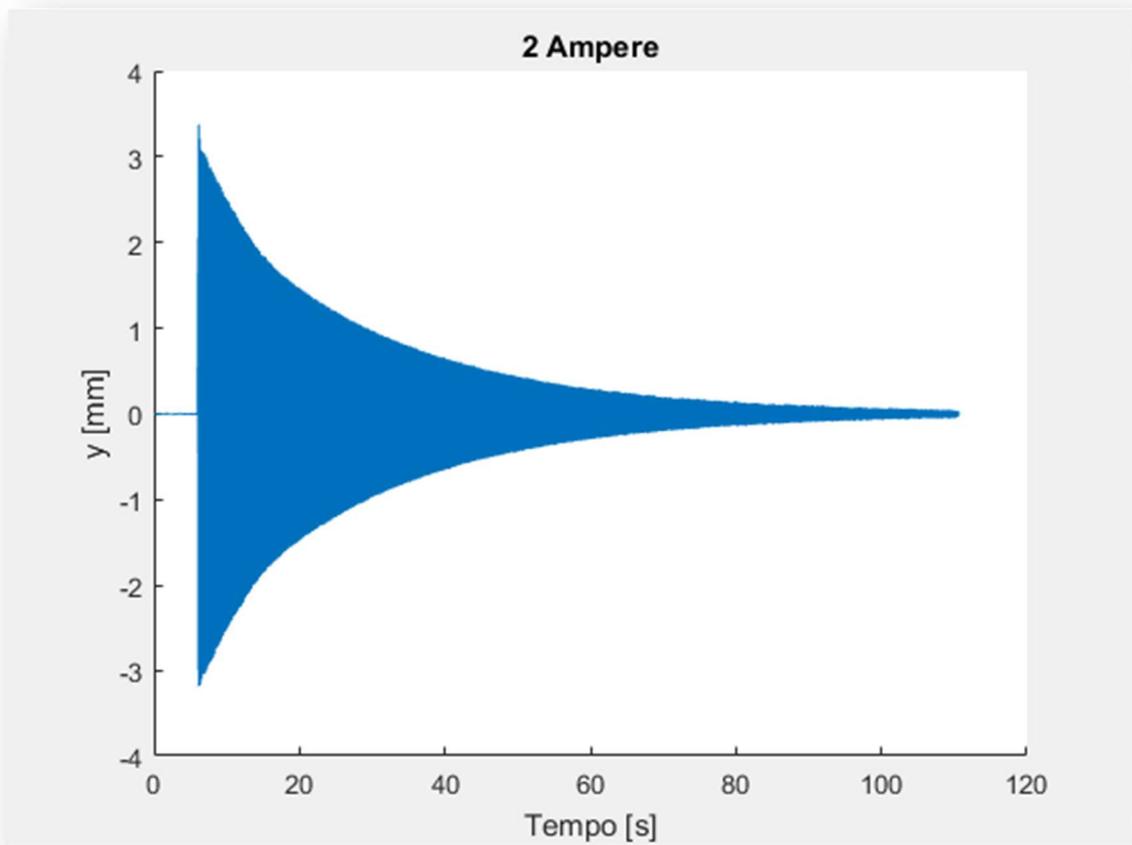


Figura C.6

- $Z_1 = 5.0109 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 4.9758 * 10^{-4}$
- $Z_m = 4.9933 * 10^{-4}$

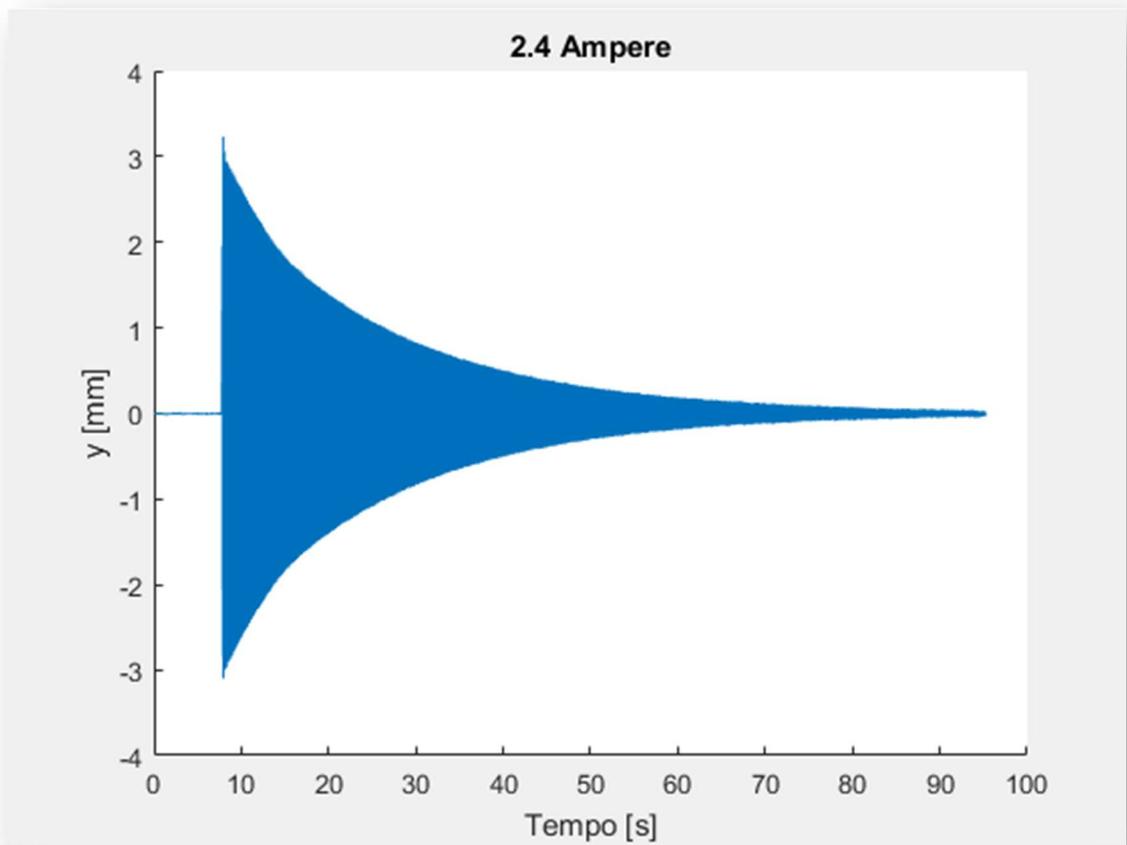


Figura C.7

- $Z_1 = 6.2524 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 6.2421 * 10^{-4}$
- $Z_m = 6.2493 * 10^{-4}$

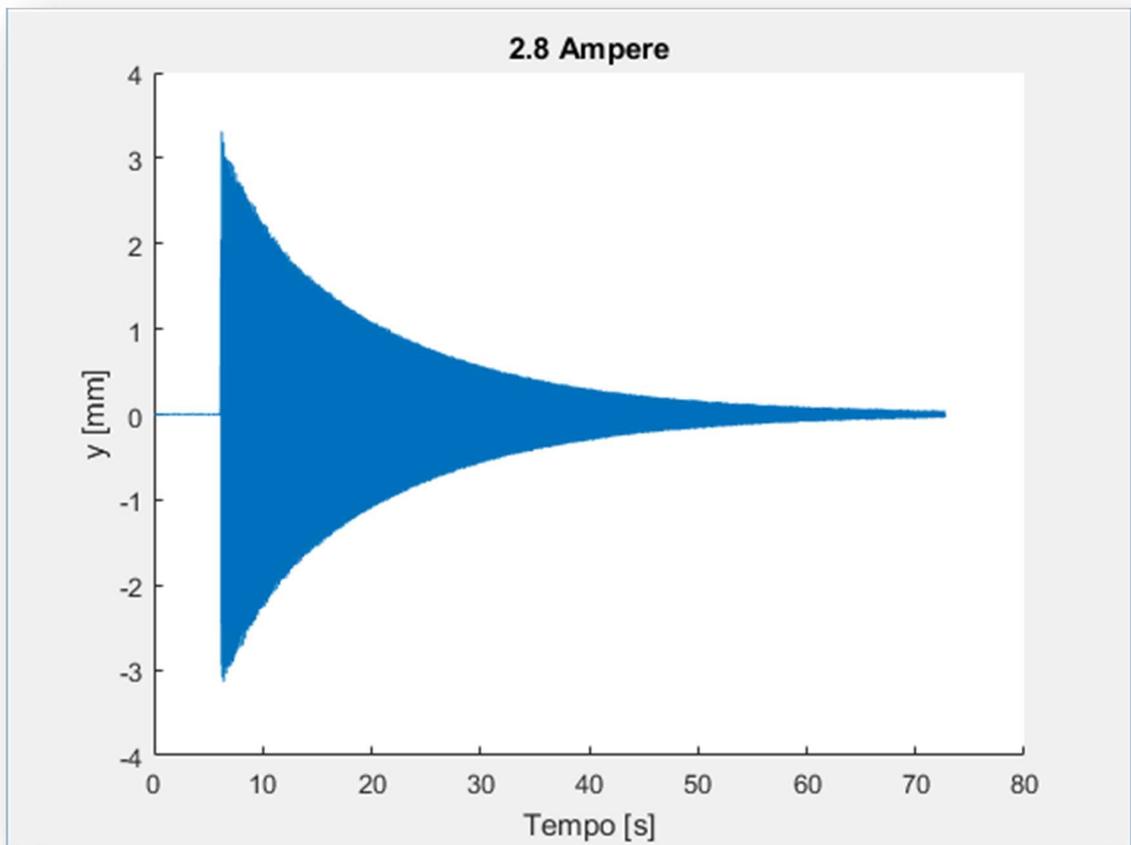


Figura C.8

- $Z_1 = 7.8955 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 8.3297 * 10^{-4}$
- $Z_m = 8.1126 * 10^{-4}$

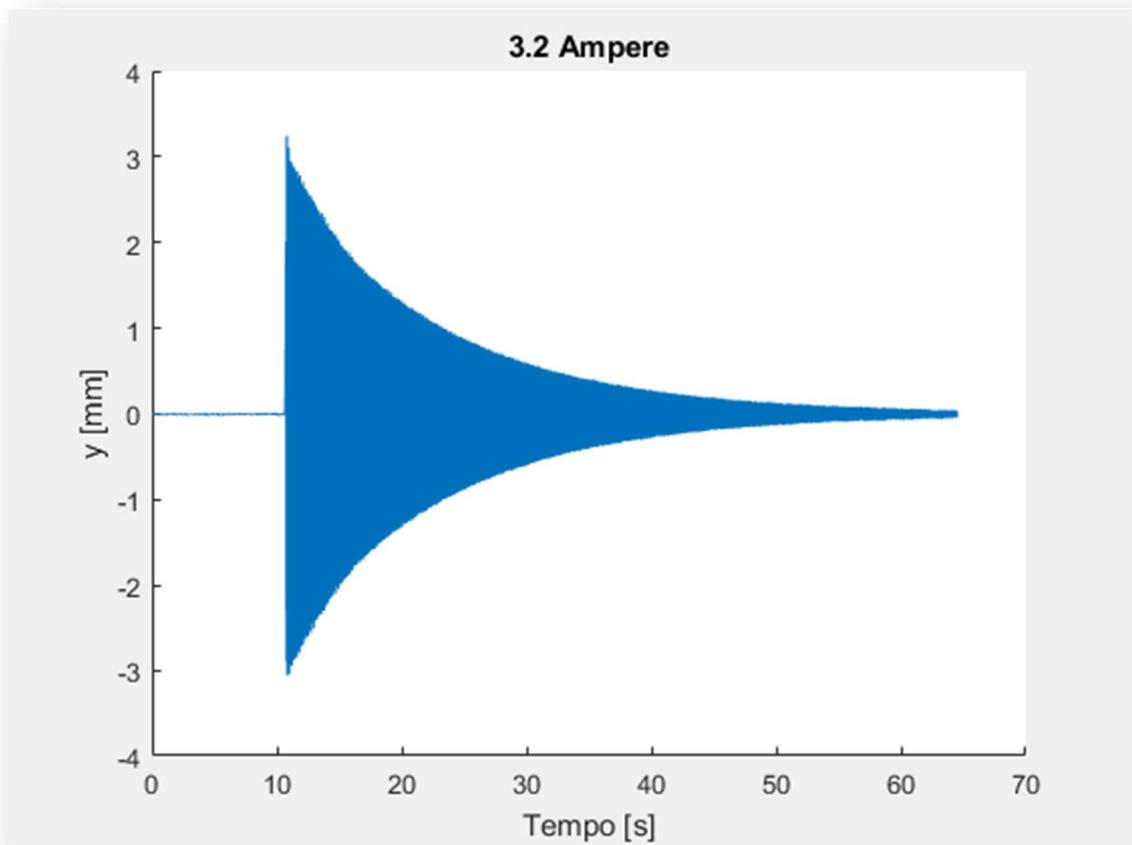


Figura C.9

- $Z_1 = 9.6650 * 10^{-4}$
- $Z_2 = 9.6023 * 10^{-4}$
- $Z_m = 9.6336 * 10^{-4}$

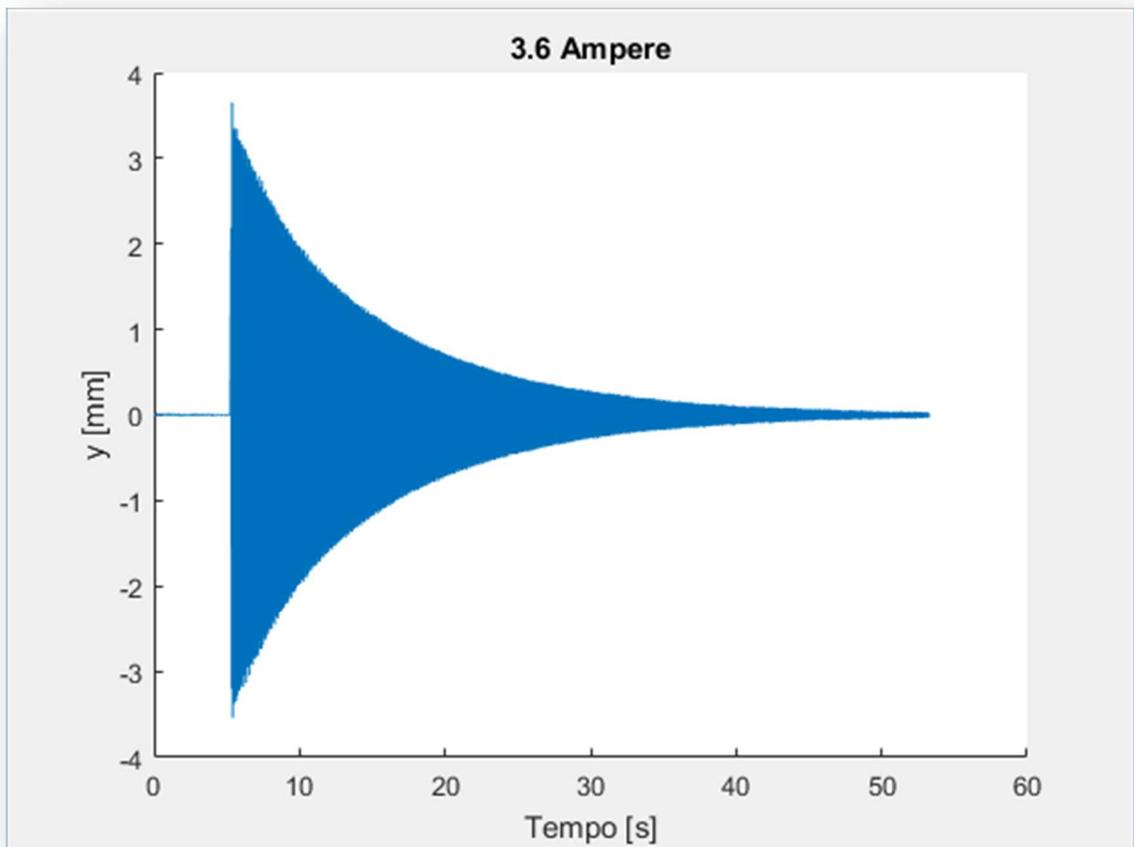


Figura C.10

- $Z_1 = 0.0012$
- $Z_2 = 0.0011$
- $Z_m = 0.0012$

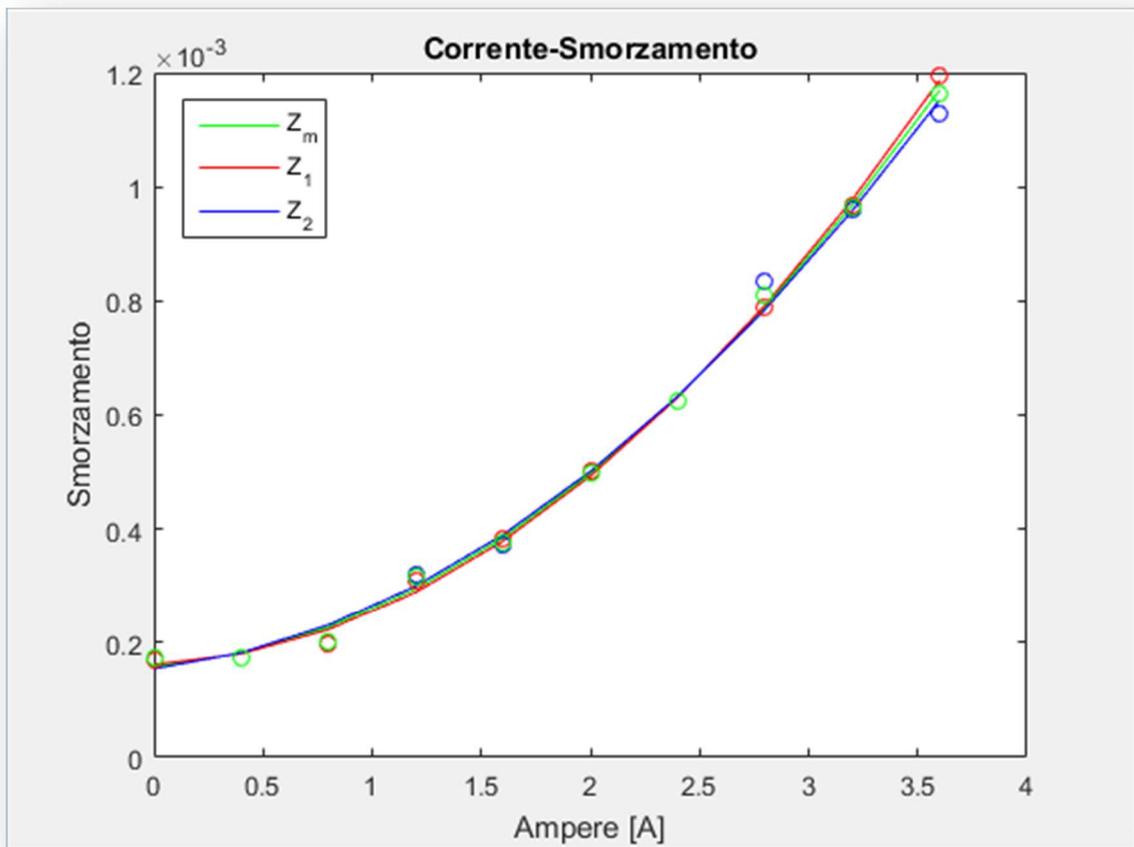


Figura C.11

Confronto dell'andamento dello smorzamento in funzione della corrente ottenuto con i due metodi e ulteriore confronto con il valore mediato dei ricavato dai risultati ottenuti

Bibliografia

Capitolo 2

David Halliday, Robert Resnick, Kenneth S. Krane, *Fisica 1*, CEA, 2003.

Mark Thompson, *Permanent Magnet Electrodynamical Brakes – Design Principles and Scaling Laws*.

Capitolo 3

Giorgio Diana, Federico Cheli, *Dinamica e vibrazione dei sistemi*, Utet libreria, 1993.

Erasmus Viola, *Fondamenti di dinamica e vibrazione delle strutture*, Pitagora Editrice Bologna, 2001.

Capitolo 4

Leonard Meirovitch, *Fundamentals of Vibrations*, Waveland press inc., 2010.