

# Studio della dinamica d'interfacce tra fluidi attraverso una tecnica di misura laser Doppler

Gianluca Rossi (°) Roberto Marsili (°) Claudio Rondini (°) Paolo Castellini (°)

(°) Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli studi di Perugia  
Via G. Duranti 1/A-4 – 06125 Perugia (Italy)  
Tel. ++39755853744 Fax: ++39755852703  
E-Mail: [misure@isten.ing.ing.unipg.it](mailto:misure@isten.ing.ing.unipg.it)

(°) Dipartimento di Meccanica – Università degli studi di Ancona  
Via Breccie bianche – 06031 ancona  
Tel. ++3912204144  
E-mail: [casta@mehpl.unian.it](mailto:casta@mehpl.unian.it)

## Sommario

L'obiettivo di questo lavoro riguarda lo sviluppo di una tecnica di misura basata sull'interferometria Laser - Doppler per lo studio ed il monitoraggio di perturbazioni ondose sul piano d'interfaccia tra due fluidi, allo scopo di esaminarne il comportamento dinamico.

I primi risultati raggiunti evidenziano l'esistenza di un'incertezza, la cui espressione, nel caso più generale, è funzione del tempo e della lunghezza d'onda della perturbazione in esame.

Detta incertezza è stata ridotta mediante la correzione della misura, effettuata sulla base di alcuni modelli teorici testati in laboratorio, mediante misure comparative tra vibrometro Laser e sensore ottico a triangolazione usato come riferimento.

**KEYWORDS:** vibrometro laser Doppler, interfaccia tra fluidi, perturbazioni ondose,

## Introduzione

Attualmente per lo studio delle onde su fluidi si utilizzano tecniche di misura ad assorbimento di luce, le quali forniscono, con notevole semplicità, informazioni globali su di uno spazio di misura anche esteso, ma non sono adatte a misure puntuali.

Tali tecniche sono dipendenti dal tipo di fluido in esame, poiché la misurazione si basa sulla quantità di luce riflessa che è funzione delle caratteristiche ottiche del mezzo; di conseguenza occorre effettuare una taratura del sistema per ogni fluido in prova.

Tale limite conduce ad impiegare tali metodologie soltanto per ottenere informazioni qualitative o al più per misurare la velocità di propagazione delle perturbazioni attraverso la cross-correlazione di due immagini acquisite in due differenti istanti temporali.

La finalità di questo lavoro è quella di sviluppare una tecnica di misura ottica, senza contatto, per l'analisi puntuale del comportamento dinamico della superficie di interfaccia tra due fluidi.

L'assenza di contatto fisico esclude la possibilità di ogni modifica del campo di moto, rendendo tale tecnica scarsamente intrusiva e quindi adatta per l'analisi di fenomeni anche su piccola scala. Come esempio di applicazione si è studiata l'instabilità del fluido antighiaccio sulle ali degli aerei e le forme d'onda generate da un modellino di prua di una nave.

Per tale studio si impiega un interferometro Laser commerciale, comunemente usato per monitorare le vibrazioni di corpi solidi, al fine di estenderne il principio di funzionamento per l'impiego su fluidi. Per far questo è necessario innanzi tutto sviluppare un modello teorico del suo

comportamento quando impiegato per misure su perturbazioni ondose sul piano d'interfaccia tra due fluidi.

La metodologia di analisi sviluppata in questo lavoro può avere importanti applicazioni sia nel settore industriale sia in quello della ricerca scientifica, poiché i risultati ottenuti non sono raggiungibili con nessuno degli strumenti classici utilizzati per la misura di vibrazioni, data la loro accertata intrusività.

## Sviluppo di modelli matematici

In questa fase si analizza per via teorica il comportamento di un vibrometro Laser in presenza di un cammino ottico costituito da due mezzi con differenti indici di rifrazione.

Lo scopo è quello di far sì che la variazione del cammino ottico della luce Laser, e quindi lo shift Doppler, non sia dovuto allo spostamento del target bensì al movimento della superficie di separazione dei due mezzi.

Infatti, se un fascio Laser attraversa nel suo percorso dei mezzi il cui spessore varia nel tempo, nonostante che lo spot sia puntato su di un riferimento fisso nel tempo, è possibile dimostrare che l'uscita dello strumento dipende unicamente da tale variazione.

Ipotizzando che la superficie del corpo in misura rimanga ferma nel tempo ad una distanza pari ad  $L$  dalla testa del vibrometro e che l'interfaccia fluida sia dotata di moto sinusoidale è possibile scrivere (dalla figura 1) quanto segue:

$$L(t) = \cos t.$$

$$L_1(t) = L_{1_0} + L \sin(\omega_m t) \quad \Rightarrow \quad v_1(t) = L \omega_m \cos(\omega_m t)$$

$$L_2(t) = L - L_1(t)$$

l'intensità luminosa che arriva al fotorivelatore vale:

$$I(t) = I_0(1 + \cos(\Delta\varphi))$$

dove  $\Delta\varphi = \omega T_m$  rappresenta lo sfasamento tra il raggio in misura e quello di riferimento.

Nel nostro caso si ha:

$$T_m = \frac{2L_1}{c_1} + \frac{2L_2}{c_2}$$

con  $c_1$  e  $c_2$  rappresentanti le velocità di propagazione della radiazione luminosa nei due mezzi.

Quindi:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = \omega T_m &= \frac{4\pi}{\lambda} [n_1(L_{1_0} + L \sin(\omega_m t)) + n_2(L - L_{1_0} - L \sin(\omega_m t))] = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [(n_1 L_{1_0} + n_2 L - n_2 L_{1_0}) + n_1 L \sin(\omega_m t) - n_2 L \sin(\omega_m t)] = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [B + L(n_1 - n_2) \sin(\omega_m t)]. \end{aligned}$$

Con  $B = n_1 L_{1_0} + n_2 L - n_2 L_{1_0}$ .

Potendo scrivere:

$$\Delta\varphi = \frac{d\Delta\varphi}{dt} t = \omega_D t$$

si ottiene:

$$\omega_D = \frac{4\pi L}{\lambda} (n_1 - n_2) \omega_m \cos(\omega_m t) = \frac{4\pi}{\lambda} (n_1 - n_2) v_1(t) \quad \Rightarrow \quad f_D = \frac{2}{\lambda} (n_1 - n_2) v_1(t).$$

L'analisi teorica mostra che sul fotodiodo giunge un segnale sinusoidale la cui frequenza è proporzionale alla velocità di vibrazione dell'interfaccia tra i due mezzi fluidi. Nel caso di misure in cui il cammino ottico non sia completamente in aria, si ricava facilmente:

$$f_D = \frac{2v_{1\text{effettiva}}(t)}{\lambda}(n_1 - n_2) \quad \Rightarrow \quad v_{1\text{effettiva}} = \frac{\lambda \cdot f_D}{2(n_1 - n_2)}$$

In caso contrario si ottiene:

$$f_D = \frac{2v_{1\text{misurata}}(t)}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad v_{1\text{misurata}} = \frac{\lambda \cdot f_D}{2}$$

Da cui:

$$\frac{v_{1\text{effettiva}}}{v_{1\text{misurata}}} = \frac{\lambda \cdot f_D}{2(n_1 - n_2)} \cdot \frac{2}{\lambda \cdot f_D} = \frac{1}{(n_1 - n_2)}$$

Tale risultato mette in evidenza la presenza di un'incertezza sistematica pari alla differenza degli indici di rifrazione dei due fluidi, i quali risultano essere gli unici parametri ottici che intervengono nella misurazione, di conseguenza una volta noti tali valori, il sistema non necessita di ulteriori tarature.

## ANALISI SPERIMENTALE DELL'INCERTEZZA DI MISURA

L'importante risultato a cui siamo giunti in precedenza è stato verificato sperimentalmente utilizzando come fluido di prova il de/anti-icing fluid attraverso il banco di misura raffigurato in fig.2, e per mezzo del quale si è realizzata un'interfaccia piana (almeno nell'intorno dello spot Laser) tra due fluidi, dotata di moto sinusoidale.

Di seguito alla rappresentazione del banco di misura, sono riportati gli andamenti delle time history relative allo spostamento puntuale dell'interfaccia fluida., valutate direttamente in spostamento attraverso il conteggio delle frange d'interferenza grazie all'utilizzo del vibrometro OFV 303 con scheda fringe counter,

Il banco di misura, appositamente realizzato, è stato inizialmente tarato con un sensore a triangolazione, al fine di quantificare l'incertezza di misura a seguito di una serie di prove:

	Prova 1	Prova2	Prova3
Ampiezza eccitazione	3.92 Volts	4.03 Volts	4.44 Volts
Frequenza eccitazione	6.50 Hz	6.50 Hz	6.50 Hz

I seguenti risultati ottenuti sono di seguito riportati:

Riferim.	Lettura Vibrometro		Discrepanza	
	misurato	corretto		
mm	mm	mm	mm	%
2.53	1.13	2.35	0.17	6.81
2.90	1.48	3.08	0.18	6.17
3.71	1.89	3.94	0.23	6.15

E' facile osservare che l'incertezza del vibrometro durante la misura è essenzialmente di tipo sistematico, e all'incirca pari al 6.4%, mentre la componente casuale è soltanto dello 0.2%.

## ANALISI DELL'INCERTEZZA NEL CASO DI MISURE IN VELOCITÀ

Nel momento in cui sul piano d'interfaccia è presente una perturbazione di tipo sinusoidale non stazionaria, un vibrometro Laser commerciale, operante in termini di velocità, stima qualcosa che non è più una sinusoide come è facilmente riscontrabile osservando le fig. 3 e 4; segno evidente che nel computo globale dell'incertezza sono insorti nuovi termini rispetto al caso precedentemente osservato.

Allo scopo di studiare questo fenomeno è stato realizzato il banco di misura riportato in fig. 5, dove si è indotta artificialmente, per mezzo di un pistone collegato ad uno shaker, una perturbazione sinusoidale sulla superficie d'interfaccia aria-acqua.

Per sua natura il vibrometro misura soltanto le velocità lungo l'asse ottico, per cui nel nostro caso lo strumento rileva solamente la componente della velocità effettiva individuata dal coseno dell'angolo di rifrazione, il quale, variando nel tempo, rende l'incertezza di misura non più costante, ma dipendente dal tempo.

Ipotizzando per tale angolo una legge di variazione temporale di tipo sinusoidale con frequenza pari a quella della perturbazione indotta, si ottiene che la velocità misurata dal vibrometro in presenza di una perturbazione sinusoidale non stazionaria è la seguente:

$$V_{\text{mis.}} = V_{\text{eff.}} \cdot (n_1 - n_2) \cdot \cos \vartheta_r$$

dove  $\vartheta_r = \Theta \cdot \sin(\omega t + \psi)$ .

Da ciò è stato possibile ricostruire analiticamente il segnale in velocità del vibrometro, ottenendo, per una frequenza d'eccitazione pari a 5.50 Hz, i risultati mostrati in fig.6, che ci permettono di considerare lecita l'ipotesi fatta in precedenza.

Naturalmente la ricostruzione del segnale ha richiesto la conoscenza di alcuni parametri, che sono stati rilevati sperimentalmente attraverso il banco di misura mostrato precedentemente.

La non perfetta rispondenza, in termini di sfasamento, tra il segnale numerico e quello reale è essenzialmente da attribuire al fatto che il modello non prende in considerazione aspetti inerziali e di smorzamento, sicuramente presenti nella realtà e legati al moto della massa liquida.

Per evitare tale discrepanza attualmente si sta lavorando alla realizzazione di un codice in grado di ricostruire il segnale del vibrometro Laser Doppler nel dominio della frequenza e non nel dominio del tempo come è stato fatto in precedenza, poiché in questo modo, le informazioni connesse allo smorzamento, sono già intrinseche nel contenuto in frequenza dei segnali acquisiti.

In ogni caso il modello, per quanto accurato possa essere, resta sempre una simulazione della realtà, di conseguenza non sarà mai perfettamente rispondente.

Dopo aver quantificato l'incertezza di misura, l'idea è quella di realizzare un sistema in grado di ridurla automaticamente dai segnali acquisiti in velocità, e di risalire per successiva integrazione all'effettivo andamento, in termini di spostamento, della perturbazione indotta sulla superficie d'interfaccia.

Per realizzare ciò è stato studiato un apposito codice in grado di effettuare quanto sopradetto per via numerica, ottenendo, sempre in corrispondenza di una frequenza d'eccitazione di 5.50 Hz, i risultati mostrati in fig.7.

La non corrispondenza tra il segnale reale e quello numerico è da attribuirsi alla presenza del predetto sfasamento, il quale genera una riduzione dell'incertezza diversa da quella prevista per via teorica; in ogni caso la portante del segnale ottenuto per via numerica è sorprendentemente identica al segnale di riferimento rappresentato in fig.8.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro sono state analizzate le sorgenti d'incertezza presenti nel caso di misura di perturbazioni sinusoidali indotte sull'interfaccia tra due fluidi per mezzo di un vibrometro Laser Doppler.

L'analisi svolta sulle possibili sorgenti d'incertezza ha evidenziato due importanti aspetti, il primo riguarda il fatto che la misura è affetta da incertezza sistematica pari alla differenza tra gli indici di rifrazione dei mezzi (in questo caso sono soltanto due), mentre il secondo, presente soltanto nel caso di misure in velocità, evidenzia la forte dipendenza della misura, dalla variabilità dell'angolo

di rifrazione in funzione del tempo, anche se tal effetto, per angoli di incidenza inferiori ai 30°, incide di circa il 10%.

In conseguenza di ciò la misura è tanto più accurata quanto più grande risulta essere la lunghezza d'onda della perturbazione indotta sulla superficie d'interfaccia.

In entrambi i casi sono stati sviluppati dei modelli per quantificare l'incertezza allo scopo di migliorare la qualità della misura.

## **RINGRAZIAMENTI**

L'autore ringrazia il Prof. Gianluca Rossi per la proposta di quest'attività e per i suoi preziosi consigli, altresì ringrazia il Prof. Mario Carbonaro per le utili indicazioni rivelatesi illuminanti.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Ing. E. Giacomini, "Nuove tecniche di misura Laser per il controllo di qualità di viti a ricircolo di sfere".
2. Prof. Gianluca Rossi, Ing. Roberto Marsili, "Uncertainty analysis of vibration measurements of tools inside fluids by Laser Doppler techniques".
3. Prof. Ing. Mario Carbonaro (Dir. Vkl) "Stability of fluid layer on aircraft wings".

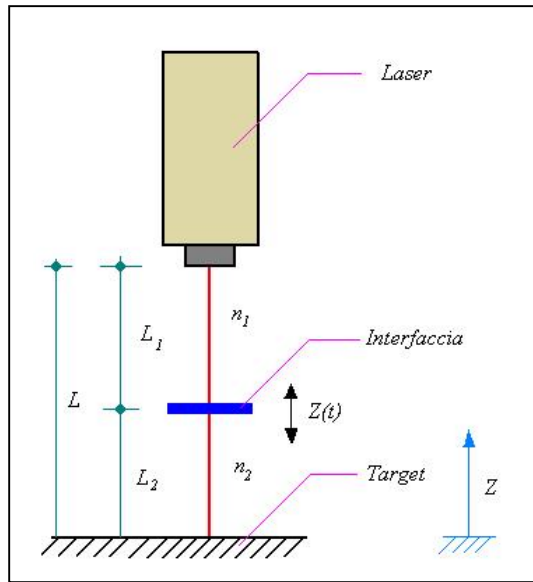


fig. 1

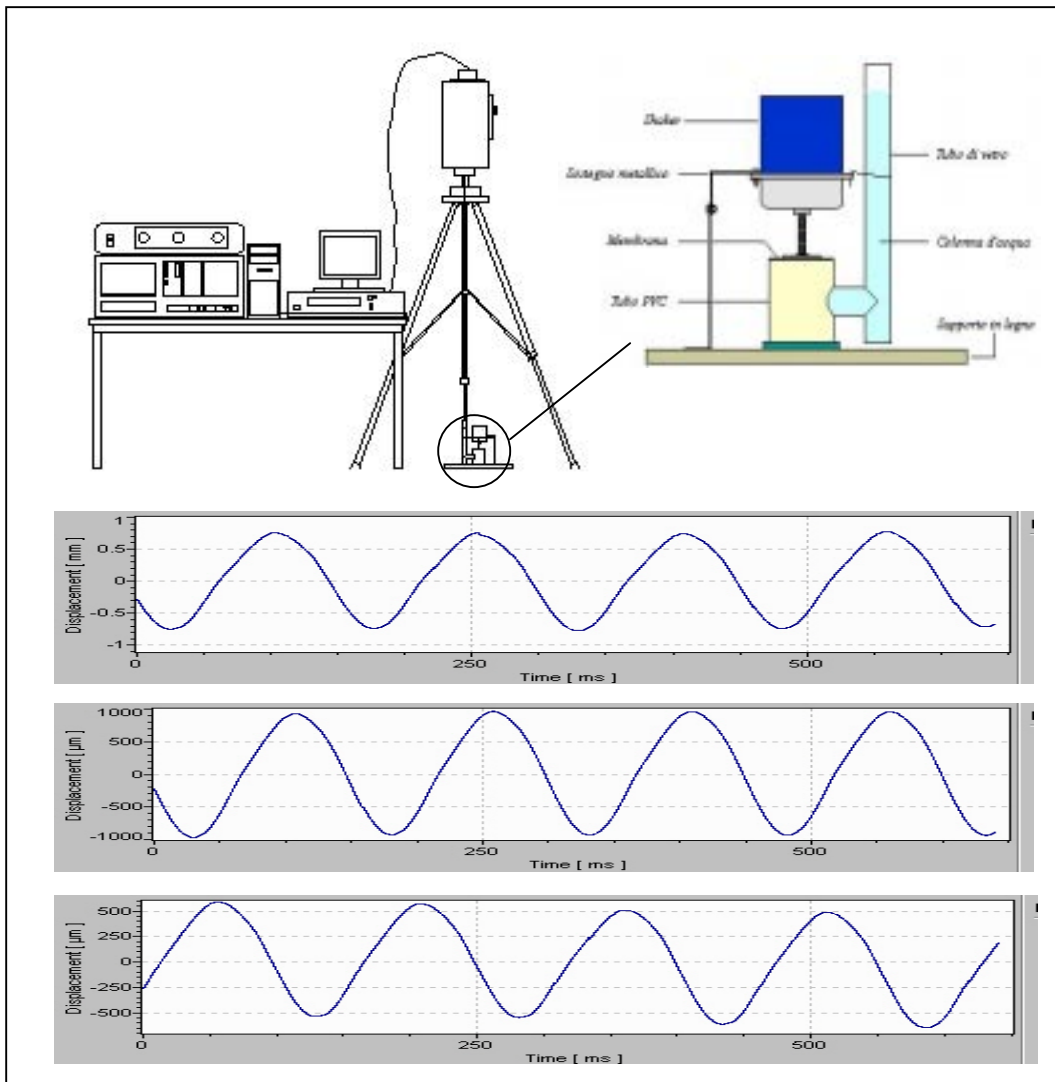
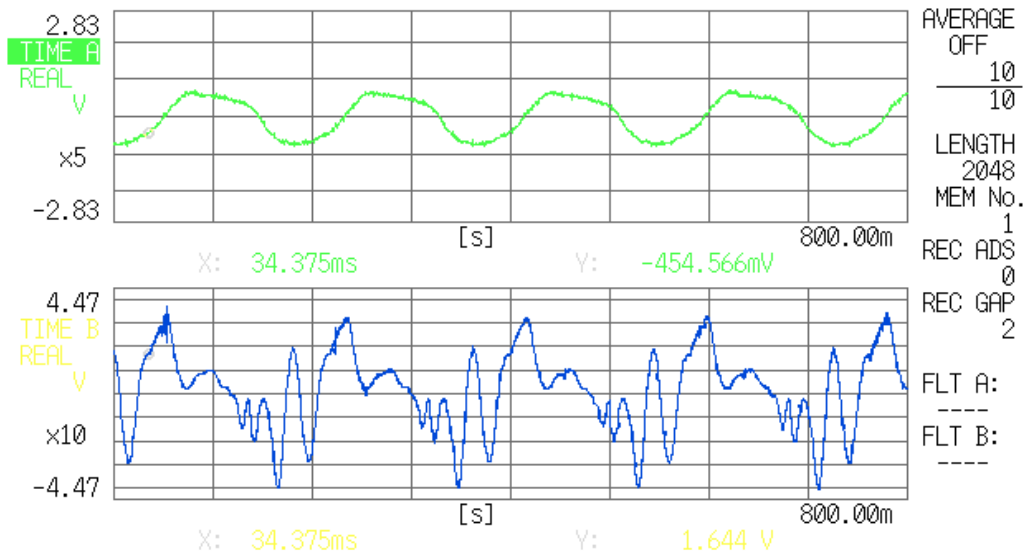


fig. 2

ONO SOKKI CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER

1.0kHz A: AC/10.0Vr B: AC/31.6Vr

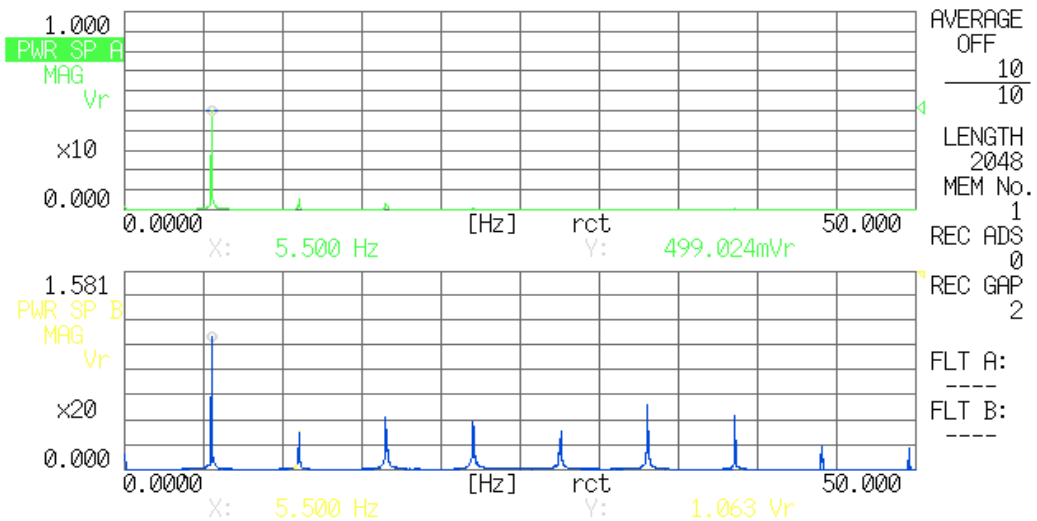


Memory&Disk >> DISK UTILITY >> STORE ASCII						Mon Jan 24 13:05:42 2000
X - Y	Y	HPGL	BIT MAP	DIR COMM	DIR DATE	RETURN

fig. 3

ONO SOKKI CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER

50.0 Hz A: AC/10.0Vr B: AC/31.6Vr



Memory&Disk >> DISK UTILITY >> STORE ASCII						Mon Jan 24 13:07:39 2000
X - Y	Y	HPGL	BIT MAP	DIR COMM	DIR DATE	RETURN

fig. 4

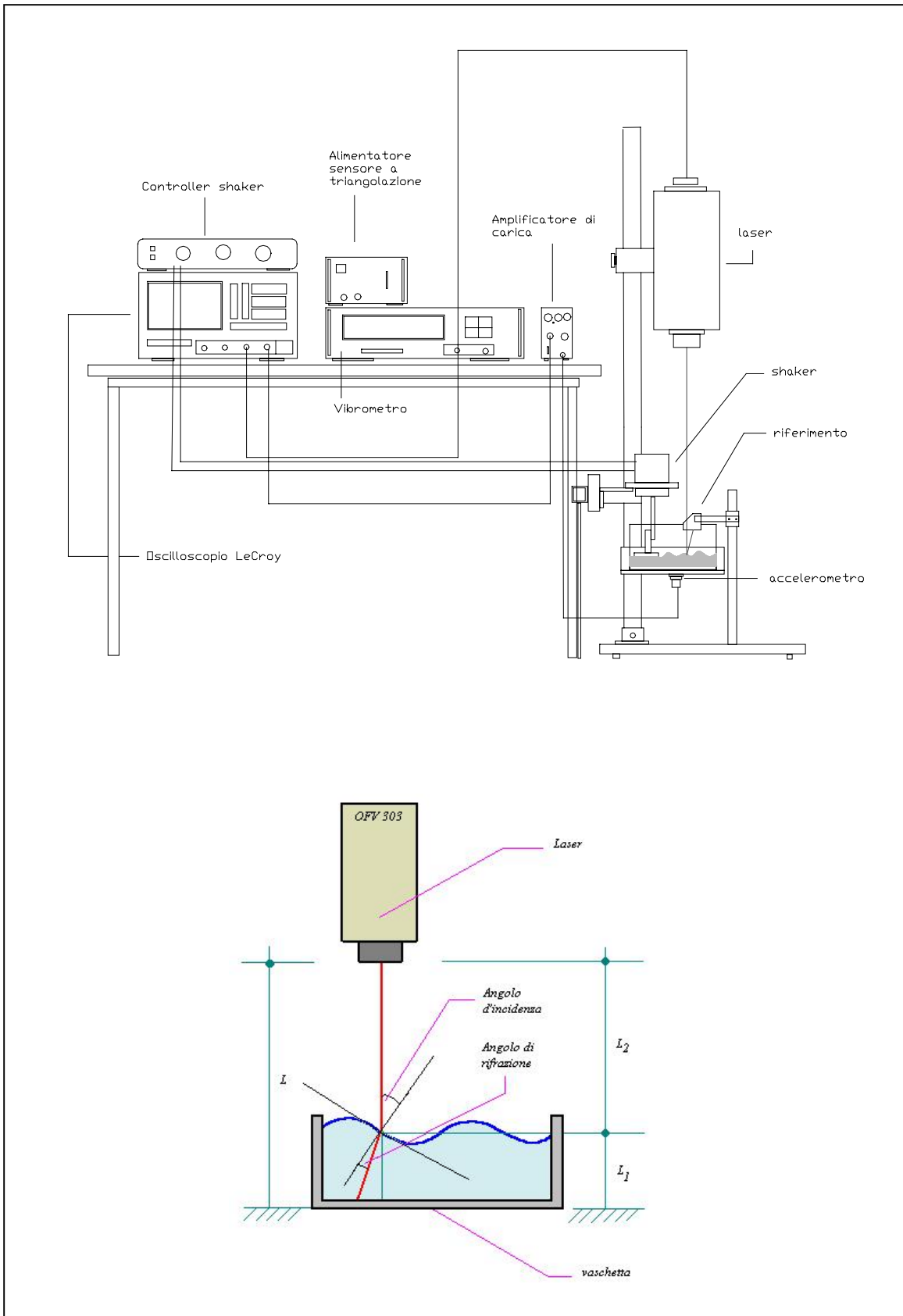


Fig.5

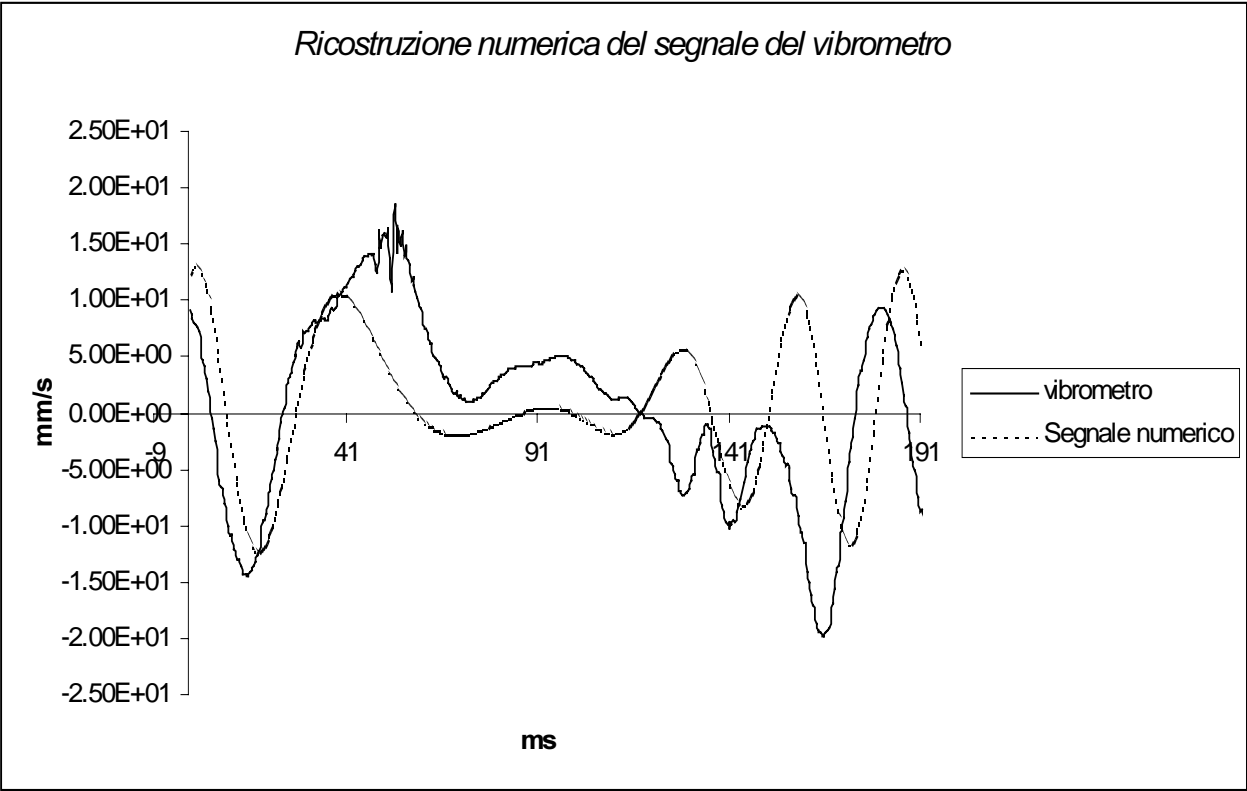


fig. 6



fig. 7

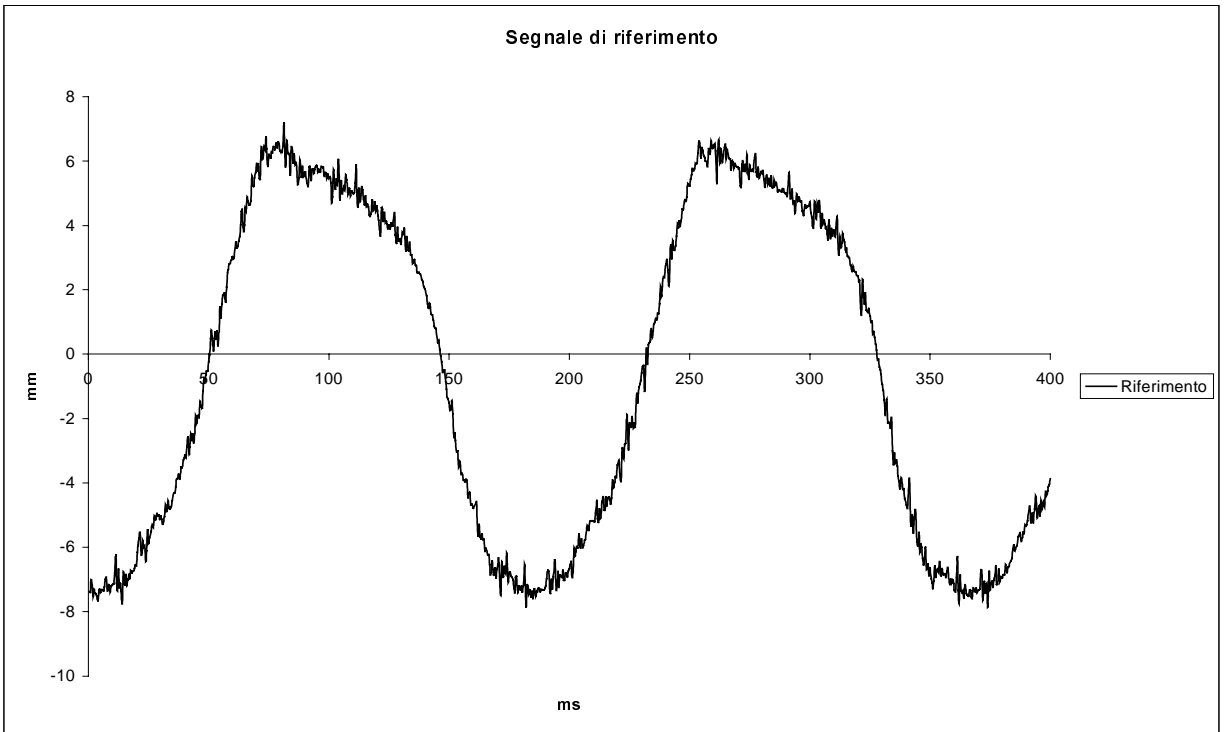


fig. 8